



**ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LAS FUENTES HÍDRICAS
SUPERFICIALES A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE ORIGEN AGRÍCOLA EN LA
SUBZONA HIDROGRÁFICA GUACHAL, VALLE DEL CAUCA**

Luisa Fernanda Cuellar Escobar

Ana María Mosquera Gómez

Universidad del Valle sede Cali

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente,

EIDENAR

Programa de Ingeniería Agrícola

Santiago de Cali, mayo 12 de 2021

**ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DE LAS FUENTES HÍDRICAS
SUPERFICIALES A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE ORIGEN AGRÍCOLA EN LA
SUBZONA HIDROGRÁFICA GUACHAL, VALLE DEL CAUCA**

Luisa Fernanda Cuellar Escobar

Ana María Mosquera Gómez

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÍCOLA

Director

Andrés Fernando Echeverri Sánchez PhD.

Profesor Asistente

Universidad del Valle sede Cali

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente,

EIDENAR

Programa de Ingeniería Agrícola

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	1
2	INTRODUCCIÓN	2
3	MARCO CONCEPTUAL	3
3.1	CONTAMINACIÓN DIFUSA	3
3.2	AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO.....	4
3.2.1	AMENAZA.....	4
3.2.2	VULNERABILIDAD	4
3.2.3	RIESGO	5
3.3	ANÁLISIS JERÁRQUICO DE PROCESOS (AHP)	6
3.4	LOS SIG EN LOS ESTUDIOS AMBIENTALES	8
4	ANTECEDENTES	9
5	OBJETIVOS	14
	OBJETIVO GENERAL.....	14
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
6	METODOLOGÍA	15
6.1	LOCALIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO	15
6.2	ENFOQUE METODOLÓGICO.....	15
6.3	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD	15
6.4	CATEGORIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN.....	16
6.4.1	COBERTURA Y USO DE SUELO	20
6.4.2	PRECIPITACIÓN	24
6.4.3	PENDIENTE DEL TERRENO	24
6.4.4	DISTANCIA DE CULTIVOS A CUERPOS HÍDRICOS.....	25
6.4.5	GRADO DE EROSIÓN	26
6.4.6	TEXTURA DEL SUELO	26
6.4.7	EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE PESTICIDAS	27

6.4.8	EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE FERTILIZANTES	27
6.4.9	EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE AGUA DE RIEGO	27
6.4.10	FRACCIONAMIENTO DE APLICACIÓN DE FERTILIZANTES	27
6.5	METODOLOGÍA DE CAPTURA DE INFORMACIÓN	28
6.6	ESTIMACIÓN DEL IVCDA Y ZONIFICACIÓN	29
7	RESULTADOS.....	30
7.1	RECOPILACIÓN INFORMACIÓN DE CULTIVOS.....	30
7.1.1	CAÑA DE AZÚCAR	30
7.1.2	PIÑA	31
7.1.3	MARACUYÁ.....	34
7.1.4	YUCA.....	36
7.1.5	MANGO	36
7.1.6	PEPINO	37
7.2	MAPAS DE PARÁMETROS NORMALIZADOS.....	38
7.3	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE ORIGEN AGRÍCOLA (IVCDA).....	45
7.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
8	CONCLUSIONES	48
9	RECOMENDACIONES	50
10	REFERENCIAS.....	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes	9
Tabla 2. Categorización y normalización de los parámetros	16
Tabla 3. Listado de gremios y asociaciones contactadas por cada cultivo (Echeverri et al., 2020)	28
Tabla 4. Listado de empresas contactadas y literatura consultada por cada cultivo	28
Tabla 5. Fertilizantes utilizados en el cultivo de caña de azúcar	30
Tabla 6. Pesticidas utilizados en el cultivo de caña de azúcar.	31
Tabla 7. Fertilizantes utilizados en el cultivo de piña.	32
Tabla 8. Pesticidas utilizados en el cultivo de piña.	33
Tabla 9. Fertilizantes utilizados en el cultivo de maracuyá.	34
Tabla 10. Pesticidas utilizados en el cultivo de maracuyá.	35
Tabla 11. Fertilizantes utilizados en el cultivo de la yuca	36
Tabla 12. Pesticidas utilizados en el cultivo de la yuca	36
Tabla 13. Fertilizantes utilizados en el cultivo del mango	37
Tabla 14. Pesticidas utilizados en el cultivo de mango	37
Tabla 15. Fertilizantes utilizados en el cultivo del pepino	38
Tabla 16. Pesticidas utilizados en el cultivo del pepino	38
Tabla 17. Porcentaje de área de vulnerabilidad en zona de ladera y plana	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura Jerárquica del AHP. Tomado de (Mendoza et al., 2019)	7
Figura 2. Localización de la zona de estudio	15
Figura 3. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de cobertura y uso de suelo.	20
Figura 4. Composición de imágenes satelitales Landsat 8 del mes de julio (izquierda) y mes de septiembre (derecha)	21
Figura 5. El índice NDVI, indica que las zonas en color verde se asocian con densidades altas de vegetación, y las de color rojo son zonas con vegetación escasa o cuerpos de agua	21
Figura 6. El índice EVI de forma similar que el NDVI muestras que entre más verde sea la zona, se asocia con vegetaciones de gran biomasa.	22

Figura 7. El índice NDWI discrimina los cuerpos de agua con color azul y la vigorosidad de la vegetación se observa en colores rojos.	22
Figura 8. Cobertura y uso del suelo en la subzona hidrográfica Guachal.	23
Figura 9. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de precipitación.	24
Figura 10. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de pendiente del terreno.	25
Figura 11. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de distancia de cultivos a cuerpos hídricos.	25
Figura 12. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de grado de erosión	26
Figura 13. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de textura de suelo.	26
Figura 14. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de eficiencia de aplicación de pesticidas.	27
Figura 15. Obtención del IVCDA.	29
Figura 16. Mapa de valores normalizados de cobertura y uso del suelo.	40
Figura 17. Mapa de valores normalizados de grado de erosión.	41
Figura 18. Mapa de valores normalizados de distancia de cultivos a cuerpos hídricos superficiales.	41
Figura 19. Mapa de valores normalizados de pendiente del terreno.	42
<i>Figura 20. Mapa de valores normalizados de textura del suelo.</i>	<i>42</i>
Figura 21. Mapa de valores normalizados de precipitación anual.	43
Figura 22. Mapa de valores normalizados de eficiencia de aplicación de fertilizantes.	43
Figura 23. Mapa de valores normalizados de eficiencia de aplicación de pesticidas.	44
Figura 24. Mapa de valores normalizados de eficiencia de aplicación de agua para riego.	44
Figura 25. Mapa de valores normalizados de fraccionamiento de aplicación de fertilizantes.	45
Figura 26. Distribución porcentual de las zonas homogéneas de vulnerabilidad.	46
<i>Figura 27. Distribución espacial IVCDA.</i>	<i>46</i>
Figura 28. Zonas homogéneas de Vulnerabilidad.	47

DEDICATORIA

Espacialmente quiero dedicar este triunfo a mi mamá quien con su amor de madre y su confianza infinita nunca dudó de mis capacidades y siempre estuvo incondicionalmente durante todo mi proceso académico con los percances que se pudieran presentar, y a Dios quien me guio en este camino y me brindó la fortaleza para nunca desistir y abandonar mis objetivos en las situaciones difíciles.

Luisa Fernanda Cuellar Escobar

Dedico este logro a mi madre por haber creído en mí y brindarme su apoyo en cada momento de mi formación académica, es el ejemplo más claro de una mujer valiente y capaz que da todo por ver brillar a sus hijas.

Ana María Mosquera Gómez

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a nuestro director y profesor Andrés Echeverri quien nos brindó la oportunidad de desarrollar este trabajo y siempre tuvo la mejor disposición para guiarnos durante el mismo. Al grupo de investigación REGAR de la Universidad del Valle y la Ing. Melina Ruiz por compartirnos los resultados de su trabajo, sin ello no hubiera sido posible la ejecución del nuestro. A los grupos agrícolas empresariales quienes nos colaboraron con información indispensable. Finalmente, gracias a nuestros colegas y amigos Pablo Muñoz y Camilo Ocampo por ayudarnos en la recopilación de datos y por su constante apoyo en nuestra formación académica.

Luisa Fernanda Cuellar Escobar y Ana María Mosquera Gómez

1 RESUMEN

En la actualidad los cuerpos de agua superficiales presentan un cambio en la composición natural como consecuencia de acciones recurrentes por actividades ganaderas y agrícolas donde la introducción de los contaminantes a los cuerpos de agua se da a través de vías indirectas que son el resultado de una multiplicidad de pequeñas fuentes de descarga cuyos aportes no son localizados ni continuos, proceso conocido como contaminación difusa. A fin de determinar el grado de vulnerabilidad al que están expuestos los cuerpos hídricos por la contaminación difusa en la subzona hidrográfica Guachal se plantea una metodología basada en una técnica de análisis multicriterio y sistemas de información geográfica con el uso de imágenes satelitales que permita analizar los parámetros relacionados con la facilidad de transporte de los desechos tóxicos para zonificar la zona de acuerdo al grado de vulnerabilidad obtenido y contribuir en la toma de decisiones encaminadas a un adecuado manejo de las prácticas agrícolas para la protección misma de los recursos hídricos mediante el buen uso de ellos.

Palabras clave: contaminación difusa; análisis multicriterio; sistemas de información geografía.

2 INTRODUCCIÓN

El 70% de la superficie del planeta es agua, del cual el 3% está disponible para la mayoría de los seres vivos ya que contiene baja carga de sales, de este 3%, tan sólo el 0.5% es apta para consumo humano (González, 2007). En la actualidad, los cuerpos de agua superficiales presentan una alteración en su calidad misma, debido a las múltiples descargas que reciben de las actividades domésticas, agrícolas e industriales (Rodríguez et al., 2016), presentando afectación en los cuerpos de agua de una cuenca hidrográfica, las aguas subterráneas y muchas veces también el área marina asociada (Cotler & Iura, 2010). Este proceso conocido como contaminación difusa se refiere al cambio en la composición natural de un cuerpo de agua como consecuencia de acciones recurrentes por actividades agrícolas o deforestación, procesos industriales y aquellos que suelen ser repetitivos periódicamente y no necesariamente desde el mismo sitio, por medio de diferentes mecanismos de transporte en donde se dispersan, percolan, lixivian o escurren actuando de manera discontinua y no periódica (Gonzalez, 2007). Las actividades agrícolas, silvícolas y ganaderas son las principales causantes de la contaminación difusa (Hermosín et al., 2009). Sin embargo, no es fácil identificar de forma puntual la fuente que está generando esta contaminación, ya que estas prácticas están relacionadas directamente con el suelo y sus actividades afines; fertilización, riego, laboreo del suelo y manejo de ganado.

Actualmente, la mayoría de investigaciones tanto a nivel departamental como nacional han desarrollado modelos que están encaminados a la evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas. Existen pocas propuestas metodológicas para abordar este problema en las fuentes hídricas superficiales. Sin embargo, el grupo de investigación Gestión Integral del Recurso Agua para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria mediante la Agricultura de Riego (REGAR) de la Universidad del Valle desarrolló una propuesta metodológica para la valoración de la vulnerabilidad de los cuerpos hídricos superficiales a la contaminación difusa en las cuencas de los ríos Cauca y Dagua del Valle del Cauca (Echeverri et al., 2020).

De acuerdo con los resultados obtenidos por el grupo de investigación REGAR de la Universidad del Valle, en el desarrollo del proyecto “Estrategias para la recuperación y manejo integrado del recurso hídrico de las cuencas Cauca y Dagua en el Valle del Cauca”. Una de las subzonas más intervenidas en el departamento es la subzona hidrográfica (SZH) Guachal. En esta área confluyen actividades agrícolas a pequeña, mediana y gran escala en donde son utilizados productos químicos como fertilizantes y plaguicidas para regular el crecimiento de las plantas, cuyas altas dosis de manera difusa podrían estar generando un efecto acumulativo de desechos tóxicos que es producto de pequeños aportes individuales realizados desde lugares no puntuales. Los cuales terminan provocando la contaminación de los cuerpos hídricos cercanos de la SZH Guachal ubicada en el departamento del Valle del Cauca que podrían estar afectando la calidad de las fuentes hídricas superficiales que son usadas a su vez para consumo humano. Por lo tanto, es importante identificar y controlar la carga de contaminantes que colectivamente son significativos y que se ven reflejados en los cuerpos de agua.

A fin de determinar el grado de vulnerabilidad al que están expuestos los cuerpos hídricos por la contaminación difusa, existen parámetros que permiten ser relacionados de acuerdo con diferentes métodos de análisis; la pendiente, cobertura vegetal, distancia que hay desde el punto de aplicación de los productos químicos hasta las cuerpos hídricos, el tipo de cultivo y las condiciones climáticas, entre otros, se relacionan con la facilidad de transporte de los desechos tóxicos y pueden llegar a ser determinantes en cuanto al grado de vulnerabilidad. Como resultado de este comportamiento, surge la necesidad de contribuir a la solución de este problema por medio de la construcción de un mapa de vulnerabilidad a partir del análisis del conjunto de parámetros mencionados anteriormente que permita

identificar las zonas vulnerables y la relación que éstas presentan con los parámetros estudiados utilizando técnicas de análisis espacial e imágenes de sensores remotos.

Con este proyecto se busca establecer un manejo adecuado de las prácticas agrícolas que permita continuar con la ejecución de dichas actividades con el fin de contribuir en el proceso de toma de decisiones de manejo sustentable de acuerdo con el uso de los suelos haciendo referencia a la protección misma de los recursos hídricos mediante el buen uso de ellos.

El proyecto desde el punto de vista ambiental, permitirá identificar zonas vulnerables y proponer a su vez acciones de manejo ambiental a llevar acabo. Por la parte social, permitirá orientar a la autoridad ambiental en lo relacionado con la identificación de las fuentes hídricas superficiales más vulnerables a este tipo de contaminación, lo que contribuirá a largo plazo al mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano. Finalmente, en el tema económico sí se toman acciones de manejo ambiental (disminución de vulnerabilidad a la contaminación difusa) los tratamientos o procesos de mejoramiento de calidad de agua para consumo humano o agrícola serán de menor costo. De manera integral, el trabajo aportará elementos para los procesos de planificación territorial (POT).

3 MARCO CONCEPTUAL

3.1 CONTAMINACIÓN DIFUSA

La contaminación difusa se puede definir según Cotler & Iura (2010), como la introducción de contaminantes a cuerpos de agua superficiales o subterráneos a través de vías indirectas, como el lavado de contaminantes a través del suelo, o desde fuentes no localizadas. Una de las razones de la degradación de las aguas naturales es la contaminación antropogénica (Filimonov et al., 2021), como las prácticas agrícolas (Silva & Correa, 2009), debido a la fertilización excesiva y la baja eficiencia del uso de fertilizantes (Fu et al., 2019), las cuales contribuyen con la mayor parte de la carga difusa de nitrógeno (Wang et al., 2020). Fertilizantes y pesticidas son utilizados para regular el crecimiento de las plantas y pueden lixiviarse debajo de la zona radicular y ser transportados por el suelo hasta los cuerpos de agua, donde la intensidad de la lixiviación responde a las condiciones hidrológicas y las prácticas de ordenación del territorio (Duarte, 2012).

De acuerdo con lo anterior, se puede definir la contaminación difusa como la existencia de una multiplicidad de pequeñas fuentes de descargas, cuyos aportes no son localizados ni continuos (Reaney et al., 2019), y por el cual su acceso a los cuerpos de agua se genera por diferentes mecanismos de transporte (González, 2007). De esta forma, su evaluación y control es complejo, puesto que al no haber una fuente de concentración localizada su caracterización y control se dificulta, siendo su estudio difícilmente evaluado (Ortiz, 2004).

Las principales características de las fuentes difusas que responden a las condiciones hidrológicas, presentan dificultades para la medición o control directo (Ongley, 1997), ya que se caracterizan por la heterogeneidad espacio-temporal, pues obedecen al comportamiento estacional de la precipitación (Varekar et al., 2021).

Existen características en la calidad del suelo que pueden provocar la contaminación difusa tal como la compactación, la reducción de la profundidad del suelo, la acidificación y la reducción de la actividad biológica, ya que afectan negativamente la capacidad del suelo para el almacenamiento de agua y

nutrientes, como resultado aumentan la movilidad de los agroquímicos, disminuyen la degradación de los residuos orgánicos y reducen la eficiencia de las raíces de las plantas (Duarte, 2012).

Otros factores como el relieve, la pendiente y el tipo de densidad de la cubierta vegetal condicionan la tasa de escorrentía y su exposición a la erosión. Altas pendientes y baja densidad en la vegetación provocan un aumento de las cargas de nitrógeno (N) y fósforo (P) (Ou et al., 2021), y depende de cómo se encuentren los suelos receptores determinará que los sólidos en suspensión se infiltren o lleguen a las fuentes hídricas superficiales (González, 2007).

3.2 AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO

3.2.1 AMENAZA

En términos generales se conciben las amenazas como fenómenos extremos, de origen natural o no, que actúan en un determinado espacio geográfico en un tiempo definido, con el potencial de causar daño a una población (Soares & Murillo, 2014). Por otra parte, el riesgo, es el producto de la amenaza y la vulnerabilidad, lo que implica que, si se está ante la presencia de una amenaza y surge una vulnerabilidad asociada ante la misma, entonces existe un riesgo (Soldano, 2009). De acuerdo a esto, es pertinente aclarar que el término amenaza se entiende como los fenómenos que tienen el potencial de afectar negativamente a los seres humanos mientras que los riesgos se refieren a las condiciones socioeconómicas y ambientales de la región que ponen al grupo social en condición de peligro ante la posibilidad de la amenaza (Soares & Murillo, 2014).

Por otra parte, el grado de exposición del individuo ante las amenazas define la vulnerabilidad. Es imprescindible aclarar que una amenaza no afecta de igual manera a los grupos sociales, es decir, aquellos con elevado poder económico residentes en regiones peligrosas no son igual de vulnerables que los pobres que habitan las zonas de peligro. Mientras los primeros tienen acceso a tecnologías anti riesgos y disponen de una elevada capacidad de recuperación, los segundos no cuentan con tecnología ni tienen capacidad de respuesta (Soares & Murillo, 2014).

Según el Sistema Nacional del Riesgo de Desastres y de acuerdo con la Ley 1523 del 2012, la amenaza es el peligro de que un evento físico de origen natural o antropogénico se presente con una magnitud suficiente para causar impactos sociales negativos, así como también daños y pérdidas en los bienes físicos y los recursos naturales (UNGRD, 20017).

Por otra parte, la amenaza se define como un suceso natural o artificial que puede ocasionar un impacto negativo como la muerte, impactos a la salud, al igual que daños físicos o daños ambientales (Stephan et al., 2009). Las amenazas pueden ser naturales, clasificadas por su origen en geológicas o biológicas o amenazas inducidas cuando son causadas por procesos humanos (incendios, minería, degradación del medio ambiente). Más concretamente, la amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de todo evento que afecte a seres humanos (Soldano, 2009).

3.2.2 VULNERABILIDAD

El término “vulnerabilidad” encierra una gran complejidad. Hace referencia a la posibilidad del daño, a la finitud y a la condición mortal del ser humano. Sin embargo, tiene diversas dimensiones. Al menos una dimensión antropológica, que afirma la condición de vulnerabilidad del ser humano en cuanto tal, y una

dimensión social, que subraya una mayor susceptibilidad generada por el medio o las condiciones de vida, dando lugar a “espacios de vulnerabilidad” y “poblaciones vulnerables” (Feito, 2007).

La vulnerabilidad se ha ido asociando no sólo a las condiciones del individuo sino, cada vez más, a las condiciones del medio (ambientales, sociales o de otro tipo) en que su vida se desarrolla, dando lugar a la necesidad de incorporar los aspectos socioculturales en la comprensión de este concepto. De ahí que se hable, frecuentemente, de poblaciones vulnerables, para referirse a aquellos grupos de personas que, a consecuencia de las condiciones del medio en que viven, están en una situación de mayor susceptibilidad al daño. Por tanto, conviene resaltar que existen al menos dos tipos de vulnerabilidad humana: una vulnerabilidad antropológica, entendida como una condición de fragilidad propia e intrínseca al ser humano, por su ser biológico y psíquico; y una vulnerabilidad socio-política, entendida como la que se deriva de la pertenencia a un grupo, género, localidad, medio, condición socio-económica, cultura o ambiente que convierte en vulnerables a los individuos (Feito, 2007).

Según el Sistema Nacional del Riesgo de Desastres y de acuerdo a la Ley 1523 de 2012, se define la vulnerabilidad como la susceptibilidad de tipo económico, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir consecuencias en caso de que ocurra un evento físico peligroso. Por otra parte, se define como la predisposición que tienen los seres humanos de sufrir pérdidas a su integridad física y a sus medios de subsistencia que puedan ser afectados por eventos físicos peligrosos.

Al igual que el concepto de riesgo, el de vulnerabilidad adquiere diferentes concepciones. El diccionario de la lengua española (1992), define la vulnerabilidad como: que puede ser herido o recibir lesión física o moralmente (Chávez, 2018); mientras que (Soldano, 2009) define la vulnerabilidad como: capacidad “respuesta-daño” de la sociedad ante un evento potencialmente catastrófico. Por lo cual, la vulnerabilidad consiste en la capacidad diferenciada de hacer frente al evento catastrófico. Lo que conlleva a la realización de las siguientes actividades: Preparación, prevención y estrategias de recuperación.

Se define la vulnerabilidad como un conjunto de características y circunstancias que tiene una comunidad, sistema o bien que los hace susceptibles de presentar efectos nocivos en presencia de una amenaza ambientales (Stephan et al., 2009). Según (Cardona, 2001), la vulnerabilidad se define como un factor de riesgo que se expresa de forma matemática como la factibilidad de que el sistema expuesto sea afectado por el fenómeno que caracteriza la amenaza.

Por consiguiente, el concepto de vulnerabilidad supone atender a una dimensión antropológica, que iguala a los seres humanos en la fragilidad, y a una dimensión social, en la que el ser humano se hace más o menos susceptible al daño en función de las condiciones (ambientales, económicas, etc.) en que desarrolla su vida y de la posibilidad que tales condiciones ofrezcan de asegurar las capacidades básicas que permiten alcanzar la calidad de vida (Feito, 2007).

3.2.3 RIESGO

Para la primera década del siglo XXI, las investigaciones sobre desastres abarcaban campos muy variados de las Ciencias de la Tierra, la Tecnología, la Sociología, la Medicina, la Jurisprudencia, la Economía, etc., por lo que el concepto de riesgo es interpretado de muchas formas. Ante este contexto se reconoce a los estudios de riesgo como una evaluación compleja que debe ser abordada mediante el análisis transversal para poder obtener una visión integral de la problemática de una zona bajo estudio; mediante la gestión del riesgo, la cual se resume como la anticipación del desastre (Chávez, 2018).

Los estudios relacionados con el riesgo abarcan múltiples campos de las ciencias, lo que ha llevado a diferentes concepciones e interpretaciones que son generadas por la formación profesional, experiencias

e interpretaciones de los puntos de vista de los autores que la han formulado. En este contexto es necesario la definición del término. Así, el riesgo es la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas, como resultado de interacciones entre las amenazas naturales o antropogénicas y las condiciones de vulnerabilidad (Stephan et al., 2009).

Según la Real Academia Española, el término riesgo se define como la contingencia o proximidad de un daño; en donde contingencia se define como: la posibilidad de que algo suceda o no suceda, especialmente un problema que se plantea de manera no prevista. (Real Academia Española, 1992, citado por (Chávez, 2018). El riesgo hace referencia al rango de incertidumbre asociado al posible daño, por lo que se considera que el riesgo no solo depende del cálculo de la probabilidad, sino también del contexto social y cultural, en donde el cálculo formal del riesgo enfrenta la complejidad de hacer cuantificable un concepto netamente cualitativo como es el de vulnerabilidad (Briones, 2007).

Como otra definición, Soldano (2009) afirma que el riesgo se asocia a la probabilidad de que una amenaza se convierta en un desastre. Por lo que conceptos como vulnerabilidad y amenaza si se juntan, se convierten en un riesgo, es decir en la probabilidad de que ocurra un desastre. Lo que implica que si se está ante la presencia de una amenaza (peligro) y surge una vulnerabilidad (humana) asociada ante la misma, entonces existe un riesgo

En términos generales, el riesgo se asocia a la probabilidad de ocurrencia de un evento. Donde el concepto de probabilidad hace alusión a un resultado generalmente no favorable producto de fenómenos naturales particulares y por consiguiente de riesgos específicos y elementos de riesgo (Fundora et al., 2011).

Los estudios de riesgo son necesariamente muy locales, porque dependen de condiciones específicas de cada sitio. Una peculiaridad de los estudios de riesgo es que lo que está expuesto, varía en el tiempo, tanto en cantidad, como en sus características; particularmente los efectos del crecimiento demográfico y de la industrialización, que modifican e incrementan el riesgo, por lo que los estudios se vuelven rápidamente obsoletos. Un aspecto del problema, de la percepción del riesgo, es que aunado a este se encuentran asociadas las negaciones individuales y colectivas, que, en lapsos de pocos años borran de la memoria la ocurrencia de desastres, principalmente causados por efectos naturales de ocurrencia aleatoria y evolución rápida (p. ej., sismos, huracanes). Consecuentemente, en nuestro medio cultural y socioeconómico, el riesgo está asociado a fenómenos de evolución lenta (p. ej., uso y manejo de cuencas hidrográficas, cambio climático y elevación del nivel del mar), que no son percibidos adecuadamente o se pierdan de vista por su lento y poco violento desarrollo, lo cual incluso llega a adoptarse como parte de la cotidianidad; lo que sumado a la falta de una cultura de previsión y planificación, es lo que causa los desastres (Chávez, 20018).

3.3 ANÁLISIS JERÁRQUICO DE PROCESOS (AHP)

Con el fin de tener estimaciones razonablemente correctas en determinado curso de acción y para reducir la incertidumbre de elecciones erróneas y poco fundamentadas llevadas a cabo dentro de un proceso de toma de decisiones, es necesario recurrir a expertos. Un juicio de expertos es, en esencia, un sondeo de opinión entre personas reconocidas como fuentes confiables de un tema, técnica o habilidad, con autoridad en una materia específica. Si bien no hay un acuerdo unánime en relación con la selección de individuos o el mejor método a implementar en alguna situación en particular, primeramente, conviene reconocer que existen diferentes métodos para llevar un juicio de expertos.

Entre los métodos más utilizados está el método de agregados individuales; en el cual, se le pide a cada experto una estimación directa de su criterio, tratando estadísticamente los datos recogidos, el método Delphi; en donde cada experto responde de manera anónima e individual a cierto cuestionario, se analizan en conjunto sus respuestas, remitiendo la mediana obtenida y el intervalo intercuartil y se les pide que reconsideren su juicio anterior teniendo en cuenta estos datos. En cada ronda se repiten tales pasos, y todo juicio individual fuera del intervalo intercuartil tiene que estar justificado. Una débil dispersión de los juicios indica que se ha alcanzado un consenso. No obstante, se observa que la principal desventaja es que puede hacer que los miembros del grupo estén de acuerdo con las personas dominantes, a pesar de tener ideas contrarias cuando reciben una retroalimentación en las distintas iteraciones. También, se encuentran métodos como el grupo nominal y el consenso grupal donde en el primero, se debe reunir a los expertos, los cuales presentarán individualmente sus consideraciones y puntuaciones. Lo siguiente es realizar un debate de los temas tratados, donde cada uno de forma individual y por escrito, puntúa y argumenta su valoración. Y en el método del consenso grupal en el cual se reúne a un grupo pequeño de expertos en determinado lugar cuyo objetivo es lograr una puntuación estadística consensuada, permitiendo así, en gran medida, el intercambio de información y opiniones dentro del grupo (Mendoza et al., 2019).

El análisis jerárquico de procesos (AHP) es un método de análisis de problemas multicriterio que según Osorio & Orejuela (2008), está diseñado para evaluar alternativas con distintos criterios, con base en el principio de que los datos utilizados en el proceso son tan importantes como el conocimiento y experiencia que los actores tengan.

Según Mendoza et al. (2019), debido a la gran cantidad de juicios emitidos por los expertos, se vuelve imperativo resolver un problema de criterios múltiples, con múltiples valoraciones. Por lo anterior, el Proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process o AHP), es una técnica que se ajusta en gran medida a los requerimientos del problema que se plantea, y que se puede implementar en cinco pasos sistemáticos:

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

El AHP funciona construyendo matrices a partir de comparaciones entre los datos utilizados que por métodos matemáticos son organizados por niveles y prioridades frente a un objetivo establecido. Los diferentes resultados que se obtienen de acuerdo a las alternativas propuestas, se convierten en elementos importantes que dan soporte a la hora de tomar la decisión.

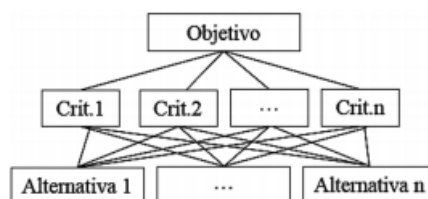


Figura 1. Estructura Jerárquica del AHP. Tomado de (Mendoza et al., 2019).

Martínez (2007), afirma que es un método de análisis multicriterio que permite considerar criterios cuantitativos y cualitativos, el cual de manera eficiente y gráfica ayuda a organizar la información, descomponerla y analizarla por partes, visualizando los efectos de cambio en los diferentes niveles y sintetizando de acuerdo con el problema de decisión que se esté revisando.

Bajo otro punto de vista según Martínez et al. (2010) definen el AHP como un método de evaluación multicriterio de gran utilidad para la toma de decisiones y de amplio uso dentro de los sistemas de información geográfica (SIG) que cuenta con el proceso de análisis jerárquico como el principal procedimiento para la asignación de pesos en los problemas de decisión. El AHP, permite construir un modelo jerárquico que representa el problema objeto de estudio, por medio de criterios que se han planteado inicialmente, las cuales permiten analizar las mejores alternativas para poder tomar una decisión final óptima.

3.4 LOS SIG EN LOS ESTUDIOS AMBIENTALES

Existen muchas definiciones de SIG que pueden ser usados para satisfacer múltiples propósitos. Los SIG pueden ser entendidos como una disciplina que de forma integral reúne herramientas, métodos y datos que se encuentran diseñados para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica, con el fin de analizar patrones, relaciones y tendencias en la información para contribuir en la toma de decisiones (Bongiovanni et al., 2010). De modo que los SIG requieren acceso a diferentes tipos de información que se relacionan por tener datos geográficos y de distribución espacial puesto que es una herramienta informática capaz de organizar los datos de forma georreferenciada y evaluar los resultados obtenidos de manera eficaz, permitiendo su integración con diferentes metodologías investigativas; como el análisis multicriterio, para tratar problemas medioambientales y territoriales (Santos, 1997).

Los SIG se emplean en la problemática medioambiental de acuerdo con los modelos existentes, vectorial y raster, donde el segundo compartimenta el espacio en una retícula regular, cuyos objetos poligonales sirven de elementos espaciales donde se almacena la información (Santos, 1997). Por tal razón, hace más de cincuenta años los SIG vienen posibilitando la incorporación del análisis espacial en el medio digital mediante la convergencia de diferente software en el interior del campo de la geoinformática (Fuenzalida et al., 2015). Metodologías como teledetección se usan en esta disciplina ya que ofrece un panorama de posibilidades prácticas, pues permite sintetizar grandes cantidades de datos, donde uno de los usos más útiles es la planificación y el mapeo de idoneidad del uso del suelo (Mazahreh et al., 2019).

El análisis espacial es representado por un conjunto de técnicas y modelos que usan explícitamente la referencia espacial en cada caso de datos, es decir, surge de la necesidad de sacar conclusiones sobre los datos de una distribución espacial (Goodchild & Haining, 2005). De forma que los datos deben cumplir los criterios de homogeneidad y representatividad del fenómeno que se vaya a estudiar, con el fin de que puedan ser utilizados, por ejemplo, para la elaboración de mapas temáticos mediante técnicas de interpolación espacial (Olmo, 2005). Desde el punto de vista temático, el análisis espacial se integra con los SIG con base en una serie de técnicas matemáticas y estadísticas aplicadas a los datos distribuidos sobre un área de estudio (Fuenzalida et al., 2015).

Otro enfoque en la cual se puede utilizar los SIG, es para resolver problemas de planificación de energías renovables en el contexto del medio ambiente sostenible, en donde se clasifica y analiza problemas de toma de decisiones y se apoya la derivación de preferencias en ellas dentro de un marco estructurado

(Jeong & Ramírez, 2017). Así mismo, la utilización de los SIG ha supuesto un avance notable en los estudios del reconocimiento integrado del territorio con fines aplicados, por la ventaja de manejar un gran volumen de información (Montoya et al., 2004).

Las áreas de aplicación en las cuales se utilizan más los SIG, se encuentran en los estudios de protección medioambiental, la caracterización y evaluación de riesgos naturales (inundaciones, deslizamientos, degradación del suelo, etc.) y antrópicos (aguas residuales y contaminación difusa, etc.), la elaboración de modelos hidrológicos integrados (flujos superficiales y aguas subterráneas) y el análisis morfológico (Conesa, 1996).

4 ANTECEDENTES

A continuación se presentan los antecedes encontrados a nivel local, nacional e internacional ordenados de forma descendente de acuerdo al año de publicación. La información mostrada en cada uno de los trabajos desarrollados incluye tema desarrollado, autor, año y localización, además una breve descripción de la metodología utilizada y resultados obtenidos.

Tabla 1. Antecedentes

Tema	Autor-Año-Localización	Metodología	Resultados
Vulnerabilidad de fuentes hídricas superficiales de la cuenca del río Cerrito a la contaminación difusa agrícola	(Echeverri et al., 2020) Municipio de Cerrito del departamento del Valle del Cauca en Colombia.	El estudio se abordó mediante dos pilares metodológicos: Análisis Jerárquico de Procesos en ambiente de Sistemas de Información Geográfica, y la Gestión del riesgo de desastres según la concepción de UNISDR. El proceso constó de cuatro fases metodológicas: - Conceptualización del fenómeno y la identificación de los parámetros de vulnerabilidad. - Consulta de expertos para asignar pesos a cada parámetro de vulnerabilidad - Categorización y normalización dichos parámetros - Construcción del índice de vulnerabilidad para la zona de estudio (IVCDA)	Se identificaron zonificaron las zonas de estudio de acuerdo al grado de vulnerabilidad obtenido y con base en este se caracterizaron las zonas con sus respectivas características de acuerdo a los parámetros evaluados. Lo que permitió asociar tipo de cobertura, uso de agroquímicos, condiciones geográficas de la zona, entre otros de acuerdo al grado incidencia en el índice de vulnerabilidad obtenido.
“Modelamiento geoespacial gota para determinar las zonas con mayor vulnerabilidad a la inseguridad hídrica en la cuenca del río Piura”	(Alarcón, 2016) Lima, Perú	Se desarrolló la metodología GOTA (Gestión y Ordenamiento Territorial del Agua), para determinar las zonas de mayor vulnerabilidad a la inseguridad hídrica en la cuenca del Río Piura. El trabajo constó de 4 etapas: la recopilación y acondicionamiento de información, el diseño y aplicación del modelo, la calibración y validación en campo, y el análisis de los resultados finales. La información utilizada se obtuvo de dos principales fuentes, el diagnóstico final de la cuenca Chira-Piura del Programa Modernización (PMGRH) de la ANA; y la ZEE de la dirección regional de recursos naturales del gobierno regional de Piura. Para el diseño del modelo se utilizó el Índice de Pobreza Hídrica (IPH), modificado y adaptado a las condiciones y características de las cuencas hidrográficas del Perú. El modelo consto de 30 indicadores divididos en 6 Sub modelos de análisis, que son: recurso, acceso, capacidad, uso, ambiente y calidad; y el mapa final integrado. La calibración y validación en campo se realizó para el distrito piloto de Buenos Aires donde se realizó un taller de concientización participativo con las autoridades distritales y comunales.	Se determinó la zona con mayor vulnerabilidad ubicada en la parte central del Alto Piura, y zonas del Bajo Piura, en la provincia de Sechura. El distrito con mayor vulnerabilidad corresponde a Rinconada Llicuar y el de menor grado de vulnerabilidad, al de Piura. A nivel local, en el distrito de Buenos Aires, se obtuvo un diagnóstico detallado de cada indicador y una matriz FODA. El modelo GOTA sirve como una herramienta base para ayudar a una gestión integrada y participativa del recurso hídrico a través de la difusión, capacitación y concientización de la situación actual a los usuarios y autoridades pertinentes.

Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el municipio de Funza, Cundinamarca.	(Buitrago, 2015) Municipio de Funza del departamento de Cundinamarca en Colombia	Se determinó la vulnerabilidad de los acuíferos del municipio de Funza, a partir de la metodología de GOD y DRASTIC. El proceso se compuso de tres fases: Fase exploratoria situacional: búsqueda de información, recopilada de entidades públicas o privadas, relacionada con temas ambientales, geológicos e hidrogeológicos. Ejecución de trabajos de campo: obtención de lista de las posibles fuentes contaminantes identificadas tanto en campo como en fuentes de información. Evaluación y presentación de los resultados: se identificaron los escenarios de riego y se elaboró un mapa de vulnerabilidad con base en la información hidrogeológica recopilada.	El mapa de vulnerabilidad presentado fue el de la metodología GOD, ya que con la metodología DRASTIC se requiere una gran cantidad de información que no necesariamente genera el escenario más cercano a la realidad. Aunque la metodología GOD fue la que se seleccionó, esta presenta un gran inconveniente al no considerar el tipo de suelo, establecido como un parámetro relevante para determinar la vulnerabilidad. Los mapas obtenidos, presentaron el grado de vulnerabilidad de cada acuífero indicado por la clasificación según el índice (despreciable, media, alta).
Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México	(Bautista et al., 2014) México	Se determinó el balance hídrico y las cargas de contaminantes por actividades agrícolas en la subcuenca del lago de Chapala mediante la herramienta de evaluación de agua y suelo SWAT (2012). Se configuró el modelo con datos de altimetría, con información del tipo de suelo (incorporando los resultados de análisis de laboratorio en cada horizonte) y uso del suelo y vegetación por medio de datos de sensores remotos y con el programa Explorafor, así como con las bases de datos climáticas obtenidas del programa EricIII-CONAGUA. Se estructuró un concentrado de fertilizantes y plaguicidas que se utilizan en la subcuenca de Chapala derivadas de 550 encuestas que se aplicaron a los productores agrícolas. Y se realizó la simulación con el modelo SWAT se realizó de 1999 a 2001.	El balance hídrico de la subcuenca del Lago de Chapala resultó negativo durante todos los meses del año. La evapotranspiración tuvo valores 300 veces mayores a la precipitación. La simulación en la primera última década del siglo XXI presentó coincidencias entre el escurrimiento y fluctuaciones ambientales en el Lago de Chapala, además de mostrar una tendencia a la disminución de los escurrimientos dentro de la subcuenca. En cuanto a los fertilizantes que se dispersan por contaminación difusa, muestra una gran cantidad de nutrientes que se desplazan por los cuerpos de agua lo que se puede relacionar con el uso excesivo y poco eficiente de los fertilizantes. Con base en la concentración del nitrógeno y el fósforo no se presentaron problemas relacionados con este estado, debido a la gran cantidad de sedimentos en suspensión. Los herbicidas, plaguicidas y pesticidas presentaron una aplicación sin un control adecuado. Los modelos tipo SWAT son perfectibles en la medida que se conjunte e implemente más información. Adicionalmente, dan pauta a la implementación de medidas de manejo y control de los contaminantes creando escenarios para la conservación y restauración de los recursos naturales.

Zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en el distrito capital por el método DRASTIC	(Cujabán, 2013) Distrito capital, Bogotá	Se determinó la vulnerabilidad general a la contaminación del agua subterránea por medio del método DRASTIC, el cual se generó a través de la información de las características intrínsecas del acuífero y la información de siete variables (profundidad del agua subterránea, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, impacto en el acuífero, naturaleza de la zona no saturada y conductividad hidráulica) que se analizaron con datos recopilados del área de estudio. Adicionalmente la metodología permitió clasificar el tipo de contaminante a evaluar (pesticida, no pesticida), lo que llevo a una mejor aproximación de la realidad para definir las zonas de mayor vulnerabilidad a la contaminación.	Se obtuvieron dos mapas de vulnerabilidad para la temporada de alta y baja precipitación. En cada uno se obtuvo la vulnerabilidad representada en tres grados (Muy baja, baja y moderada). Los resultados obtenidos mostraron que a nivel regional existe una vulnerabilidad moderada en el Distrito Capital. La vulnerabilidad más baja, se presentó en la zona industrial, lo que tradujo que el acuífero se encuentra protegido por barreras Naturales. La metodología utilizada es muy sensible a los cambios a mediano plazo, de las variaciones en el régimen hídrico o alteraciones sustanciales en el nivel freático. La vulnerabilidad general sirve para la planificación regional del recurso hídrico subterráneo, pero si se adiciona al estudio la carga contaminante se obtendría el mapa de riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas. Los resultados obtenidos para las dos temporadas de precipitación, tienen un comportamiento significativamente similar, por lo cual se podría promediar y obtener un solo mapa de vulnerabilidad a la contaminación en el Distrito Capital.
Contaminación potencial difusa por actividad agrícola	(Cotler & Iura, 2010) México	Se construyó un modelo jerárquico multicriterio para inferir la contaminación potencial difusa en todas las cuencas de México, ocasionada por la aplicación de agroquímicos en las áreas agrícolas. El modelo está compuesto por tres sub-modelos: Insumos contaminantes: pesticidas y fertilizantes Caracterización de agricultura: agricultura de temporal, agricultura de riego y área agrícola/superficie total Movilidad de contaminantes: pendiente y textura del suelo	Se obtuvo un mapa clasificado de contaminación potencial difusa por actividad agrícola, con ello se pudo establecer que los valores muy altos de contaminación difusa se presentaron en los siguientes casos: cuencas con grandes extensiones agrícolas (45-60%) de su superficie, de la cual el 35-55% del territorio de cada cuenca utilizaban fertilizantes químicos o el caso contrario en donde la zona agrícola de la cuenca es menor (15-30%), pero la aplicación de pesticidas abarcó más del 65% de su respectiva área agrícola.

Evaluación a escala regional de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México	(Pérez et al., 2004) México	Se determinó la vulnerabilidad del agua subterránea a los contaminantes por medio de un índice de vulnerabilidad intrínseca usando la metodología DRASTIC. Para calcular el índice se estandarizaron siete parámetros hidrogeológicos con valores del 1 al 10 y se multiplicaron por un ponderador. Se clasificó una imagen satelital proveniente del sensor ETM+ disponible en el proyecto CIRCA – NASA para la obtención de las diversas clases de cobertura y uso del suelo. Finalmente, se obtuvieron las isolíneas correspondientes a la clasificación del índice DRASTIC y se sobrepusieron a la imagen clasificada de coberturas y uso de suelo.	Los valores obtenidos mediante la metodología empleada variaron de 158 hasta 208 puntos, indicando que la zona de Yucatán se encuentra en la clasificación de vulnerabilidad de moderada a extrema, por lo cual presenta la característica altamente vulnerable. El mapa de coberturas y uso de suelo, muestra que el 62.9% se clasifica como agricultura y selva baja siendo la mayor extensión y la menor con el 1.3% a los humedales. El resultado de la integración de ambos mapas muestra la necesidad de intervención inmediata en zonas ganaderas de extrema vulnerabilidad y de zonas urbanas de alta vulnerabilidad.
Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Mercedes en el área metropolitana de la ciudad de Paysandú – comparación de los métodos GOD y DRASTIC	(Xavier et al., 2004) Ciudad de Paysandú en Uruguay	Se evaluó la vulnerabilidad del acuífero poroso en los alrededores de la Ciudad de Paysandú en Uruguay mediante los métodos GOD y DRASTIC. En el primer método intervienen parámetros y características intrínsecas del sistema acuífero; en el segundo intervienen además parámetros externos como recarga, topografía e impacto de la zona no saturada.	Como resultado de la aplicación de ambos métodos se obtuvo dos mapas de vulnerabilidad, que permitieron visualizar las regiones más sensibles a la contaminación, se obtuvieron tres zonas vulnerables distintas: Muy baja, Baja y Moderada, ambos sistemas con distribuciones geográficas similares. Por consiguiente, en comparación de los resultados obtenidos mediante ambas metodologías, se infiere que para una etapa de estudio preliminar y con información a escala regional la aplicación del método GOD resulta más efectiva en cuanto a la menor necesidad de información específica y mayor rapidez en el resultado final, mientras que para etapas posteriores de trabajo, el sistema DRASTIC resulta más eficaz por el marco de detalle que necesita.

Con base en la información anterior se observa que, aunque se han desarrollado temas relacionados con la contaminación de las fuentes hídricas, la mayoría de estas investigaciones han desarrollado modelos que están encaminados a la evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas. Por lo cual, actualmente tanto a nivel departamental como nacional, el tema de la evaluación de la contaminación de las fuentes hídricas para aguas superficiales no se ha desarrollado de forma considerable, pese a la importancia que este tipo de investigaciones representa para el uso adecuado de los recursos hídricos.

5 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estimar la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola en la subzona hidrográfica Guachal, Valle del Cauca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mapear la distribución espacial de los parámetros de vulnerabilidad de las fuentes hídricas a la contaminación de origen agrícola en la SZH Guachal.

Estimar el Índice de Vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola en la SZH Guachal.

Zonificar la SZH Guachal de acuerdo con la vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola.

6 METODOLOGÍA

6.1 LOCALIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio (subzona hidrográfica Guachal) se localiza en el departamento del Valle del Cauca conformada por los municipios de Pradera, Candelaria y Florida; con una superficie un poco menor al área correspondiente de cada municipio, y el municipio de Palmira, cuya superficie es una mínima parte del área del municipio. Guachal, es una cuenca de cuarto orden localizada con punto de referencia (longitud 3,399467 y latitud -76,251972), con un área aproximada de 116,281 ha. Está compuesta por el río Guachal, que nace de la confluencia de los ríos Bolo y Fraile, y desemboca en la margen derecha del río Cauca (CVC, 2017) (Figura 2).

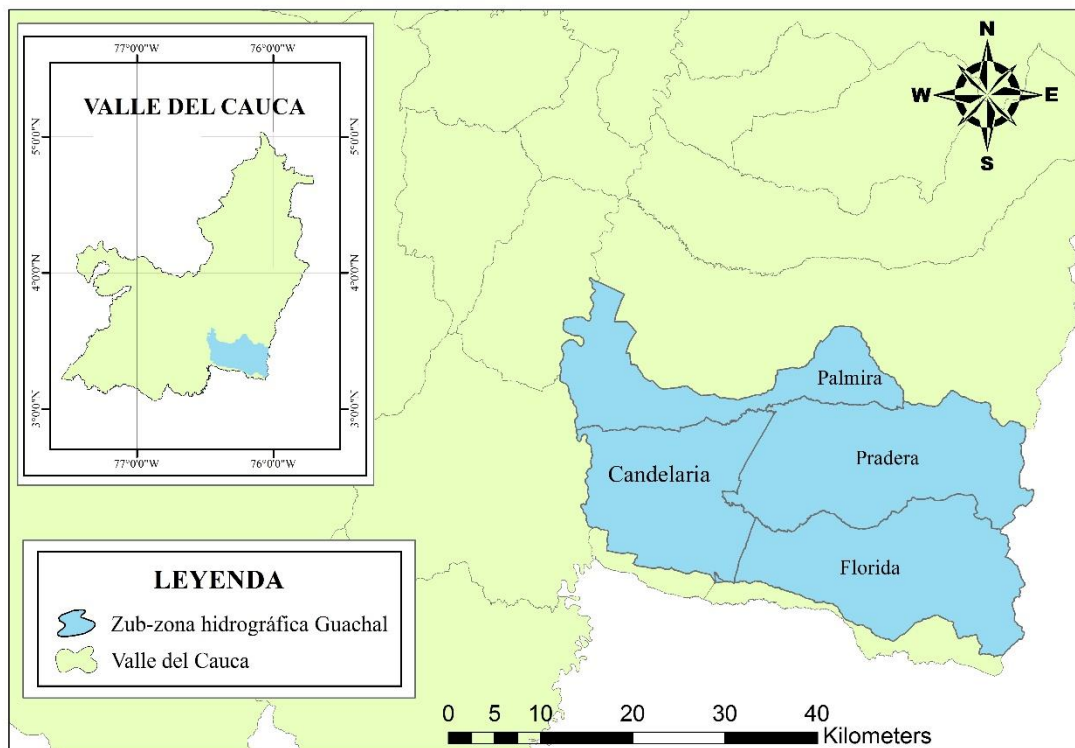


Figura 2. Localización de la zona de estudio

6.2 ENFOQUE METODOLÓGICO

El enfoque metodológico se basó en el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Análisis Espacial Multicriterio (AEMC), teniendo como base los parámetros sobre gestión del riesgo de desastres y fenómenos amenazantes contemplados por el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD).

6.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE VULNERABILIDAD

Para realizar el AEMC se establecieron los parámetros espaciales que permitieron desarrollar la valoración de la vulnerabilidad por contaminación difusa en la zona de estudio a través de SIG. De modo

que se determinaron aquellas variables potenciales como soluciones al problema, con base en la metodología del AHP realizada por Echeverri et al, (2020), donde se construyó la ecuación para determinar el Índice de Vulnerabilidad por Contaminación Difusa de uso Agrícola (IVCDA) y, se tuvieron en cuenta los valores normalizados asignados para cada parámetro. La ecuación que se utilizó (ecuación 1) indica los factores más relevantes para inferir en el comportamiento de este proceso en la SZH Guachal. Este proceso se llevó a cabo una vez se obtuvieron los valores normalizados de los parámetros a desarrollar, ya que es necesario homogeneizarlos con la finalidad de hacerlos comparables.

$$IVCDA = (0,23CUS) + (0,065EAF) + (0,065EAP) + (0,115Pr) + (0,108DCCH) + (0,106FAA) + (0,095EAAR) + (0,089PT) + (0,066GE) + (0,061TS) \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

IVCDA: Índice de vulnerabilidad de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola.

CUS: Valor normalizado Cobertura y uso del suelo

EAF: Valor normalizado Eficiencia de aplicación de fertilizantes

EAP: Valor normalizado Eficiencia de aplicación de pesticidas

Pr: Valor normalizado Precipitación

DCCH: Valor normalizado Distancia de los cultivos a los cuerpos hídricos

FAA: Valor normalizado Fraccionamiento de aplicación de agroquímicos

EAAR: Valor normalizado Eficiencia de la aplicación del agua de riego

PT: Valor normalizado Pendiente del terreno

GE: Valor normalizado Grado de erosión

TS: Valor normalizado Textura del suelo

6.4 CATEGORIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN

Para establecer la categorización y normalización de los parámetros representativos en la determinación de la vulnerabilidad de la SZH Guachal, se siguió la metodología desarrollada por Echeverri et al. (2020). En la Tabla 2 se indica la categorización y la normalización de cada parámetro.

Tabla 2. Categorización y normalización de los parámetros

PARAMETRO	CATEGORIA	VALOR NORMALIZADO
Cobertura y uso del suelo	1 Bosques naturales	0,1
	2 Bosques Mixtos y Bosque de guadua	0,2
	3 Herbazal, Arbustos, Pasto cultivado y cultivos comerciales	0,3
	4 Pastos naturales	0,4

PARAMETRO	CATEGORIA	VALOR NORMALIZADO
	5 Sistemas agroforestales y cultivos asociados	0,5
	6 Frutales y cultivos perennes	0,6
	7 Cultivos limpios	0,7
	8 Zonas Urbanas continuas, zonas urbanas discontinuas, otras superficies con construcción	0,8
	9 Áreas quemadas	0,9
	10 Áreas naturales desnudas, afloramientos rocosos	1
Eficiencia de aplicación de fertilizantes	1 Ahoyado localizado	0,148
	2 Fertirrigación	0.29
	3 Fertirrigación manual	0,432
	4 Foliar	0,574
	5 Chorrillo en banda y Corona	0,716
	6 Voleo manual	0,858
	7 Aspersión con avionetas	1
	8 Fertilización edáfica	0,361
Eficiencia de aplicación de herbicidas, plaguicidas y fungicidas	1 Aspersión foliar con máquina de fumigación	0,2
	2 Aspersión foliar con bomba a presión constante	0,4
	3 Aspersión foliar con bomba manual	0,6

PARAMETRO	CATEGORIA	VALOR NORMALIZADO
	4 Aplicación manual sin bomba	0,8
	5 Aspersión con avionetas	1
Precipitación	1 menor a 1000 mm/año	0,25
	2 entre 1000 – 1500 mm/año	0,5
	3 entre 1500- 2500 mm/año	0,75
	4 mayor a 2500 mm/año	1
Distancia a los cuerpos hídricos superficiales	1 menor a 500 m	1
	2 entre 500 y 2000 m	0,75
	3 entre 2000 y 5000 m	0,5
	4 mayor a 5000 m	0,25
Fraccionamiento de aplicación de fertilizantes	1 Se realiza una sola aplicación de fertilizantes por ciclo de cultivo	1
	2 Cuando se realizan al menos dos aplicaciones	0,66
	3 Cuando se hacen 3 o más aplicaciones	0,33
Eficiencia aplicación agua de riego	1 No aplica riego	0,148
	2 Riego localizado con programación de aplicación	0.29
	3 Riego localizado sin programación de aplicación	0,432
	4 Riego por aspersión con programación de aplicación	0,574
	5 Riego por aspersión sin programación de aplicación	0,716

PARAMETRO	CATEGORIA	VALOR NORMALIZADO
	6 Riego por superficie con programación de aplicación	0,858
	7 Riego por superficie sin programación de aplicación	1
Pendiente del terreno	1 0 – 3 %. Relieve plano	0,148
	2 3 – 7%. Relieve ligeramente inclinado	0,29
	3 7 – 12%. Relieve inclinado	0,432
	4 12 – 25%. Relieve fuertemente inclinado	0,574
	5 25 – 50%. Fuertemente quebrado	0,716
	6 50 – 75%. Relieve escarpado	0,858
	7 Mayor a 75%. Relieve muy escarpado	1
Grado de erosión	1 Natural	0,2
	2 Ligera	0,4
	3 Moderada	0,6
	4 Severa	0,8
	5 Muy severa	1
Textura del suelo	1 Texturas pesadas: arcillosa	0,33
	2 Texturas medias: arcillo-limosa, arcillo-arenosa, franca, franco-arcillosa, franco-arcillo-arenosa, franco-arcillo-limosa, franco	0,66
	3 Texturas livianas: franco-arenosa, arenosa, limosa, franco-limosa	1

Fuente: Datos tomados (Echeverri et al., 2020).

6.4.1 COBERTURA Y USO DE SUELO

El proceso llevado a cabo para la obtención del mapa de cobertura y uso del suelo fue con base en la metodología CorineLandCover (CLC) que según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) permite describir, caracterizar y clasificar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes satelitales Landsat 8 para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas (Ministerio del Medio Ambiente, 2010). En la Figura 3 se detalla el respectivo procedimiento.

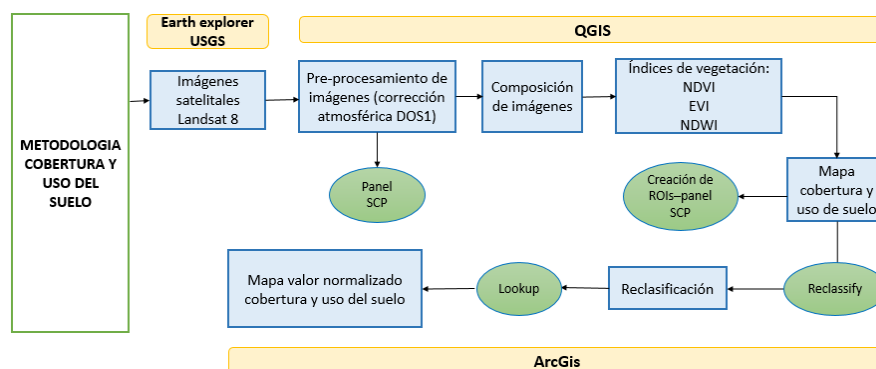


Figura 3. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de cobertura y uso de suelo.

Se seleccionaron y descargaron imágenes satelitales del servicio geológico de Estados Unidos (USGS) que se utilizaron para clasificar la cobertura vegetal y uso del suelo. Como criterio de selección de las imágenes se tuvo en cuenta que el porcentaje de nubosidad en la zona de estudio fuera menor al 30%, una resolución espacial de 30 m y al menos 5 bandas espectrales (Azul, Verde, Roja, Borde rojo e Infrarrojo cercano). Ya que ninguna de las imágenes disponibles presentaba un adecuado índice de nubosidad, se seleccionaron dos imágenes satelitales con el objetivo de realizar un mosaico y complementar el área total de estudio, para no presentar desfase en la temporalidad de adquisición se seleccionaron las imágenes del mes de julio y septiembre del año 2019 del satélite Landsat 8.

Posteriormente se aplicó la corrección atmosférica DOS1 haciendo uso del complemento Semi automatic classification del software QGIS 3.8.3 para reducir el efecto de la dispersión de la energía electromagnética producido por las partículas de agua suspendidas en la atmosfera. Se recortó cada imagen satelital (julio y septiembre) con su área correspondiente para la composición final de la imagen. En el mosaico, el mes de julio correspondió a la totalidad de la parte baja de la zona de estudio abarcando aproximadamente un 80%, por el contrario, la imagen del mes de septiembre correspondió a la parte alta de la SZH Guachal (Figura 4).

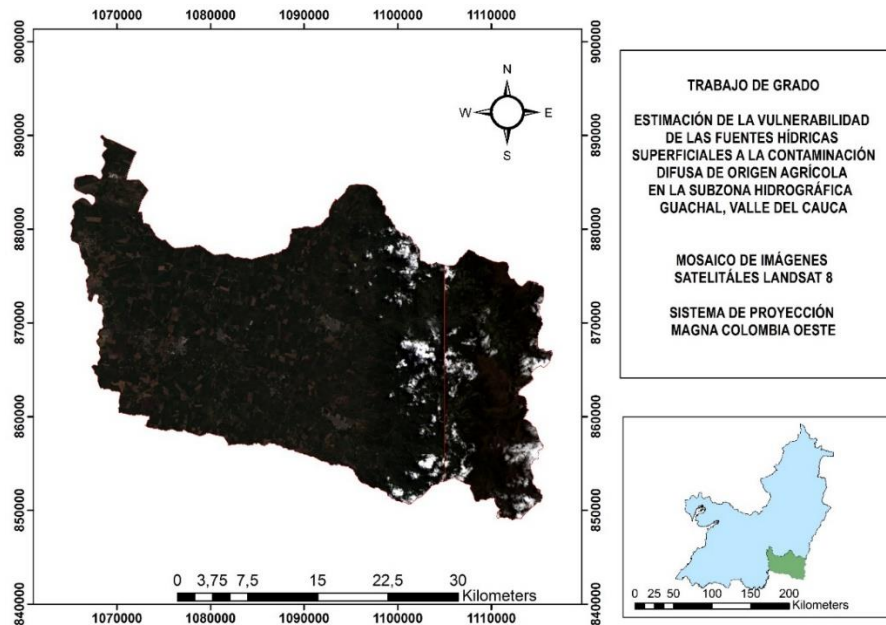


Figura 4. Composición de imágenes satelitales Landsat 8 del mes de julio (izquierda) y mes de septiembre (derecha)

Una vez obtenido el mosaico se calcularon algunos índices de vegetación como el NDVI, EVI y NDWI con la finalidad de que estos visualmente contribuyeran a la clasificación de las coberturas. Los índices NDVI y EVI permitieron distinguir el estado de la vegetación identificando las zonas en ausencia de ésta mientras que, el índice NDWI permitió distinguir los cuerpos de agua (Figuras 5,6 y 7).

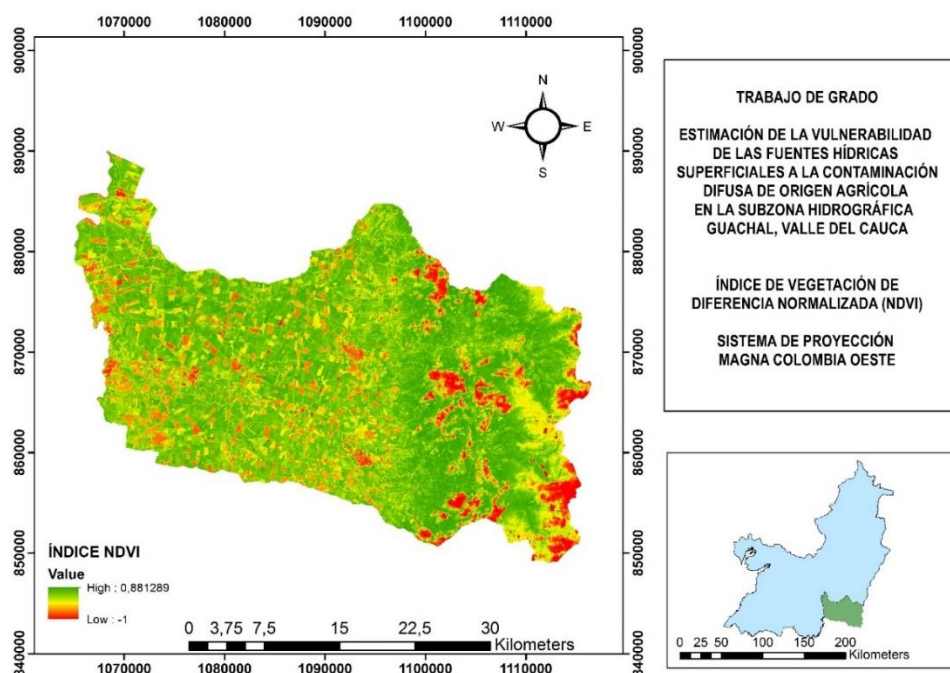


Figura 5. El índice NDVI, indica que las zonas en color verde se asocian con densidades altas de vegetación, y las de color rojo son zonas con vegetación escasa o cuerpos de agua.

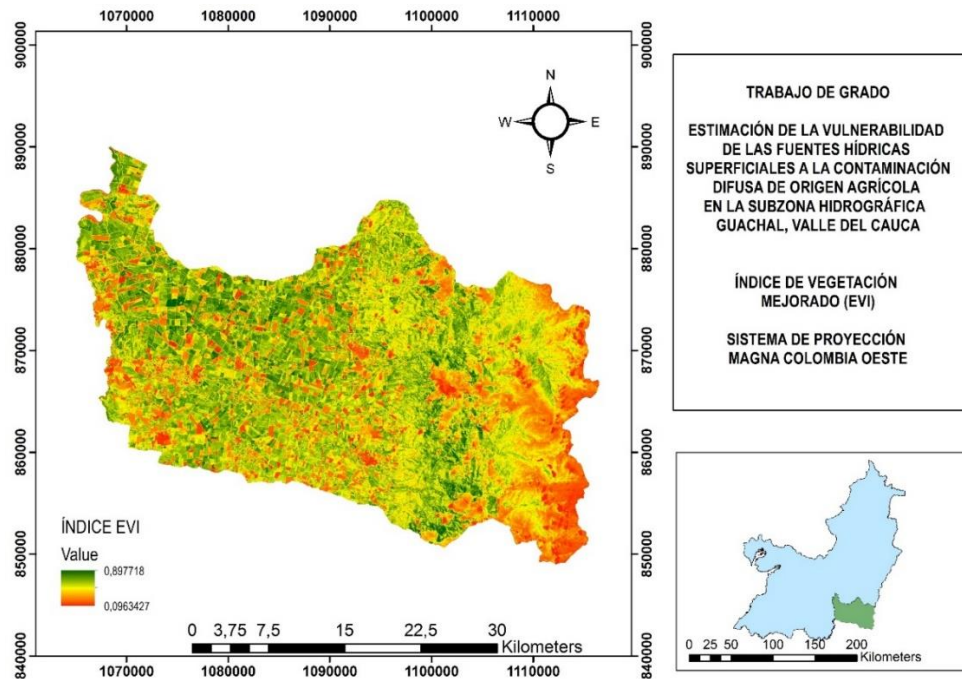


Figura 6. El índice EVI de forma similar que el NDVI muestran que entre más verde sea la zona, se asocia con vegetaciones de gran biomasa.

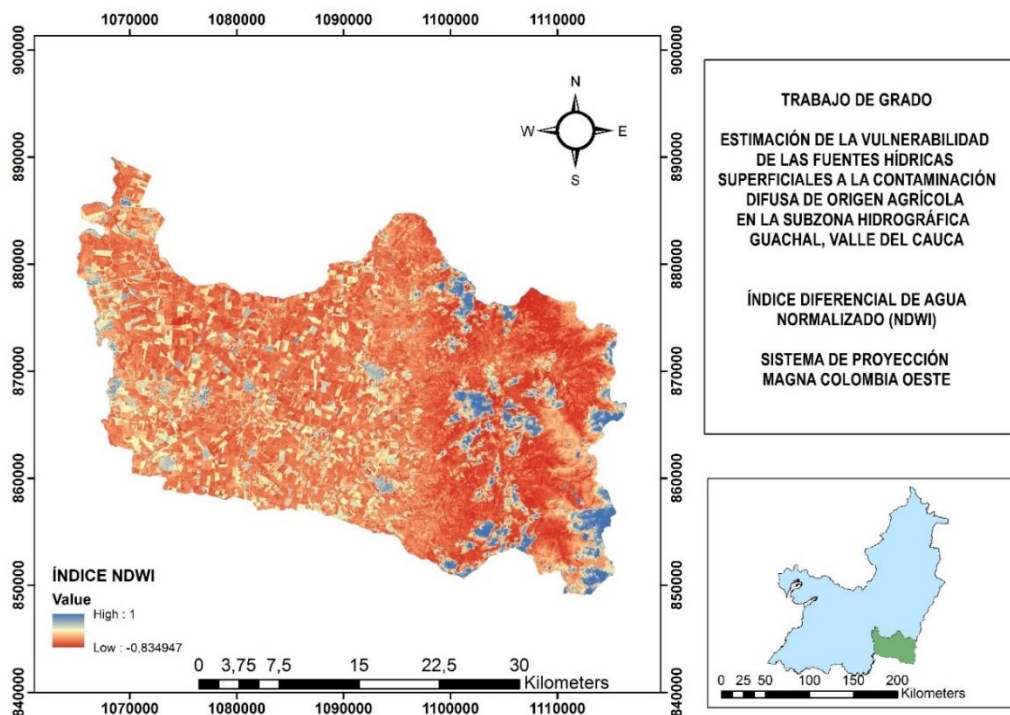


Figura 7. El índice NDWI discrimina los cuerpos de agua con color azul y la vigorosidad de la vegetación se observa en colores rojos.

Se determinaron las coberturas y uso del suelo con el panel SCP en donde se crearon ROIs o áreas de entrenamiento utilizadas para la definición de firmas espectrales características de las coberturas del suelo, por lo cual, entre más áreas de entrenamiento se tuvieran, el mapa de coberturas resultante sería mucho más preciso. Una vez se procesó el algoritmo, el mapa de coberturas obtenido previamente se

comparó con el mapa base de coberturas dispuesto en la página de la CVC para el año 2019 (Figura 8). De ésta forma fue posible ajustar la cantidad de áreas de entrenamiento para que el mapa final de coberturas vegetales se contrastara con la realidad. Además, se verificó que la información sobre el tipo de coberturas obtenido con los índices de vegetación correspondiera con el mapa de coberturas generado.

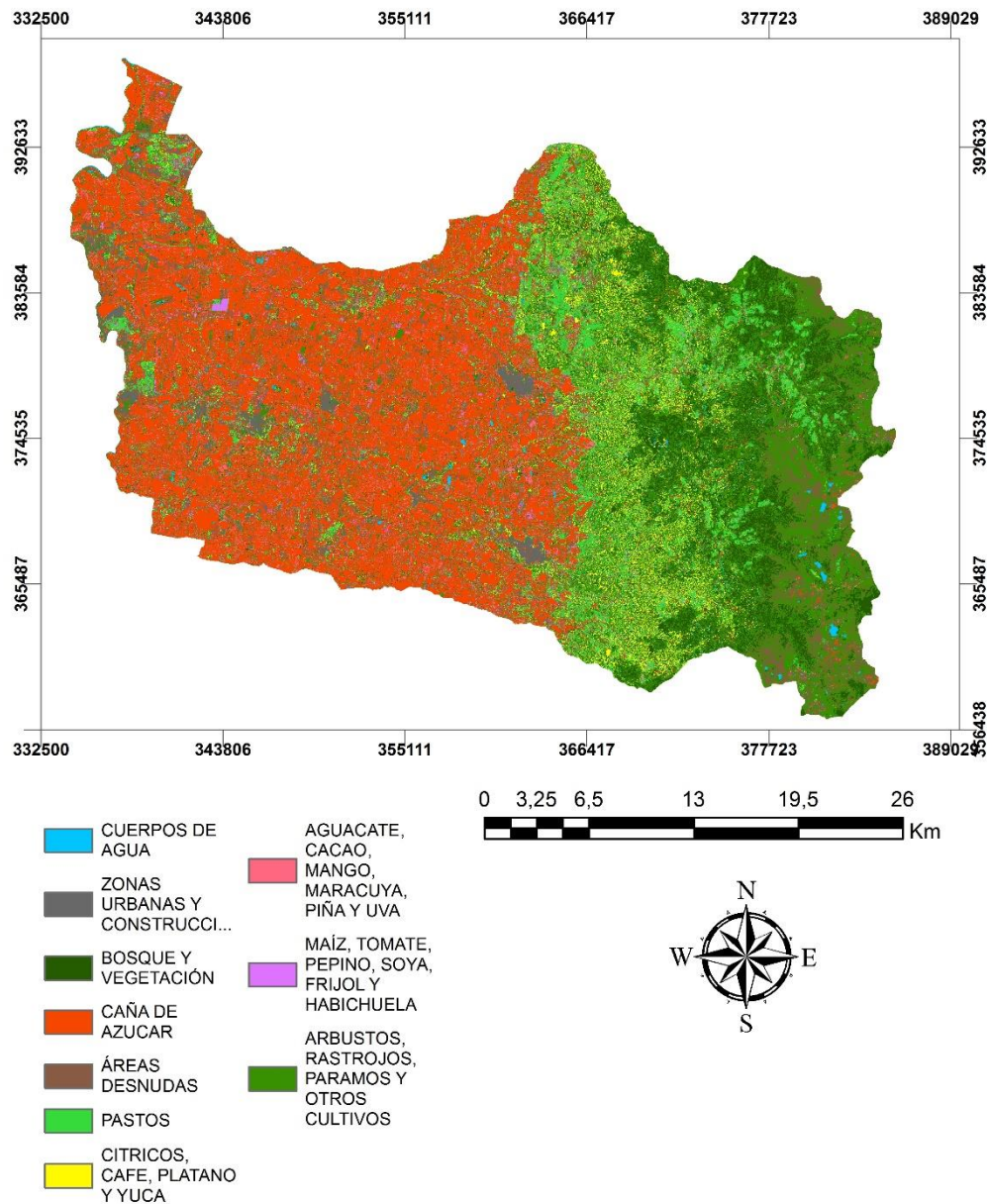


Figura 8. Cobertura y uso del suelo en la subzona hidrográfica Guachal.

Por último, se reclasificaron las distintas coberturas vegetales con el objetivo de asociar a cada una de ellas el valor normalizado correspondiente (Tabla 2). Este proceso se realizó haciendo uso del software ArcGIS 10.5.

6.4.2 PRECIPITACIÓN

El mapa de precipitación media anual (mm) se obtuvo a partir de los datos mensuales multianuales de 41 estaciones (meteorológicas, climáticas, pluviométricas y pluviográficas) distribuidas en el área de interés. El proceso llevado a cabo se describe en la Figura 9.

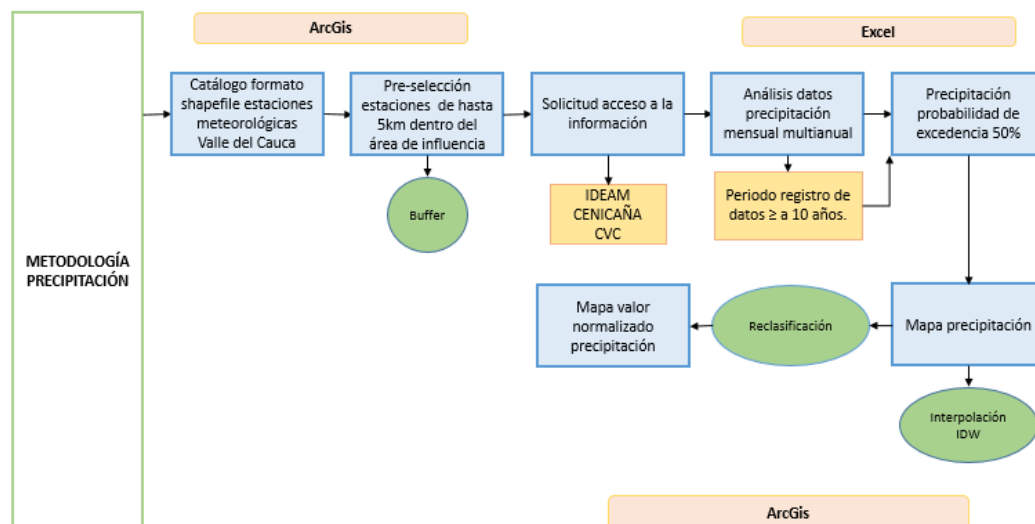


Figura 9. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de precipitación.

Con base en el catálogo de estaciones del Valle del Cauca en formato shapefile y mediante herramientas de geoprocetamiento en ArcGIS 10.5, se creó un polígono con un radio de 5 km del área de influencia de estudio con la herramienta *Buffer*, con el fin de aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los datos del mapa resultante. Se preseleccionaron 71 estaciones y se solicitó el acceso a la información al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y el Centro de Investigación de La Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA).

Para realizar la selección final se tuvo en cuenta que los datos históricos tuvieran un periodo mayor o igual a 10 años. La preparación inicial de los datos se realizó de acuerdo al método desarrollado por la FAO (Food and Agriculture Organization), en la cual se organizaron de mayor a menor los datos mensuales multianuales con el fin de representar la probabilidad de excedencia (Álvarez et al., 2006) mediante la ecuación de Weibull, el cual es un término medio con una mejor justificación estadística (Castro, 2004), se trabajó con una probabilidad de excedencia del 50% para la zona del Valle del Cauca. Debido a la no normalidad de la muestra de datos se realizaron pruebas no paramétricas, por lo tanto, para la información de precipitación anual se usó el método de interpolación IDW. De acuerdo a las categorías y valores normalizados en la Tabla 2, se generó un mapa raster de isoyetas en ArcGIS 10.5, que permitieron analizar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación.

6.4.3 PENDIENTE DEL TERRENO

El procedimiento para determinar la pendiente de la zona de estudio (Figura 10), se realizó con el software ArcGIS 10.5. En este caso, a partir del mapa del Modelo Digital de Elevación de la zona (DEM) facilitado por CVC, se aplicó la herramienta *Slope* y se obtuvo un mapa raster de pendientes en porcentaje. De acuerdo a la categorización y valores normalizados de la Tabla 2, se aplicó la herramienta *Reclassify* y, finalmente, la herramienta *Lookup* en donde se obtuvo el mapa normalizado de pendiente

del

terreno.

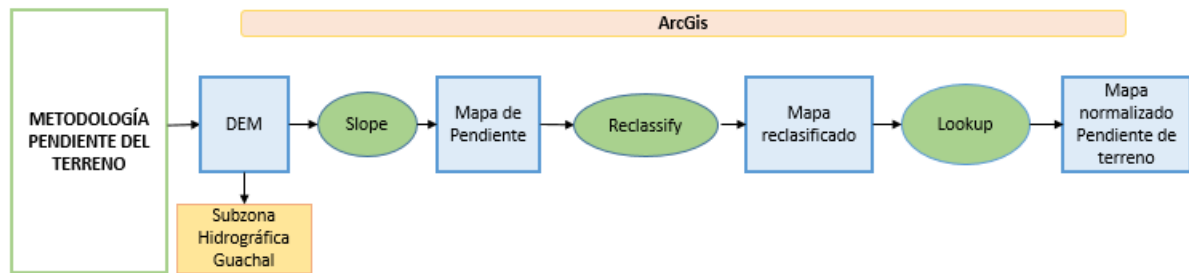


Figura 10. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de pendiente del terreno.

6.4.4 DISTANCIA DE CULTIVOS A CUERPOS HÍDRICOS

Con herramientas para dibujar cauces en el software ArcGIS 10.5 se elaboró la Red Hídrica Superficial (RHS) de la SZH Guachal. Primeramente, a la capa raster del DEM se aplicó la herramienta *Fill*; para rellenar posibles huecos. Seguido, a la capa de salida se aplicó *Flow direction*; para almacenar la dirección del flujo de acuerdo a las cotas respectivas, luego se aplicó *Flow accumulation*; donde se generó una capa de puntos que reciben el flujo, es decir, los cauces. Con *Raster calculator* se creó un condicional que obtuviera las celdas que tuvieran más de 500,000 aportes a partir de la capa Accumulation para obtener los cauces principales. De ahí se creó una capa vectorial del flujo de los cauces con el uso de la herramienta *Stream to feature* y se obtuvo la RHS. Se discriminó el mapa de cobertura vegetal y uso del suelo debido a que los pixeles de cuerpos de agua no eran significativos.

Para realizar la rasterización de datos que ocupan un área dentro de la zona de estudio, en este caso, la distancia de cultivos a cuerpos hídricos superficiales se utilizó la herramienta de geoprocetamiento *Euclidean Distance* a partir de la capa vectorial RHS. Al mapa raster resultante, de acuerdo a la categorización y valores normalizados de la Tabla 2 se aplicó *Reclassify* y *Lookup* para obtener finalmente el mapa de valor normalizado. La metodología descrita anteriormente se expone en la Figura 11.

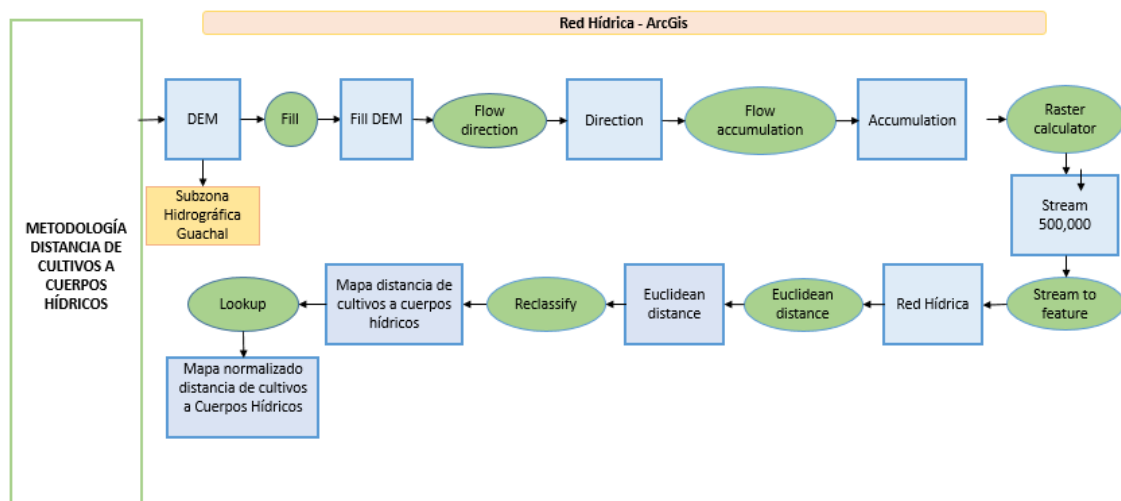


Figura 11. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de distancia de cultivos a cuerpos hídricos.

6.4.5 GRADO DE EROSIÓN

Se obtuvo el mapa de erosión proveniente de la cartografía oficial de la CVC a escala 1:25,000 de la zona de estudio para el año 2019. Posteriormente, con la información obtenida se realizó una recodificación de los atributos correspondientes al parámetro grado de erosión, con el objetivo de que todos los atributos que lo componían quedaran organizados de acuerdo a las categorías presentadas en la Tabla 2. Para esto se hizo uso de la herramienta *Reclassify* del software ArcGIS 10.5 y se asignaron los valores normalizados asociados a las categorías que componían el grado de erosión, para lo cual se utilizó la herramienta *Lookup* que permitió obtener el raster de valores normalizados correspondiente al grado de erosión (Figura 12).

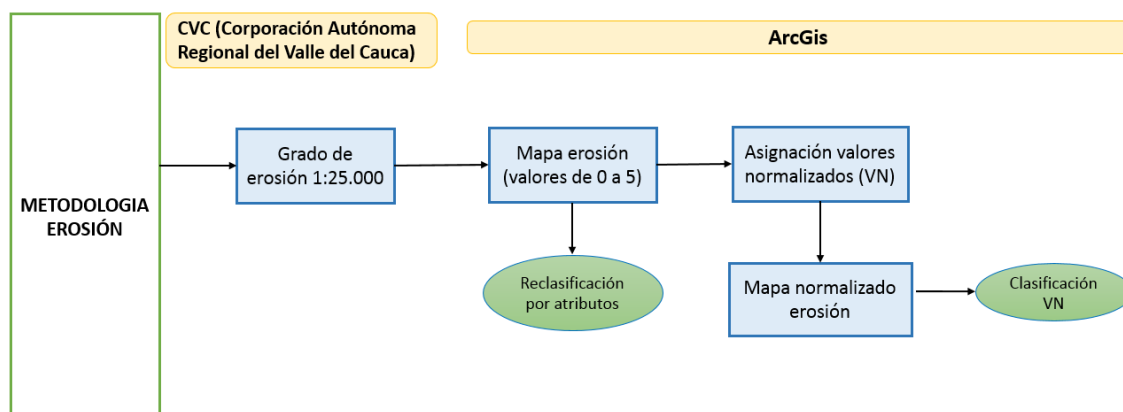


Figura 12. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de grado de erosión

6.4.6 TEXTURA DEL SUELO

La elaboración del mapa normalizado de textura del suelo para la zona plana se realizó con base en el estudio de suelos realizado por IGAC & CVC (2004) y para la zona de ladera de acuerdo con el estudio realizado por IGAC & CVC (2016) a escala 1:25.000. En la Figura 13 se muestra la metodología empleada:

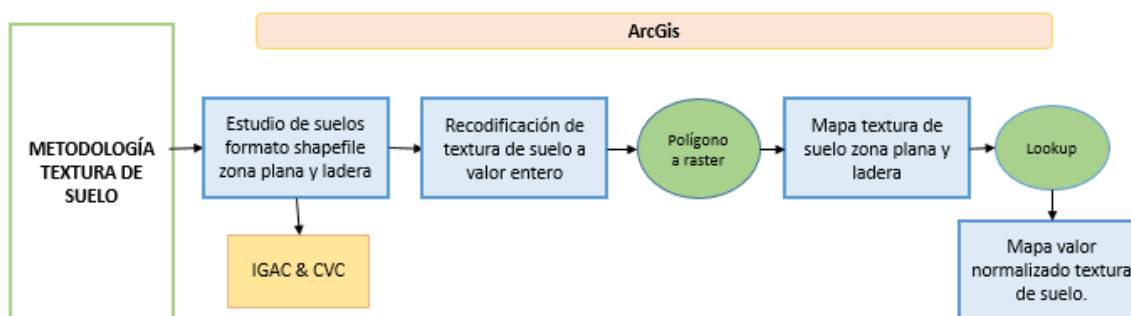


Figura 13. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de textura de suelo.

Dado que la textura se encontró clasificada en texto, se debió recodificar las texturas asignándole un valor entero de la siguiente forma; fina, moderadamente fina, muy fina (1), media (2), gruesa, moderadamente gruesa (3). Seguido, mediante la herramienta *Polygon to raster* se generó un raster en el cual se agregó una nueva columna para asignar los valores normalizados (Ver tabla 2). Finalmente, con ayuda de la herramienta *Lookup* se generó el raster final del valor normalizado de textura de suelo. La misma metodología se empleó tanto para la zona plana como la zona de ladera.

6.4.7 EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE PESTICIDAS

Con base en el mapa de Cobertura y Uso del Suelo de la SZH Guachal y, el estudio de Aproximación de Amenaza por Contaminación Difusa (Ruíz, 2019), se tomaron los datos caracterizados de eficiencia de aplicación de pesticidas que se encuentran en la Tabla 2. Para el caso de los cultivos que no se encontraron en la investigación mencionada, se recopiló la información de empresas dentro del sector y otros con base en la literatura (Figura 14).

Teniendo en cuenta que las dosis y el tipo de aplicación de los pesticidas es propio de cada cultivo y que el mapa de coberturas obtenido se encuentra clasificado por agrupación de cultivos, fue necesario aplicar una serie de ponderaciones basado en el porcentaje de participación de cada cultivo dentro de cada agrupación y determinar un valor normalizado ponderado.

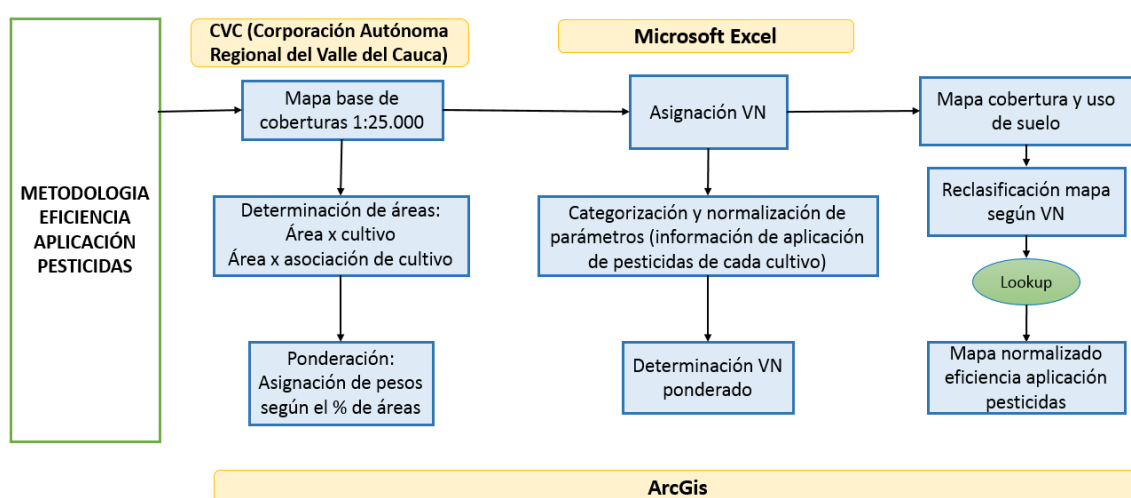


Figura 14. Proceso utilizado para la obtención del mapa normalizado de eficiencia de aplicación de pesticidas.

6.4.8 EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE FERTILIZANTES

Para determinar la eficiencia de aplicación de fertilizantes se llevó a cabo la misma metodología del procedimiento 5.3.7. Teniendo en cuenta que el cultivo predominante en el área de estudio es caña de azúcar, el método de aplicación de fertilización prominente no se encontró en el rango de categorías en la metodología planteada por Echeverri et al. (2020). Por lo tanto, se agregó una nueva categoría representada por el método de aplicación edáfico ya que se aplica directamente al suelo, su valor normalizado corresponde al promedio del valor normalizado del método de aplicación de fertirrigación y fertirrigación manual, el cual se presenta en la Tabla 2.

6.4.9 EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE AGUA DE RIEGO

Para determinar la eficiencia de aplicación de agua para riego se llevó a cabo la misma metodología del procedimiento 5.4.8.

6.4.10 FRACCIONAMIENTO DE APLICACIÓN DE FERTILIZANTES

Para determinar el fraccionamiento de aplicación de fertilizantes se llevó a cabo la misma metodología del procedimiento 5.4.8.

6.5 METODOLOGÍA DE CAPTURA DE INFORMACIÓN

De acuerdo al resultado del mapa de Cobertura y Uso del Suelo de la SZH Guachal, se identificaron 18 cultivos presentes en la zona de estudio. Con base en la metodología Ruíz (2019) y Echeverri et al. (2020), se realizó una caracterización mediante un diseño de investigación descriptiva, se recopiló información de cultivos de interés que se solicitó a gremios, empresas y asociaciones más representativas del sector agrícola en la Cuenca del Río Cerrito, Valle del Cauca. Debido a la dificultad para acceder a la información, se usaron algunos de los resultados de las encuestas realizadas para los cultivos de cítricos (naranja y limón), café, plátano, aguacate, cacao, uva, maíz, tomate, soya, frijol y habichuela, teniendo en cuenta que el manejo del cultivo, uso de agroquímicos y la duración del periodo fenológico es el mismo en el sector. Por consiguiente, en la Tabla 3 se presentan los cultivos indagados y se relaciona la fuente consultada en cada caso.

Tabla 3. Listado de gremios y asociaciones contactadas por cada cultivo (Echeverri et al., 2020)

CULTIVO		FUENTE	PERSONA	EMAIL
1	CACAO	FEDECACAO	ANTONIO RUIZ	puertotejada.unidad@gmail.com
2	CAFÉ	CENICAFE	GUILLERMO CARREÑO	Luz.P.Ramirez@cafedecolombia.com
3	PLÁTANO	ASOHOFRUCOL	JUAN CARLOS VALENCIA	asohofrucol.juanvalencia@gmail.com
4	VID			
5	CÍTRICOS			
6	AGUACATE			
7	HORTALIZAS			
8	FRIJOL	APROCOL	LUIS FELIPE BOCANEGRA	luisfelipebocanegraaprocol@gmail.com
9	SOYA			
10	MAÍZ			
		FENALCE	GUSTAVO ADOLFO LEMOS	glemos@fenalceregional.org

Sin embargo, para los cultivos de caña de azúcar, piña y maracuyá se siguió la metodología mencionada para la recopilación de la información. La información para cultivos como yuca, pepino y mango se tomó con base en la literatura. De modo que, en la Tabla 4 se presentan los cultivos indagados y se relaciona la fuente consultada en cada caso.

Tabla 4. Listado de empresas contactadas y literatura consultada por cada cultivo.

CULTIVO		FUENTE	PERSONA	CONTACTO
1	CAÑA DE AZÚCAR	CASTILLA AGRÍCOLA S.A	CARLOS ALFONSO LUCUMÍ	clucumi@agricolas.co
2	PIÑA	BENGALA AGRÍCOLA S.A.S	JUAN CARLOS ANDRADE	jandrade@bengala.com.co
3	MARACUYÁ	FERTIFRUT	JULIÁN RAMOS	(+57) 318 362 6809

CULTIVO		FUENTE
4	YUCA	(Corporación Clayuca, Fundación promotora del canal del dique, Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación de la Ciencia y la Cultura (OEI), & Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), 2005)
5	PEPINO	(Jaramillo & Patarroyo, 1976)
6	MANGO	(Ramírez & Davenport, 2012) ((Restrepo & Palacio, 2013), Salazar 1988)

6.6 ESTIMACIÓN DEL IVCDA Y ZONIFICACIÓN

Para estimar el Índice de Vulnerabilidad de las Fuentes Hídricas Superficiales a la Contaminación Difusa de Origen Agrícola, se hizo uso de la Ecuación 1 (IVCDA) (Figura 15). Para la obtención del índice se usó la herramienta *Raster Calculator* del software ArcGIS 10.5.

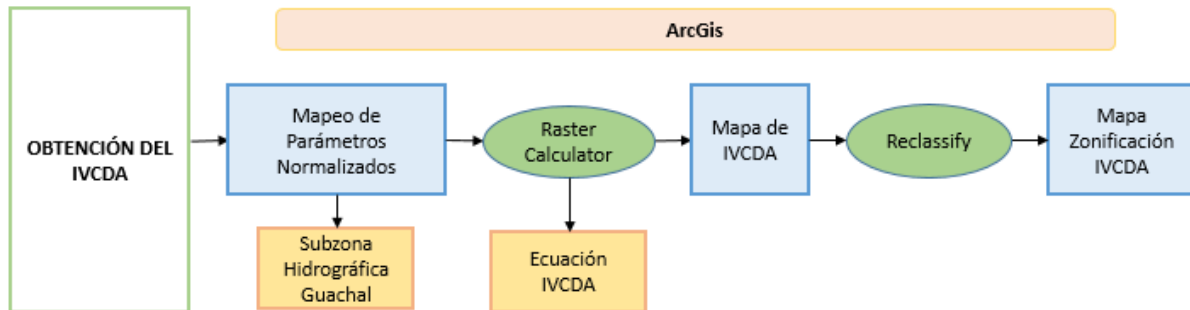


Figura 15. Obtención del IVCDA.

Una vez obtenido el mapa de IVCDA se procedió a asignar las categorías de vulnerabilidad con base en las siguientes pautas de Echeverri et al. (2020).

- IVCDA entre 0.0 y 0.2: Vulnerabilidad Muy Baja
- IVCDA entre 0.2 y 0.4: Vulnerabilidad Baja
- IVCDA entre 0.4 y 0.6: Vulnerabilidad Media
- IVCDA entre 0.6 y 0.8: Vulnerabilidad Alta
- IVCDA entre 0.8 y 1.0: Vulnerabilidad Muy Alta

7 RESULTADOS

7.1 RECOPIACIÓN INFORMACIÓN DE CULTIVOS

A continuación se presentará la información recopilada en encuestas y literatura para los 5 cultivos que no se encontraban en los resultados del grupo de investigación REGAR. Por ser el cultivo de caña de azúcar predominante en el área de estudio, se decidió realizar la encuesta ya que uno de los ingenios situados la zona permitió el acceso a la información.

7.1.1 CAÑA DE AZÚCAR

En el cultivo de caña de azúcar el grupo Castilla Agrícola S.A, compartió la información relacionada a los agroquímicos utilizados en las Tablas 5 y 6. La duración del periodo fenológico es de 12 a 13 meses. El método de riego predominante es por ventanas. Sin embargo, se usa riego por goteo, convencional, aspersión y pivote en menor medida.

Tabla 5. Fertilizantes utilizados en el cultivo de caña de azúcar.

USO DE FERTILIZANTES				
Producto	Dosis/Área	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Momento de aplicación
UREA	370 kg/Ha	Mecanizada tasa constante o variada	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 45 días después de la cosecha en socas y plantillas alrededor de los 60 días después de la siembra.
Solución líquida UAN	386.4 L/Ha	Fertirrigación manual / Mecanizada tasa constante o variada	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 45 días después de la cosecha en socas y plantillas alrededor de los 60 días después de la siembra.
Cloruro de potasio (KCL) granulado	100 - 150 kg/Ha	Mecanizada tasa constante o variada	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 45 días después de la cosecha en socas y plantillas alrededor de los 60 días después de la siembra.
Fosfato Diamónico (DAP)	50 - 100 kg/Ha	Mecanizada tasa constante o variada	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 45 días después de la cosecha en socas y plantillas alrededor de los 60 días después de la siembra.
Fosfato Monoamónico (MAP técnico)	50 kg/Ha	Mecanizada tasa constante o variada / Fertirrigación manual	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 45 días después de la cosecha en socas y plantillas alrededor de los 60 días después de la siembra.
Cloruro de potasio (KCL) estándar	150 kg/Ha	Mecanizada tasa constante o variada / Fertirrigación manual	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 45 días después de la cosecha en socas y plantillas alrededor de los 60 días después de la siembra.

Tabla 6. Pesticidas utilizados en el cultivo de caña de azúcar.

USO DE PESTICIDAS						
Producto	Dosis/Área	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Tipo de pesticida	Momento de aplicación	Objetivo
Vitavax	150 – 160 gr/Ha	Fertirrigación manual	Asesoría técnica	Fungicida	En siembra, se aplica sobre el paquete de semilla	Prevención de enfermedades
Hexazinona	400 – 600 gr/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Diurón	1.5 – 2.5 kg/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Ametrina líquida	1 – 2 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
2.4D Amina líquida	0.5 - 2 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Mesotrione	0.25 – 0.3 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Glifosato	2 – 3 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Atrazina	1 – 2.0 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses

7.1.2 PIÑA

En el cultivo de piña el grupo Bengala Agrícola S.A.S, compartió la información relacionada a los agroquímicos utilizados en las Tablas 7 y 8. La duración del periodo fenológico es de 15 meses. El método de riego es por aspersión.

Tabla 7. Fertilizantes utilizados en el cultivo de piña.

USO DE FERTILIZANTES				
Producto	Dosis/Área	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Momento de aplicación
Ácido bórico	113 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 6 ciclos.
Nitrato de Calcio	450 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	5 ciclos en preforza cada 15 días y 5 ciclos en pos inducción cada 15 días.
Magnesio	30 L/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	6 ciclos en pos inducción cada 15 días.
Zinc	17 L/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	6 ciclos en pos inducción cada 15 días.
Fosfato Monoamónico (MAP técnico)	200 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 6 ciclos.
(KCL) estándar	782 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 25 ciclos.
Sulfato de amonio	1600 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 30 ciclos.
Sulfato de cobre	29 L/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 6 ciclos.
Sulfato de magnesio	740 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 30 ciclos.
Sulfato de manganeso	98 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 30 ciclos.
Sulfato de potasio	285 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 18 ciclos.

Sulfato de zinc	116 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 30 ciclos.
Sulfato ferroso	70 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 30 ciclos.
UREA granulada	835 kg/Ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de la cosecha y se aplica periódicamente 18 ciclos.

Tabla 8. Pesticidas utilizados en el cultivo de piña.

USO DE PESTICIDAS						
Producto	Dosis/Área	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Tipo de pesticida	Momento de aplicación	Objetivo
Halosifop	2.5 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Fungicida	De acuerdo a criterio técnico	Prevención de enfermedades
Hexazinona	0.5 kg/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Diurón	2 – 2.5 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Ametrina líquida	3 – 4 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Azosistrobinc	1 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Fungicida	De acuerdo a criterio técnico	Control preventivo y curativo
Metalaxil	2.5 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Fungicida	De acuerdo a criterio técnico	Control preventivo y curativo
Mancozeb	3 L/ha	Foliar	Asesoría técnica	Fungicida	De acuerdo a criterio técnico	Control preventivo y curativo
Atrazina	3 – 4 L/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	De acuerdo a criterio técnico	Control efectivo de arvenses
Trichoderma (biológico)	1 kg/Ha	Foliar	Asesoría técnica	Fungicida	En preforza cada 15 días periódicamente hasta 18 ciclos.	Control preventivo y curativo

USO DE PESTICIDAS						
Producto	Dosis/Área	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Tipo de pesticida	Momento de aplicación	Objetivo
Malathion	4 L /ha	Foliar	Asesoría técnica	Insecticida	De acuerdo a criterio técnico	Control de thecla, sinfilidos
Pyrinex	4 L /ha	Foliar	Asesoría técnica	Insecticida	De acuerdo a criterio técnico	Control de thecla, sinfilidos
Dimethoato	4 L /ha	Foliar	Asesoría técnica	Insecticida	De acuerdo a criterio técnico	Control de thecla, sinfilidos

7.1.3 MARACUYÁ

En el cultivo de maracuyá la empresa FertiFrut, compartió la información relacionada a los agroquímicos utilizados en las Tablas 9 y 10. La duración del periodo fenológico es de 16 a 18 meses. El método de riego utilizado es localizado por manguera.

Tabla 9. Fertilizantes utilizados en el cultivo de maracuyá.

USO DE FERTILIZANTES				
Producto	Dosis/Área	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Momento de aplicación
APTIPLAN	600 cm/ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de siembra hasta el 3 mes.
BIOCEL	400 cm/ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir de los 15 días después de siembra hasta el 3 mes.
APTIPLAN	1.2 l/ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir del 3 mes cada 15 días hasta el 6 mes.
BIOCEL	800 cm/ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir del 3 mes cada 15 días hasta el 6 mes.
Calcio boro	300 cm/ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir del 1 mes cada 15 días hasta el 3 mes.

Calcio boro	800 cm/ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir del 3 mes cada 15 días hasta el 6 mes.
Molibdato	100 cm/ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir del 1 mes cada 15 días hasta el 3 mes.
Molibdato/molibdeno	300 cm/ha	Foliar	Balance / Diagnostico de suelo - planta	A partir del 3 mes cada 15 días hasta el 6 mes.

Tabla 10. Pesticidas utilizados en el cultivo de maracuyá.

USO DE PESTICIDAS						
Producto	Dosis/Área	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Tipo de pesticida	Momento de aplicación	Objetivo
Finale	1.5 L/ha	Foliar	Asesoría técnica	Herbicida	A 45 días medio de siembra y 1 vez cada mes hasta 17 – 18 mes..	Control efectivo de arvenses
Sunfire	150 cm/ha	Foliar	Asesoría técnica	Insecticida	A 10 de siembra cada 7 días hasta los 18 meses.	Control plaga Trips.
Exalt	150 cm/ha	Foliar	Asesoría técnica	Insecticida	A 10 de siembra cada 7 días hasta los 18 meses.	Control plaga Trips.
Funclofaz	200 cm/ha	Foliar	Asesoría técnica	Fungicida	Después de los 60 días control cada 10 días hasta 18 mes.	Para controlar la presencia de hongos en la planta
Antracol	400 gr/ha	Foliar	Asesoría técnica	Fungicida	Después de los 60 días control cada 10 días hasta 18 mes.	Para controlar la presencia de hongos en la planta

7.1.4 YUCA

Para el cultivo de la yuca la información correspondiente al uso de agroquímicos proviene de fuentes bibliográfica Tablas 11 y 12, en este caso la duración del periodo fenológico del cultivo es de 12 meses (Corporación Clayuca et al., 2015).

Tabla 11. Fertilizantes utilizados en el cultivo de la yuca

USO DE FERTILIZANTES				
Producto	Dosis	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Momento de aplicación
Cloruro de potasio (KCl)+Nutri 15+ Remital 17-6-18-2 + Korn Kali - B	19 gr/planta	Mezclar los fertilizantes y aplicar incorporado a chuzo y a un lado de la base	Recomendación	Entre los 45-50 días de nacido

Fuente: (Corporación Clayuca et al., 2015).

Tabla 12. Pesticidas utilizados en el cultivo de la yuca

USO DE PESTICIDAS						
Producto	Dosis	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Tipo de pesticida	Momento de aplicación	Objetivo
Karmex + lazo	(1-1,5 + 1,5-2) dosis comercial/ha	Foliar	Observación propia	Herbicida	Pre-emergente	Control de malezas
Ridomil (metalaxyl)	3 gr/1 L de agua	Aplicar a estacas infectadas	Observación propia	Fungicida	Según lo requiera	Pudrición radical por Phytophthora spp
Benlate (benomyl)	6 gr/ 1 L de agua	Sumergir estacas infectadas en la solución	Observación propia	Fungicida	Según lo requiera	Superalargamiento (Sphaceloma manihoticola)

Fuente: (Corporación Clayuca et al., 2015).

7.1.5 MANGO

Para el cultivo de mango la información del uso y dosis de agroquímicos es con base a la literatura y se encuentra en las Tablas 13 y 14. El desarrollo fenológico es de 25 años en el Valle del Cauca. El método de riego es por goteo y micro aspersión.

Tabla 13. Fertilizantes utilizados en el cultivo del mango

USO DE FERTILIZANTES				
Producto	Dosis	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Momento de aplicación
NPK 15-15-15	250 g/árbol	Radicular	Recomendación	Se aplican cada 3 meses durante el primer año
NPK 15-15-15	500 g/ árbol	Radicular	Recomendación	Se aplican cada 3 meses durante el segundo año
NPK 15-15-15	750 g/ árbol	Radicular	Recomendación	Se aplican cada 3 meses durante el tercer año

Fuente: (Ramírez & Davenport, 2012)

Tabla 14. Pesticidas utilizados en el cultivo de mango

USO DE PESTICIDAS						
Producto	Dosis	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Tipo de pesticida	Momento de aplicación	Objetivo
Malathion 57 + Proteína hidrolizada de soya o maíz	80 cc + 240 cc/20 L de agua	Foliar	Observación propia	Insecticida	Según lo requiera	Moscas de la fruta (Díptera: Tephritidae)
Dithane M-45	1,5 lb /100 gal agua	Foliar	Observación propia	Insecticida	Aplicaciones periódicas: antes de florecer, cuando se han abierto una tercera parte de las flores, frutas recién formadas, un mes después de la tercera, un mes después de la cuarta	Antracnosis

Fuente: (Restrepo Ibiza y Palacio Peláez 2013, Salazar Castro 1988)

7.1.6 PEPINO

La información que se presenta a continuación en las Tablas 15 y 16 fue el resultado de una búsqueda bibliográfica. Con base en esto, en el cultivo del pepino se encontró que la duración del periodo fenológico es de 75 a 90 días después de sembrado (Lópe, 2003).

Tabla 15. Fertilizantes utilizados en el cultivo del pepino

USO DE FERTILIZANTES				
Producto	Dosis	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Momento de aplicación
NPK 10-20-20	200-300 Kg/ha	Son colocados en banda al lado de la semilla o debajo de esta sin tocarla	Recomendación	Pre siembra o en la siembra
Urea	50 Kg/ha	Son colocados en banda al lado de la semilla o debajo de esta sin tocarla	Recomendación	Se aplica en dos tandas. La primera durante la siembra y la segunda 30 días después.

Fuente: (Jaramillo & Patarroyo, 1976)

Tabla 16. Pesticidas utilizados en el cultivo del pepino

USO DE PESTICIDAS						
Producto	Dosis	Método de aplicación	Criterio de aplicación	Tipo de pesticida	Momento de aplicación	Objetivo
Malathion 57	50 cc/20 L agua	Foliar	Observación propia	Insecticida	Según lo requiera	Gusano del fruto (Diaphania sp)
Azodrin	50 cc/20 L agua	Foliar	Observación propia	Insecticida	Según lo requiera	Comedores de hoja (Diabrotica sp)
Sevin 80	70 gr/20 L agua	Sobre el surco de la siembra cubriendo 5 a 10 cm a lado y lado de la planta	Observación propia	Insecticida	Según lo requiera	Tierreros (Agrotis ipsilon, Grillotalpa hexadactyla)
Roxion	30 cc/20 L agua	Foliar	Observación propia	Insecticida	Según lo requiera	Afidos y minador (Liriomyza sp)
Dithane M-45	40 gr/20 L agua	Foliar	Observación propia	Fungicida	Según lo requiera.	Mancha de la hoja

Fuente: (Jaramillo & Patarroyo, 1976)

7.2 MAPAS DE PARÁMETROS NORMALIZADOS

En las Figuras 16 a 25 se presentan los mapas de los valores normalizados de los parámetros de vulnerabilidad para la zona de estudio. El factor “Cobertura y Uso del Suelo” tiene valores de 0 a 1, donde los valores cercanos a 1 están localizados en la zona de ladera y agrupan los bosques naturales en muy

poca área, los de mayor foco son los asociados a bosques mixtos y guaduas con valores de 0.2, seguido de pastos naturales con valores de 0.4 y, hacia el oriente valores de 0.3 asociados a coberturas de tipo herbazal, arbustos, pasto cultivado y cultivos comerciales. La mayor área de la zona plana tiende a valores de 0.3 representado por el cultivo de caña de azúcar, en menor cantidad zonas urbanas representadas por los valores de 0.8, y frutales con valores de 0.6 (Ver Figura 16).

El factor “Grado de Erosión” tiene valores de 0 a 1, la zona plana está representada por valores de 0 la cual abarca el 56.6% del área total y, en la zona de ladera asociados a un grado de erosión natural se encuentran valores de 0.2 en un 26.8%, conforme las zonas son más altas el grado de erosión va aumentando, ligera con valores de 0.4 en un 2.8%, moderada con valores de 0.6 en un 5.2%, severa con valores de 0.8 en un 8.5% y muy severa en un 0.2% con los valores 1 (Ver Figura 17).

El factor “Distancia de cultivos a fuentes hídricas superficiales” tiene valores que oscilan entre 0.5 y 1, siendo los cultivos situados a una distancia menor de 500 m a los ríos principales con valores de 1 representando el 50.9% del área total, distancias de cultivos entre 500 a 2000 m valores de 0.75 en un 48.1% y finalmente, con tan sólo el 1.1% cultivos localizados a una distancia entre 2000 a 5000 m con valores de 0.5 (Ver Figura 18).

El factor “Pendiente del Terreno” presenta valores entre 0.148 y 0.858. En donde los valores de 0.148 corresponden a un relieve plano y acoge el 54.6% del área total. De forma que los valores más altos se localizan hacia las zonas de ladera, con relieves fuertemente inclinados de 12 – 25% asociados a valores de 0.574, fuertemente quebrados de 25 – 50% con valores de 0.716 y relieves escarpados de 50 – 75% con valores de 0.858 los cuales sólo representan el 0.6% del área total (Ver Figura 19).

El factor “Textura del suelo” oscila entre 0 y 1. Con valores de 0.66 asociados a texturas medias en las zonas de ladera y en las zonas planas la mayor parte del área presentó texturas pesadas con valores de 0,33 a excepción de algunas zonas con texturas medias y ligeras (Ver Figura 20).

El factor “Precipitación anual” presenta valores entre 0.25 y 1. Los valores de 0.75 y 1 representan precipitaciones mayores a 1500 mm/año y se localizan en la zona de ladera. Por el contrario, valores de 0.25 y 0.5 están asociados a precipitaciones menores a 1500 mm/año y se concentran en la zona plana (Ver Figura 21).

Los factores antrópicos representan en mayor proporción valores normalizados correspondientes al cultivo de caña de azúcar, pues éste abarca el 97% del área cultivable del área de estudio situada en la zona plana. El factor “Eficiencia de aplicación de fertilizantes” oscila entre valores de 0 y 0.813, los valores de 0 corresponden a las áreas no cultivables como bosques y zonas urbanas los cuales abarcan el 54.6%, valores de 0.361 están asociados a fertilización edáfica con el 34.8% y en menor proporción valores de 0.5 asociado a aplicaciones foliares y, valores de 0.813 que representan aplicaciones de voleo manual localizados en la zona de ladera (Ver Figura 22).

El factor “Eficiencia de aplicación de pesticidas” oscila entre valores de 0 y 0.6, como en el caso anterior los valores de 0 se asocian a las áreas no cultivadas y zonas urbanas, en la zona plana se concentran los valores de 0.4 con aplicaciones foliares con bomba a presión constante, y en la zona de ladera se concentran los valores de 0.6 con aplicaciones foliares con bomba manual (Ver Figura 23).

El factor “Eficiencia de aplicación de agua para riego” oscila entre valores de 0 y 0.858, como en el caso anterior los valores de 0 se asocian a las áreas no cultivadas y zonas urbanas, en la zona plana se concentran valores de 0.858 que representa el riego por superficie con programación de aplicación

asociado al cultivo de caña de azúcar, los frutales representan valores de 0.23 con riego localizado el cual se aplica en la zona plana pero con más concentración en la zona de ladera y, valores de 0.55 que representan riego por aspersión (Ver Figura 24).

Finalmente, el factor “Fraccionamiento de aplicación de fertilizantes” oscila entre valores de 0 y 0.399, como en el caso anterior los valores de 0 se asocian a las áreas no cultivadas y zonas urbanas, sin embargo, para este caso la mayoría de los cultivos representan los valores entre 0.33 y 0.399 los cuales están asociados a más de tres dosis de aplicación de fertilizantes (Ver Figura 25).

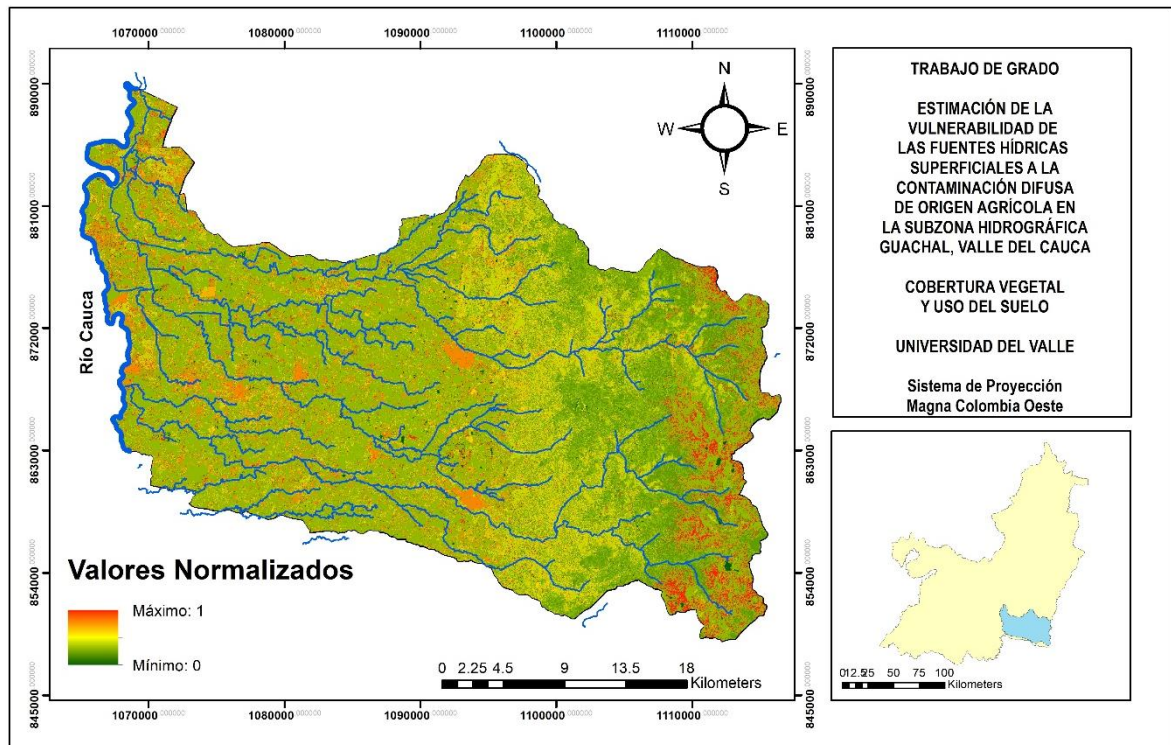


Figura 16. Mapa de valores normalizados de cobertura y uso del suelo.

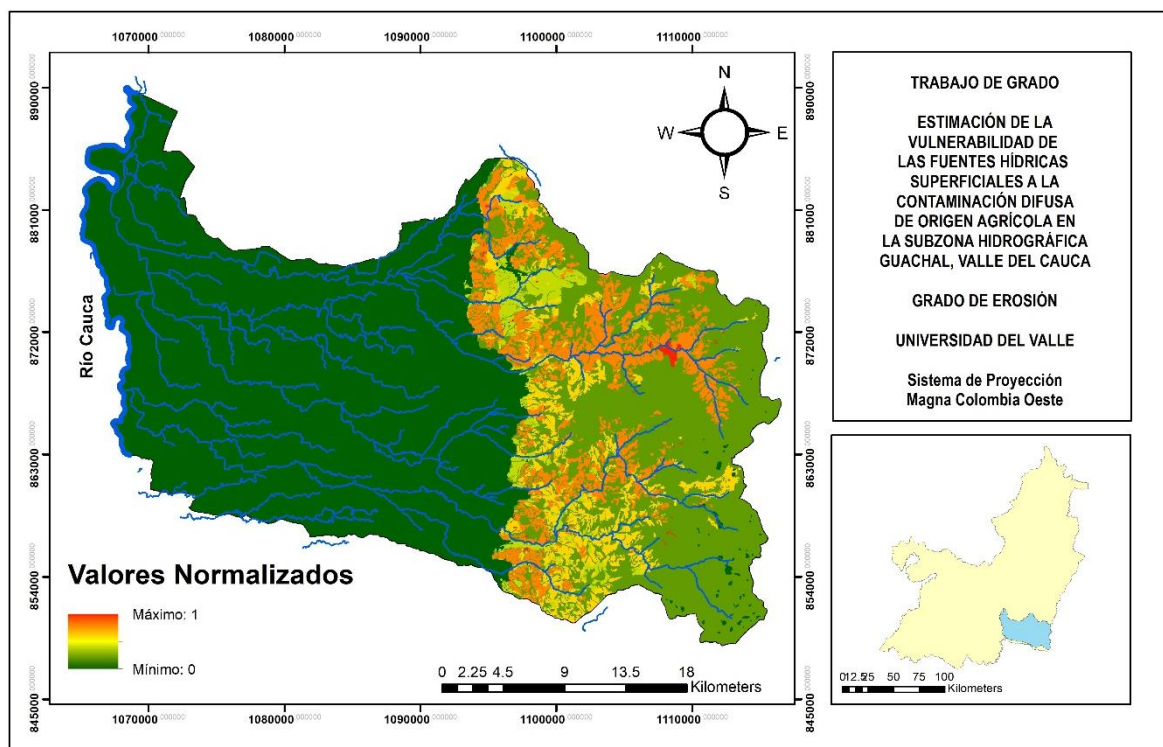


Figura 17. Mapa de valores normalizados de grado de erosión.

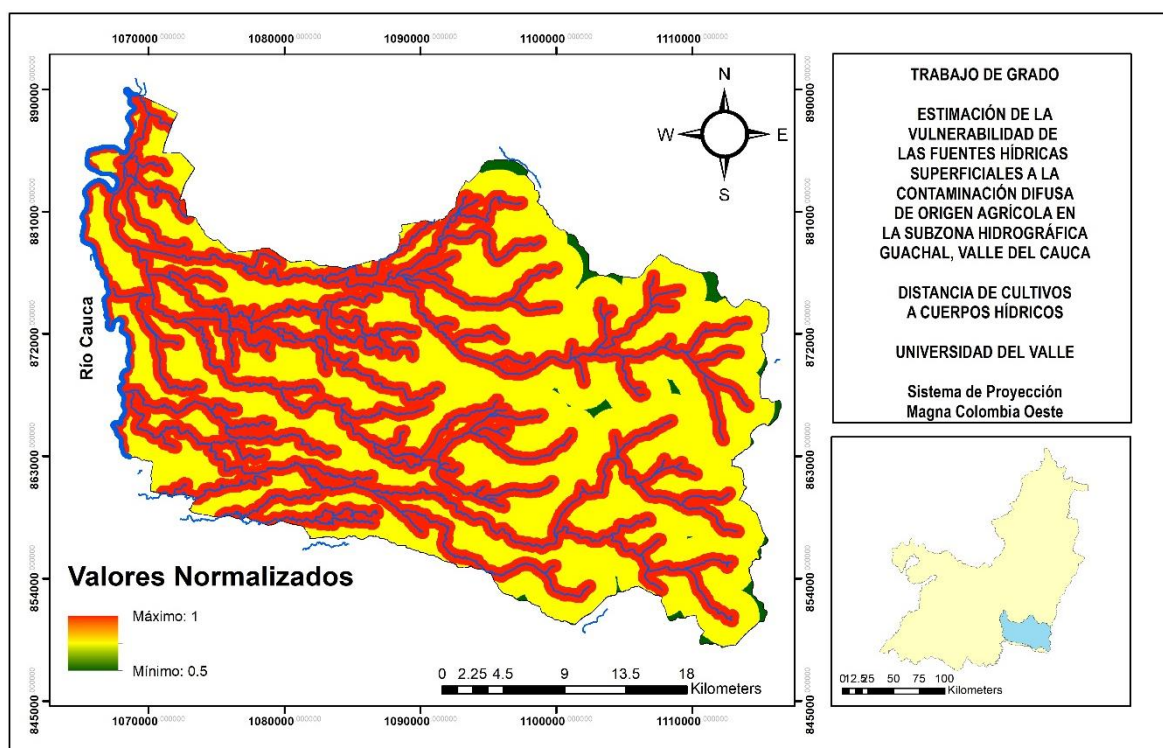


Figura 18. Mapa de valores normalizados de distancia de cultivos a cuerpos hídricos superficiales.

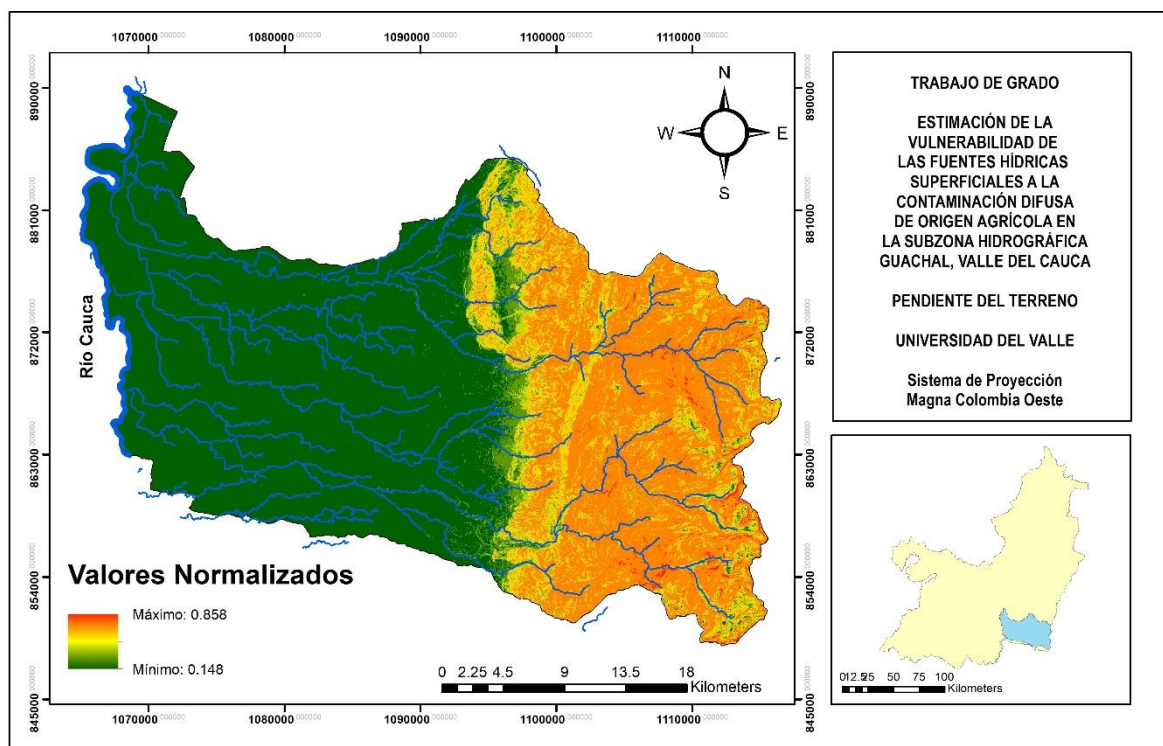


Figura 19. Mapa de valores normalizados de pendiente del terreno.

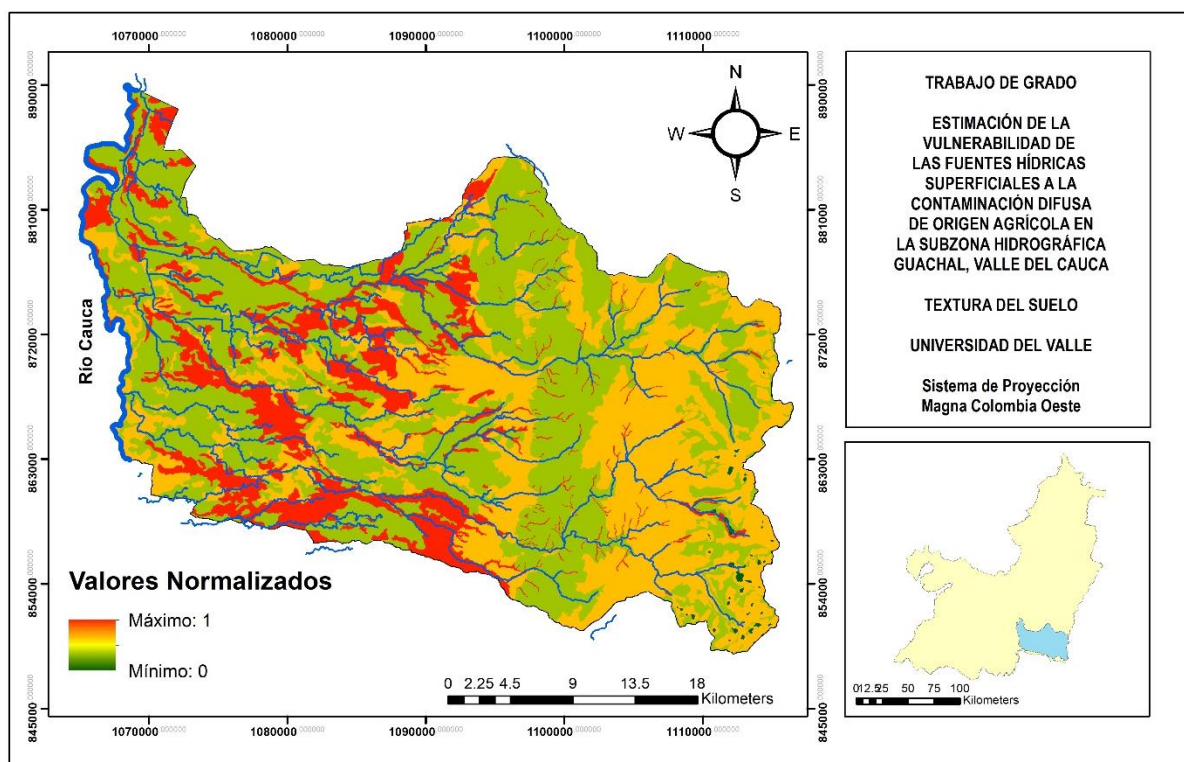


Figura 20. Mapa de valores normalizados de textura del suelo.

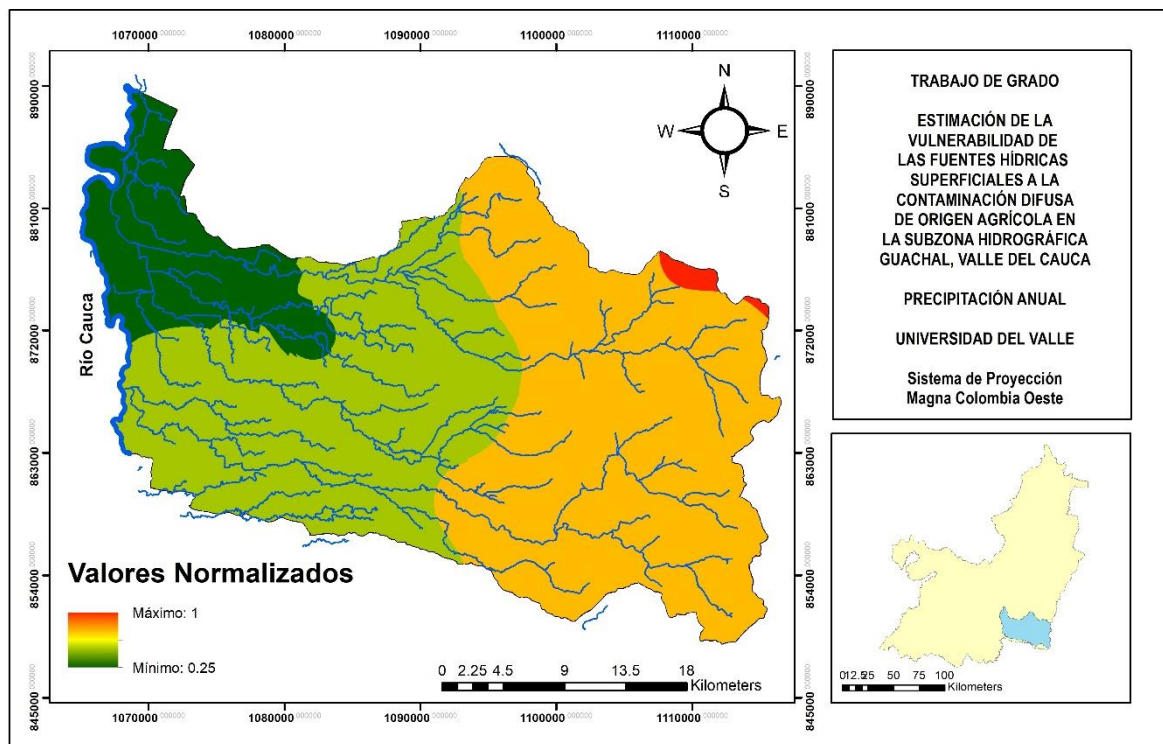


Figura 21. Mapa de valores normalizados de precipitación anual.

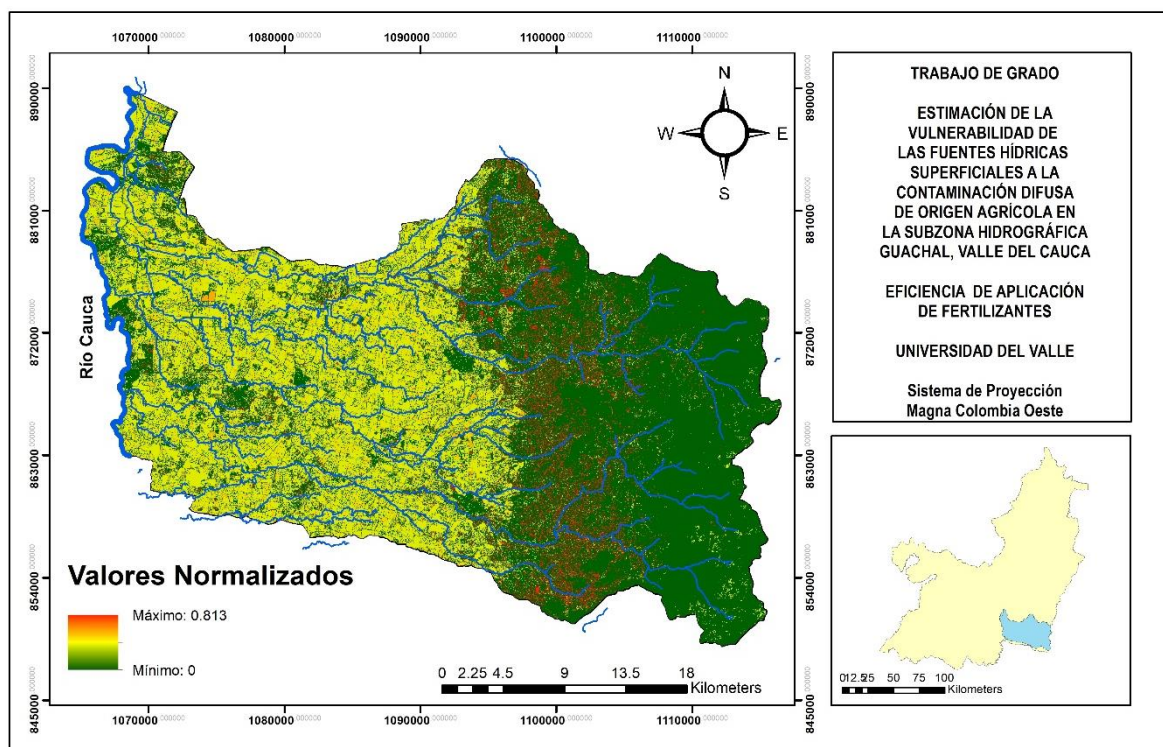


Figura 22. Mapa de valores normalizados de eficiencia de aplicación de fertilizantes.

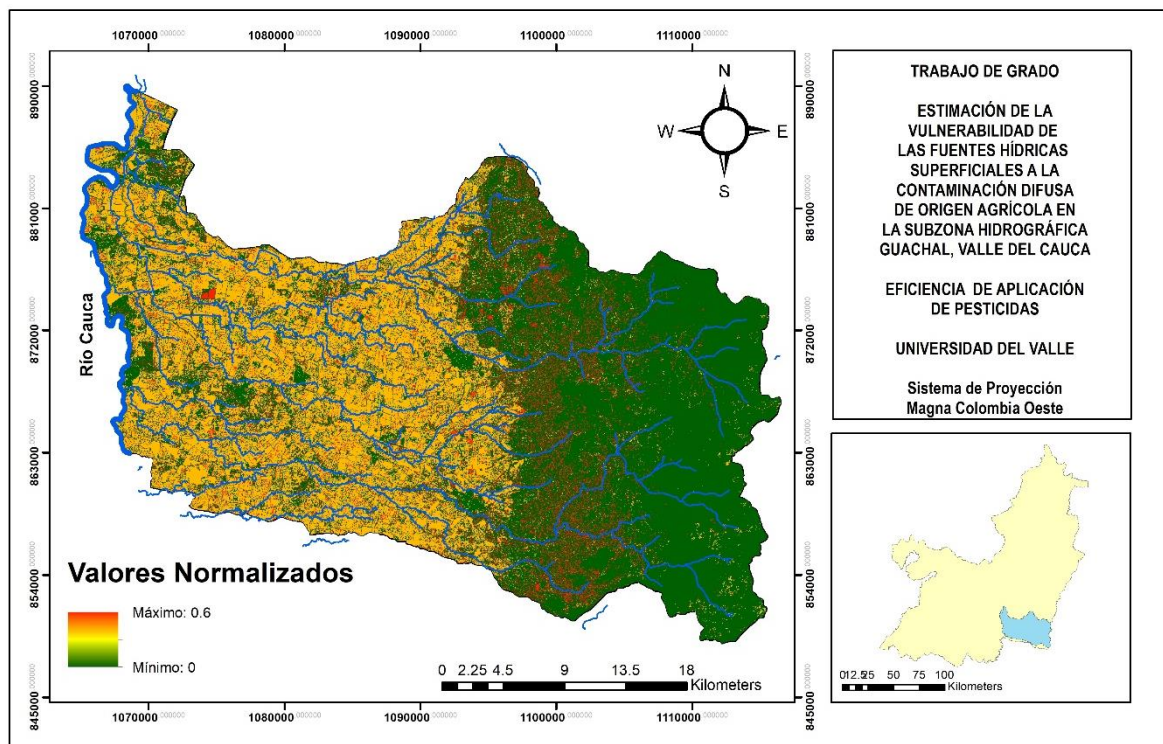


Figura 23. Mapa de valores normalizados de eficiencia de aplicación de pesticidas.

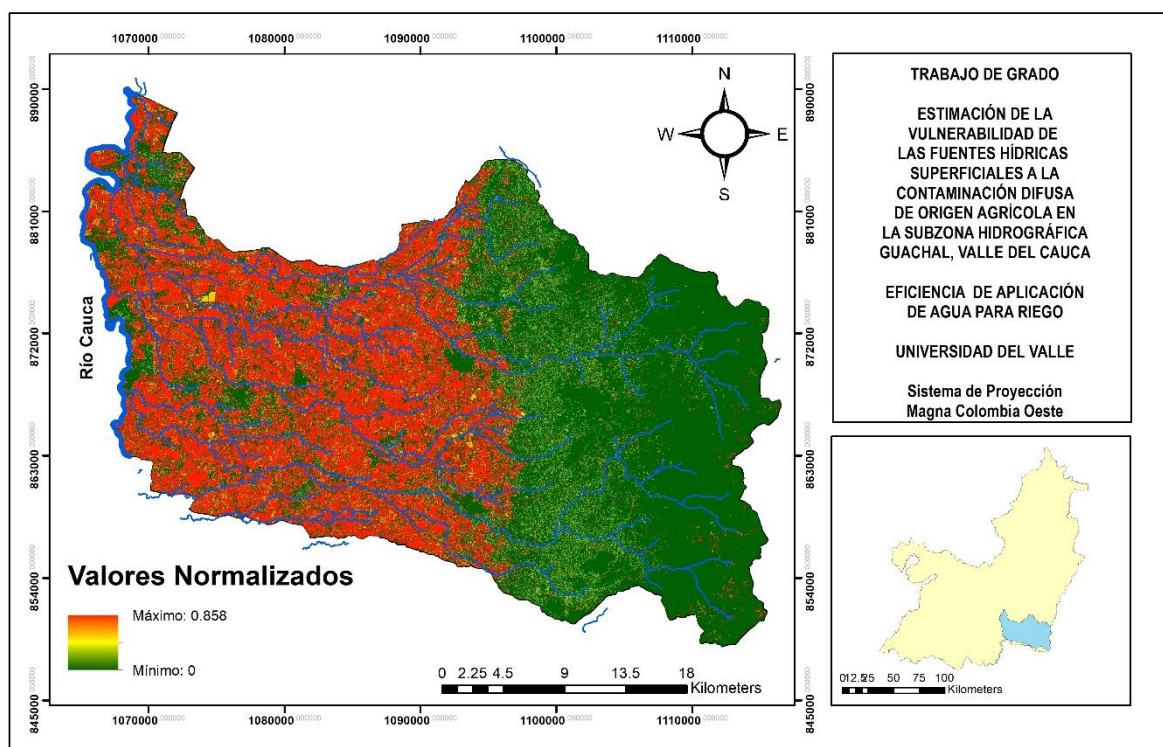


Figura 24. Mapa de valores normalizados de eficiencia de aplicación de agua para riego.

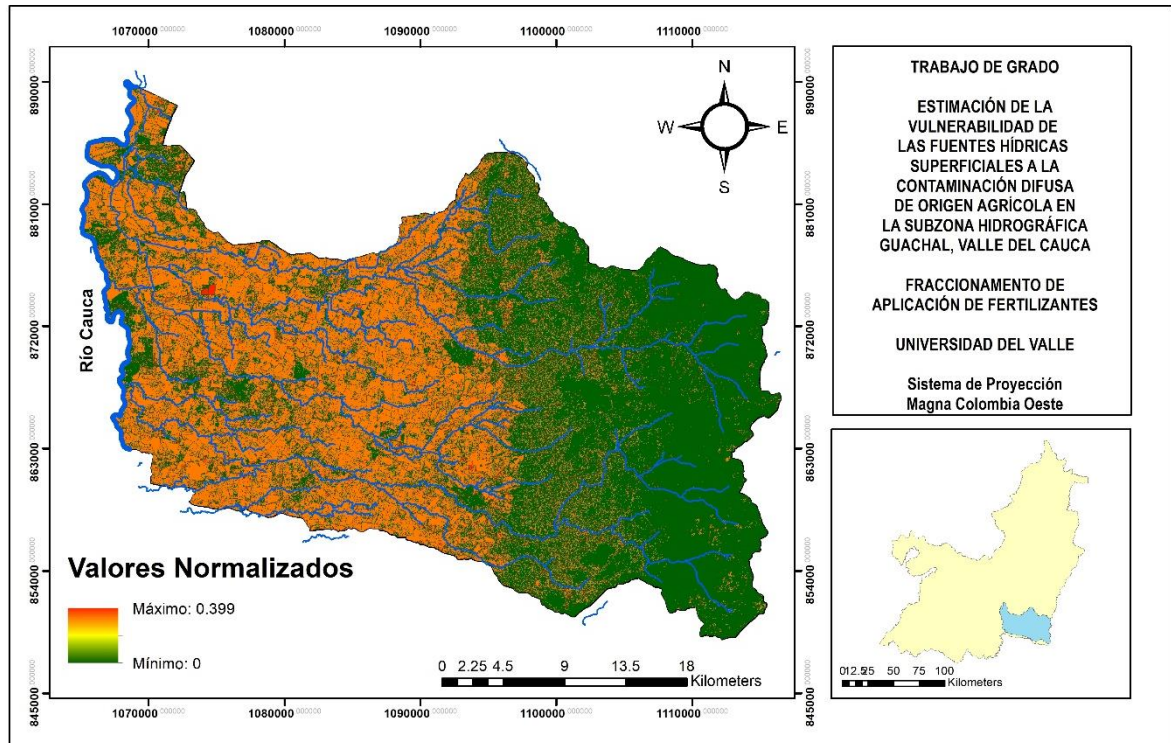


Figura 25. Mapa de valores normalizados de fraccionamiento de aplicación de fertilizantes.

7.3 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DIFUSA DE ORIGEN AGRÍCOLA (IVCDA)

En la Figura 27 se puede observar el mapa de distribución espacial del IVCDA de manera continua en píxeles de 30x30 metros. Los valores más altos se encuentran cercanos a la red hídrica, y a medida que hay una distancia considerada de los ríos va disminuyendo su valor. En la zona de ladera se encuentran los valores más altos en menor proporción hacia el oriente y suroriente.

En la Figuras 26 y 28 se observan las zonas homogéneas de acuerdo al nivel de vulnerabilidad, en la cual se comprueba que se tiene un área importante en Vulnerabilidad Media (53,11%). La categoría de Vulnerabilidad Baja representa el 46,31% del área, la categoría de Vulnerabilidad Muy Baja tiene el 0,30% del área de estudio y solo el 0,29% del territorio estudiado corresponde a Vulnerabilidad Alta.

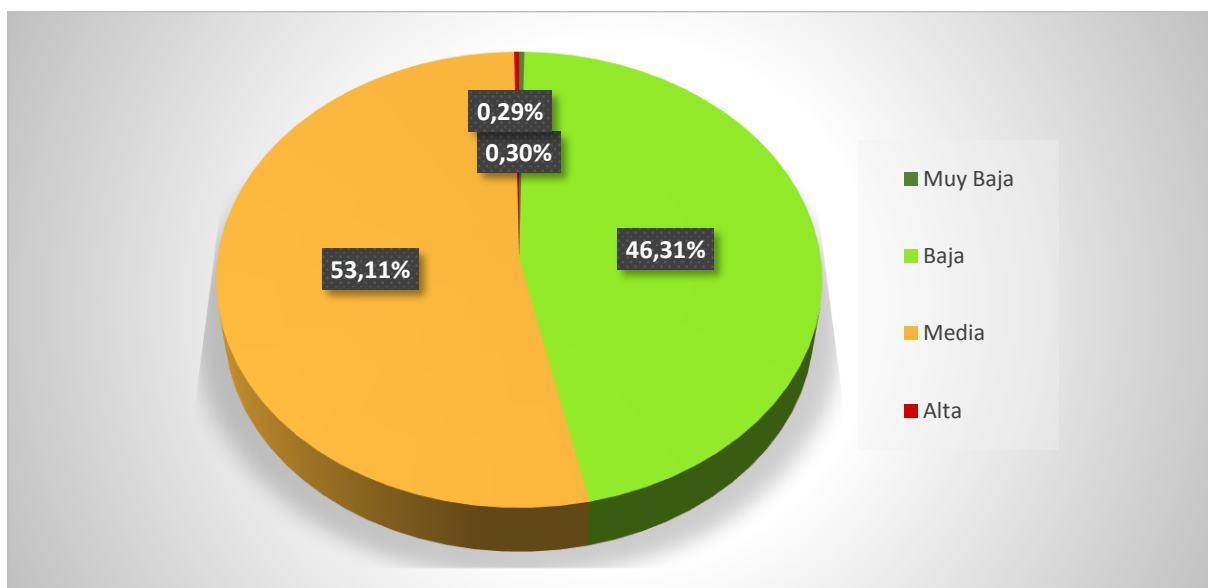


Figura 26. Distribución porcentual de las zonas homogéneas de vulnerabilidad.

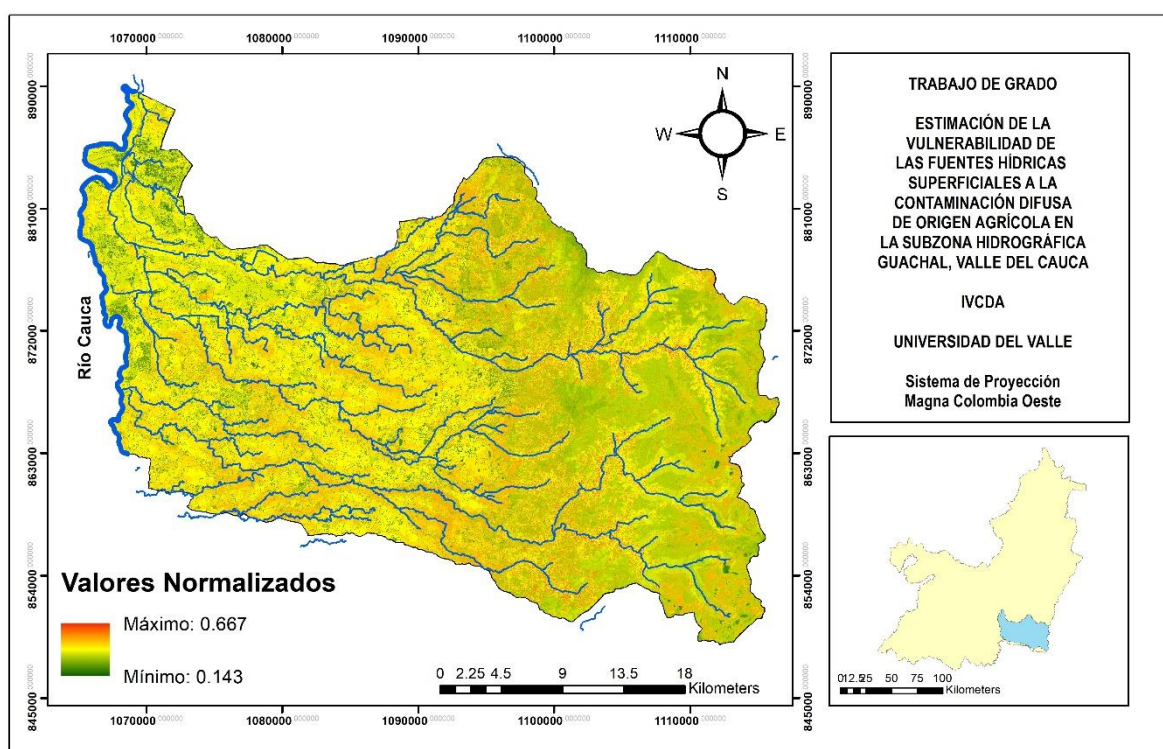


Figura 27. Distribución espacial IVCDA.

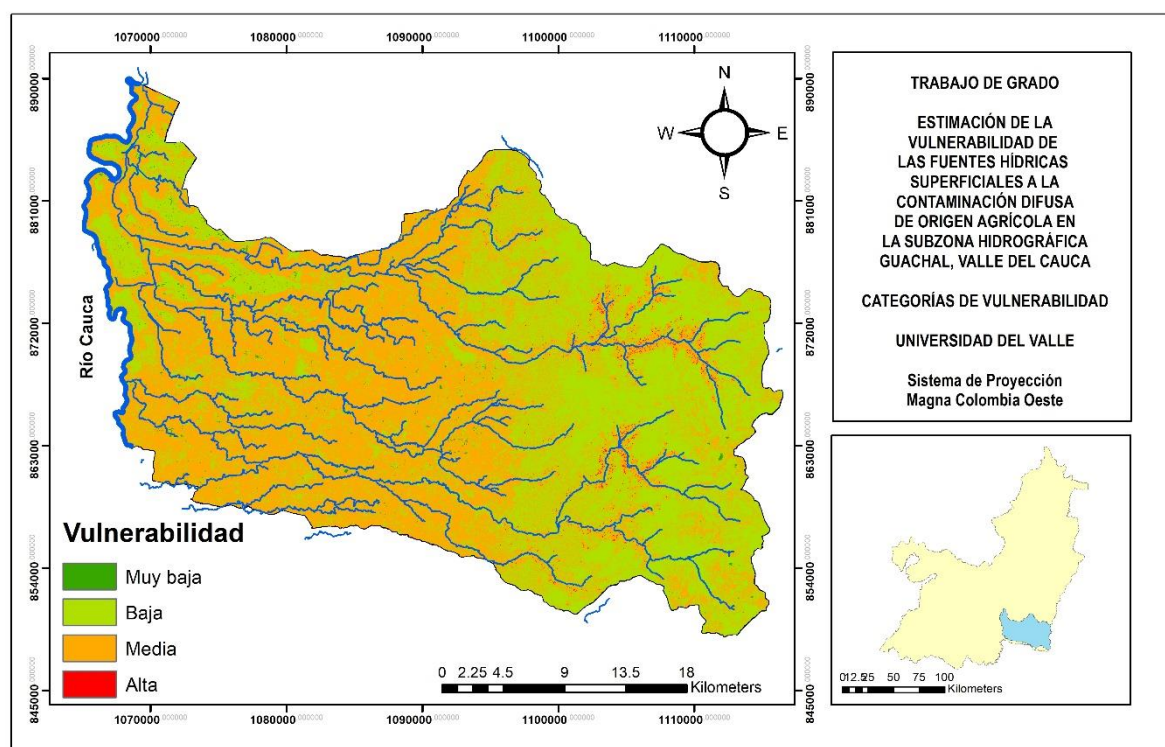


Figura 28. Zonas homogéneas de Vulnerabilidad.

7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De las evidencias anteriores se encontró que la estimación del IVCDa en la SZH Guachal presentó un área significativa de 61,585 ha de vulnerabilidad media, la cual representó un 53.11% del área total estudiada distribuida principalmente en la zona plana. En la Figura 27 se puede evidenciar que el máximo valor obtenido para el IVCDa en la zona de estudio es 0.67, presentando una tendencia a aumentar su valor hacia las zonas localizados cerca de los cauces principales que se acrecienta hacia las partes más altas de la zona de ladera.

Lo anteriormente expuesto evidencia que en la zona plana y de ladera se presentan diferentes porcentajes de área de vulnerabilidad debido a los factores ambientales e intervención antrópica que facilitan la contaminación de las fuentes hídricas. Para ejemplificar tal exposición, en la Tabla 17 se presentan los porcentajes de área de categoría de vulnerabilidad por tipo de zona y cobertura vegetal asociada. La zona correspondiente a vulnerabilidad muy baja agrupa los reservorios y lagunas en la cual su mayor presencia se encuentra en la zona plana. En cuanto al porcentaje de área de vulnerabilidad baja, ésta tiene mayor participación en las zonas altas donde hay presencia de bosques, arbustos y herbazales, que a pesar de tener pendientes fuertemente quebradas; por la densidad vegetal, la baja intervención antrópica y el ligero grado de erosión no hay atribución de cargas de contaminantes.

Tabla 17. Porcentaje de área de vulnerabilidad en zona de ladera y plana.

TIPO DE ZONA	VULNERABILIDAD			
	MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA
PLANA	0,43%	25,32%	74,25%	0,01%

LADERA	0,05%	73,55%	25,84%	0,55%
TIPO DE COBERTURA	Cuerpos de agua; reservorios, lagunas etc.	Pastos, caña de azúcar, bosques, arbustos, rastrojos y paramos.	Caña de azúcar, pastos, árboles frutales, hortalizas, cultivos limpios y áreas desnudas	Café, cítricos, plátano, yuca, hortalizas y áreas desnudas

Por lo que respecta a las zonas con vulnerabilidad media de la zona plana corresponden principalmente a zonas cultivadas en caña de azúcar, árboles frutales (aguacate, mango y cacao), piña y maíz. En esta zona los factores antrópicos condicionan en gran medida el grado de vulnerabilidad obtenido debido a la baja eficiencia en la aplicación del agua de riego que facilita el transporte de los desechos tóxicos resultados de la aplicación de los fertilizantes, situación que empeora al ser zonas que se encuentran a menos de 500 metros de los cuerpos hídricos. También se caracteriza por no haber presencia de erosión; pendientes menores a 3%; pluviosidad menor a 1000 mm/año en la zona de Palmira y 1000 a 1500 mm/año en el resto de la zona plana (Candelaria).

Por otra parte, las zonas con vulnerabilidad media en zona de ladera conciernen principalmente a zonas cultivadas en café y pastos asociados en actividades ganaderas. En primer lugar, los cultivos en café se caracterizan en zonas con un grado de erosión ligero; pendientes de 25 a 50%; baja eficiencia de aplicación de fertilizantes; mediana eficiencia en aplicación de pesticidas y nula aplicación de riego. A diferencia de los pastos para ganadería extensiva; con erosión moderada a severa; pendientes fuertemente quebradas y distancias menores a 500 metros de cuerpos hídricos.

En último lugar se evidencia que las zonas con vulnerabilidad alta se encuentran principalmente cultivos de café y hortalizas. Donde los factores que influyen en la vulnerabilidad son altas precipitaciones de 1500 a 2000 mm/año; grado de erosión severa; pendientes de 25 a 50%; baja eficiencia de aplicación de fertilizantes; mediana eficiencia en aplicación de pesticidas y distancias menores a 500 metros de cuerpos hídricos. Condiciones que favorecen el transporte de las sustancias tóxicas provenientes de los agroquímicos utilizados.

8 CONCLUSIONES

Las zonas identificadas con vulnerabilidad alta y media se asociaron principalmente a algunos parámetros en específico. En las zonas con vulnerabilidad media, los parámetros asociados a esta clasificación básicamente dependieron del tipo de cobertura; ya que tiene un mayor grado de importancia en la cuantificación de la vulnerabilidad y está condicionando a las actividades antropogénicas; la eficiencia y el fraccionamiento de agroquímicos, y la eficiencia del sistema de riego utilizado ya que al tener un manejo inadecuado causarían un efecto directo en el grado de vulnerabilidad de la zona. El siguiente parámetro es la distancia de cultivos a cuerpos hídricos, donde aquellos cultivos situados a distancias cercanas facilitan la movilización y carga de contaminantes impactando negativamente los cuerpos de agua. En las zonas con vulnerabilidad alta, además de los parámetros ya expuestos se identificó que la pendiente y el grado de erosión son factores que inciden en la obtención de valores altos de vulnerabilidad debido al desgaste en las propiedades físicas del suelo.

Frente a los resultados obtenidos en la subzona hidrográfica Guachal, la categoría de vulnerabilidad dominante es la vulnerabilidad media que representó el 53% del área total. Actualmente no representa una situación grave pero al ser el sector agroindustrial azucarero con mayor presencia en la zona, las

prácticas agrícolas deben ser responsables con el uso y manejo de los recursos naturales, ya que a futuro provocarían un aumento en la vulnerabilidad de la contaminación difusa de la zona.

De esta manera queda en evidencia que los parámetros responsables de la vulnerabilidad alta y media son el tipo de cobertura, distancia a los cuerpos hídricos, fraccionamiento de fertilizantes, eficiencia de aplicación de fertilizantes, pesticidas y sistema de riego, pendiente del terreno y grado de erosión.

Los cultivos encontrados dentro de las zonas con vulnerabilidad alta fueron cultivos de café. En la zona con vulnerabilidad media el cultivo predominante es de caña de azúcar.

En conclusión, las zonas con mayores valores del índice están ubicadas en las partes más altas de la subzona hidrográfica a causa de coberturas tales como cultivos de café y hortalizas, debido a que son sitios con altas pendientes, texturas medias y suelo descubierto donde el movimiento hídrico dominante es la escorrentía causando susceptibilidad a la erosión hídrica de los suelos, pese a esto estas zonas solo corresponden al 0,2% del área la zona de estudio.

9 RECOMENDACIONES

El desarrollo de métodos de análisis multicriterio junto con el uso de herramientas como los SIG son métodos que permiten identificar los focos de problemas asociados a múltiples situaciones las cuales facilitan la toma de decisiones direccionadas a dar solución a un problema. En este caso debido a que el índice de vulnerabilidad se relaciona con factores ambientales y a su vez con el manejo agronómico de los cultivos en la zona de estudio, es importante optimizar los procesos relacionados con las prácticas agrícolas pues como ya se mencionó, los demás factores son condiciones propias de la zona que no se pueden modificar. Con base en esto, en las zonas de ladera es recomendable buscar alternativas que permitan disminuir los efectos generados por la aplicación de fertilizantes y pesticidas en los cultivos de café.

Si bien la solución ideal sería la implementación de prácticas de agricultura de precisión con las cuales se establezcan dosis variables para cada caso en particular, se sabe que este tipo de tecnologías son de altos costos. Pese a esto se podrían llevar a cabo estudios de suelo y análisis foliar de los cultivos con el propósito de identificar zonas de manejo haciendo uso de los SIG y de software como el MZA (Management Zone Analyst) que permite reconocer y discriminar áreas de productividad diferencial, y optimizar prácticas de manejo de los cultivos a partir de diferentes fuentes de información con numerosas alternativas metodológicas (Kemerer et al., 2016). Con lo cual las prácticas agrícolas llevadas a cabo serían más precisas ya que generaría un impacto positivo en la tasa de uso de los agroquímicos.

Otra alternativa que se podría implementar sería mejorar la eficiencia de aplicación de estos agroquímicos utilizando métodos que permitan una aplicación dosificada y localizada del producto (ahoyado localizado, fertirrigación, aspersión foliar con máquinas o bombas a presión constante). De igual forma no está demás el uso de pesticidas naturales o la implementación de controles biológicos de plagas como una alternativa que disminuya el impacto que causan los agentes contaminantes de los agroquímicos en los cuerpos de agua.

En el caso de los fertilizantes, se podrían buscar alternativas con el fin de disminuir las dosis requeridas o el uso de fertilizantes de liberación controlada ya que al estar recubiertos por un polímero insoluble al agua que tiene cierta permeabilidad permite que el suministro del fertilizante se dé por un tiempo más prolongado en una sola aplicación. Además, las pérdidas por lixiviación son mucho menor por lo cual son más eficientes que los fertilizantes solubles convencionales (Reyes et al., 2012).

Por otra parte, debido a que el 53.11 % del área total presentó un grado de vulnerabilidad media asociado al sistema de riego utilizado en el cultivo de caña de azúcar, se deben desarrollar proyectos encaminados a mejorar la eficiencia del uso del recurso hídrico, implementando metodologías que permitan tomar decisiones encaminadas a la mejora de los sistemas de riego utilizados como riego localizado de alta frecuencia o aspersión.

Debido a que el éxito de la investigación radica en la información disponible sobre las prácticas agrícolas utilizadas en los distintos cultivos, se recomienda la creación de una base de datos por parte de la entidad ambiental encargada de la zona que tenga como finalidad actualizar y recopilar periódicamente la información digitalizada de cada cultivo correspondiente al manejo y uso de agroquímicos y al sistema de riego utilizado por parte de los agricultores de la zona. Para tal fin se diseñaría e implementaría un formato estandarizado que permita consignar los datos de forma concreta y una vez registrada se enviaría a la entidad ambiental para el procesamiento de la información. Lo anterior estaría encaminado a facilitar el acceso a este tipo de datos ya que en este caso puntual al haber gran diversidad de cultivos

con prácticas agrícolas propias de cada uno hace que reunir la información se convierta en un proceso tedioso limitando el desarrollo de investigaciones futuras relacionadas con el tema.

Sería recomendable continuar con la investigación propuesta encaminada a identificar las zonas de riesgo en la SZH Guachal una vez se haya realizado la investigación en la identificación de las zonas de amenaza en el área a partir del IACDA (índice de amenaza de las fuentes hídricas superficiales a la contaminación difusa de origen agrícola); desarrollado por el grupo de investigación Gestión Integral del Recurso Agua para el Desarrollo Agrícola y la Seguridad Alimentaria mediante la Agricultura de Riego (REGAR) de la Universidad del Valle. Seguido de esto se propone desarrollar un estudio que permita evaluar el impacto de los agroquímicos en los ríos de la cuenca que permita validar la metodología propuesta para la obtención del índice y su aplicabilidad a futuro.

10 REFERENCIAS

- Alarcón Jibaja, V. J. (2016). *"Modelamiento geoespacial gota para determinar las zonas con mayor vulnerabilidad a la inseguridad hídrica en la cuenca del río piura"*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Álvarez, O., Silva, J. & Garzón, E. (2006). *Conceptos Basicos para la realizacion del balance hídrico en el cultivo de la Palma de Aceite*. Bogotá D.C.: Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma).
- Bautista-Ávalos, D., Cruz-Cárdenas, G., Moncayo-Estrada, R., Silva-García, J. T. & Estrada-Godoy, F. (2014). Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(3), 263-274.
- Bongiovanni, R., Mantovani, E. C. & Best, S. (2010). *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo: PROCISUR/IICA. 244 p.; 16,7 x 24 cm. ISBN 92-9039-741-1
- Briones, G. (2007). La complejidad del riesgo: breve análisis transversal. *Revista de la Universidad Cristóbal Colón*, 20, 9-19. Recuperado de <http://www.eumed.net/rev/rucc/20/fbg.htm>
- Buitrago Vallejo, L. M. (2015). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en el municipio de Funza, Cundinamarca*. Universidad Católica de Colombia.
- Cardona, O. (2001). Estimación Holística Del Riesgo Sísmico Utilizando Sistemas Dinámicos Complejos 335. Recuperado de [http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/19751/HolisticaRiesgoSismoBogota\(Cardona_2001\).pdf;jsessionid=5B6F933F8618E263755E33ACD668BC91?sequence=1](http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/19751/HolisticaRiesgoSismoBogota(Cardona_2001).pdf;jsessionid=5B6F933F8618E263755E33ACD668BC91?sequence=1)
- Castro H., Lina. 2004. *Análisis de frecuencia de crecientes con diferentes distribuciones de probabilidad*. Popayán. Trabajo de grado (Ingeniera Civil). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.
- Chávez López, S. (2018). El Concepto de riesgo. *Recursos naturales y sociedad*, 4(1), 32-52.
- Conesa, C. (1996). Áreas de Aplicación Medioambiental de los «SIG». Modelización y Avances Recientes. *Papeles de Geografía*, 23-24, 101-115.
- Corporación Clayuca, Fundación promotora del canal del dique, Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación la Ciencia y la Cultura (OEI), & Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). (2015). *Tecnologías modernas para la produccion de la yuca*. Palmira, Colombia.
- Cotler, H. & Iura, D. (2010). Contaminación potencial difusa por actividad agrícola. *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*, 120-123. Recuperado de http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=639
- Cujabán García, D. M. (2013). *Zonificación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en el distrito capital por el método DRASTIC*. Universidad Militar Nueva Granada.

CVC, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2017). *Balance oferta – demanda de agua*. Valle del Cauca.

Duarte Canatário, A. F. (2012). Modeling runoff with AnnAGNPS model in a small agricultural catchment, in Mediterranean environment, (June), 131-144. Recuperado de <https://www-scopus-com.bd.univalle.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-84878246022&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Contaminación+difusa+originada+por+la+actividad+agrícola+de+riego%2C+a+la+es+cala+de+la+cuenca+hidrográfica&st2=&sid=def5a036a2a4190>

Echeverri, A., Urrutia, N., & Barona, S. (2020). Vulnerabilidad de fuentes hídricas superficiales de la cuenca del río cerrito a la contaminación difusa agrícola. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(2), 117-130. <https://doi.org/10.22490/21456453.3136>

Feito, L. (2007). Vulnerability. *Análisis del Sistema Sanitario de Navarra*, 30, 7-22. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid.

Filimonov, V. Y., Zinoviev, A. T., & Lovtskaya, O. V. (2021). Method for estimating the pollutant flow rate under diffuse pollution of small lowland rivers. *Mathematics and Computers in Simulation*, 182, 807-818. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.12.003>

Fu, J., Wu, Y., Wang, Q., Hu, K., Wang, S., Zhou, M., ... Zhu, J. (2019). Importance of subsurface fluxes of water, nitrogen and phosphorus from rice paddy fields relative to surface runoff. *Agricultural Water Management*, 213(June 2018), 627-635. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.005>

Fuenzalida, M., Buzai, G. D., Iménez, A. M. J., & León, A. G. de. (2015). *Geografía, Geotecnología y Análisis Espacial: Tendencias, métodos y aplicaciones*. 1ra ed., Santiago de Chile: Editorial Triángulo.

González, S. (2007). Contaminación Difusa De Las Aguas Continentales. *Agricultura Limpia*, (figura 2), 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.04.179>

Goodchild, M., & Haining, R. (2005). SIG y análisis espacial de datos: perspectivas convergentes. *Investigaciones Regionales*, núm 6. Primavera, pp. 175-201. Asociación Española de Ciencia Regional. Madrid, España.

Fundora Hernández, H., Venero Fernández, S., Rodríguez Bertheau, A. & Alerm González, A. (2011). Inmunoepidemiología del asma bronquial. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiol*, 49(3), 459-469.

Hermosín, C., Rodríguez, D., Cornejo, J., & Ordóñez, R. (2009). Capítulo 4. Efecto del uso de agroquímicos en olivar sobre la calidad de las aguas. *Sostenibilidad de la producción en olivar en Andalucía*, 127.

IGAC, & CVC. (2004). Levantamiento de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Valle del Cauca. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC & Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, Eds.). Cali, Colombia.

IGAC, & CVC. (2016). Levantamiento semi-detallado de suelos Escala 1:25000. Convenio Interadministrativo 4488 IGAC – 087 CVC de 2014. Cali, Colombia.

- Jaramillo V, J., & Patarroyo M, F. (1976). *El cultivo del pepino*. Biblioteca Agropecuaria de Colombia.
- Jeong, J. S., & Ramírez, Á. (2017). Renewable energy management to identify suitable biomass facility location with GIS-based assessment for sustainable environment. *Energy Procedia*, 136, 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.310>
- Kemerer, A., Melchiori, R., Galarza, R., Mastaglia, M. N., Martinez, C. E., & Alborno, E. M. (2016). Software para delimitar zonas de manejo : evaluación agronómica comparativa. En *CAI 2016, 8º Congreso de AgroInformática Software* (pp. 257-258).
- López Zamora, C. M. (2003). Guía técnica No 17. Cultivo del pepino. El Salvador: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal.
- Martínez, E., Álvarez, M., Arquero, Á., & Romero, M. (2010). Apoyo a la selección de emplazamientos óptimos de edificios . Localización de un edificio universitario mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). *Informes de la Construcción*, 62(519), 35-45. <https://doi.org/10.3989/ic.08.052>
- Martínez Rodríguez, E. (2007). Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, XL, 523-542.
- Mazahreh, S., Bsoul, M., & Hamoor, D. A. (2019). GIS approach for assessment of land suitability for different land use alternatives in semi arid environment in Jordan: Case study (Al Gadeer Alabyad-Mafraq). *Information Processing in Agriculture*, 6(1), 91-108. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.08.004>
- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D., & García, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 27, 348-360.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra*. Recuperado de http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762
- Montoya, R., García, J. & Padilla, J. (2004). Utilización de un SIG para la determinación del impacto ambiental generado por actividades agrícolas , ganaderas e industriales: El caso del Valle de Zapotitlán en la Reserva de La Biosfera de Tehuacán Cuicatlán. *Boletín de la A.G.E.* 38, 115-129.
- Olmo, M. C. (2005). La geoestadística como herramienta de análisis espacial de datos de inventario forestal. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 19, 47-55. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2981942.pdf>
- Ongley, E. . (1997). *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021109/LUCHACONTRALACONTAMINACION.pdf>
- Ortiz-Rivera, A. (2004). Estimación del impacto potencial de la contaminación difusa por métodos simplificados en el Estimation of the potential impact of diffuse pollution (non-point source pollution) by simplified methods in the Area of Protection of Flora and Fauna, Pico de Ta. *Revista Geográfica de América Central*, 65(2). <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.8>

- Osorio, J. & Orejuela, J. (2008). EL Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*, XIV(39), 247-252. Recuperado de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=84920503044>
- Ou, Y., Rousseau, A. N., Yan, B., Wang, L., & Zhang, Y. (2021). Grass barriers for mitigating diffuse pollution within a source water area - A case study of Northeast China. *Agricultural Water Management*, 243(June 2020), 106461. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106461>
- Pérez Ceballos, R. & Pacheco Ávila, J. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. *Ingeniería*, vol. 8, núm. 1, enero-abril, 2004, pp. 33-42. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México.
- Ramírez, F., & Lee Davenport, T. (2012). Mangoes in Colombia. En *MANGO Vol.2: Cultivation in different Countries* (Studium Pr, 347-358). Houston.
- Reaney, S. M., Mackay, E. B., Haygarth, P. M., Fisher, M., Molineux, A., Potts, M., & Benskin, C. M. W. H. (2019). Identifying critical source areas using multiple methods for effective diffuse pollution mitigation. *Journal of Environmental Management*, 250(September), 109366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109366>
- Reyes Millalón, J., Gerding, V., & Thiers Espinoza, O. (2012). Fertilizantes de liberación controlada aplicados al establecimiento de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18, 313-328. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.08.060>
- Rodriguez, J. P., Serna, J. A., & Sánchez, J. M. (2016). Índices De Calidad En Cuerpos De Agua Superficiales En La Planificación De Los Recursos Hídricos. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 8(1). <https://doi.org/10.22335/rict.v8i1.306>
- Ruíz, M. (2019). Aproximación a la valoración de la amenaza de contaminación difusa de las fuentes hídricas superficiales por agroquímicos. Estudio de caso: Cuenca del río Cerrito, Valle del Cauca. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
- Santos, J. M. (1997). El planteamiento teórico multiobjetivo/multicriterio y su aplicación a la resolución de problemas medioambientales y territoriales, mediante los S.I.G. raster. *Espacio Tiempo y Forma. Serie VI, Geografía*, (10), 129-151. <https://doi.org/10.5944/etfvi.10.1997.2547>
- Silva, S. & Correa, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13-34. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2>
- Soares, D., & Murillo, D. (2014). Amenazas y vulnerabilidades: las dos caras de los desastres en Celestún, Yucatán *. *Desacatos*, 44, 159-177.
- Soldano, A. (2009). *Conceptos sobre Riesgo*. Síntesis temática para el foro Virtual de la RIMD. CONAE, OEA & DSS. Falda del Carmen, Provincia de Córdoba, Argentina.
- Stephan, R. Selvaraju, D. Jennie, B. F. (2009). *Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres*. Serie sobre el medio ambiente y la gestión de los recursos naturales, No. 13 – FAO, Roma.
- UNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*.

Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD. Recuperado de <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20761/Terminologia-GRD-2017.pdf;jsessionid=1ADDEE38CA0713C6B15CC4D150169677?sequence=2>

- Varekar, V., Yadav, V., & Karmakar, S. (2021). Rationalization of water quality monitoring locations under spatiotemporal heterogeneity of diffuse pollution using seasonal export coefficient. *Journal of Environmental Management*, 277, 111342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111342>
- Wang, P., Ouyang, W., Wu, Z., Cui, X., Zhu, W., Jin, R., & Lin, C. (2020). Diffuse nitrogen pollution in a forest-dominated watershed: Source, transport and removal. *Journal of Hydrology*, 585(January). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124833>
- Xavier, J. M. et al (2004) *Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Mercedes en el área metropolitana de la ciudad de Payandú – comparación de los métodos GOD y DRASTIC*. Ciudad de Paysandú en Uruguay