

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD
AMBIENTAL ANTE UN POSIBLE DERRAME DE POLIDUCTOS Y
OLEODUCTOS

OSCAR MAURICIO BLANCO CASTAÑEDA

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL
TUNJA
2019

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD
AMBIENTAL ANTE UN POSIBLE DERRAME DE POLIDUCTOS Y
OLEODUCTOS

OSCAR MAURICIO BLANCO CASTAÑEDA

Trabajo de grado para optar el título de Magister en Ingeniería Ambiental

GLORIA LUCIA CAMARGO MILLÁN
Ingeniera Química, Magíster en Ingeniería Civil. Área Ambiental, Candidata a
doctora en Desarrollo Sostenible

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL
TUNJA
2019

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Tunja, 06 de noviembre de 2019

Dedico este trabajo a Dios, por permitirme llegar hasta este momento de formación profesional y personal.

A mi madre por ser el pilar de mi vida, que aunque ya no esté a mi lado, su luz sigue iluminando mi camino.

A mi padre por haber depositado su entera confianza en mí, sin poner en duda mis capacidades para alcanzar mis metas y cada reto que se me presenta.

y
A ti mi princesa hermosa, por brindarme cada día ese apoyo incondicional, que a pesar de las dificultades, siempre está ahí para motivarme y ayudarme a salir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por protegerme en mi camino y darme la fuerza para superar los obstáculos y las dificultades a lo largo de mi vida.

A mi familia por brindarme la confianza y el apoyo necesario en el desarrollo de mis metas, lo cual ha motivado y ha permitido formarme como profesional.

A la Universidad Pedagógica Y Tecnológica de Colombia, por darme la oportunidad de alcanzar mis metas para crecer como profesional.

A la ingeniera Gloria Lucia Camargo y al Ingeniero Omar Javier Daza, quienes con sus conocimientos y apoyo guiaron el proceso de la presente tesis.

A mi compañero y amigo Adrián Daniel Torres a quien quiero expresar mi más sincero agradecimiento por su colaboración, disponibilidad y paciencia a lo largo del desarrollo de este trabajo de grado.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	18
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
3.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	20
3.2. JUSTIFICACIÓN	22
4. MARCO TEÓRICO	23
4.1. ZONA DE ESTUDIO	23
4.2. VULNERABILIDAD	29
4.3. ANÁLISIS MULTICRITERIO	31
4.4. PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (PAJ).....	31
4.4.1. Principios:	33
4.4.2. Axiomas	35
4.4.4. Estimación del índice de consistencia	35
4.5. ZONIFICACIÓN AMBIENTAL.....	36
4.6. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG).....	40
4.7. METODOLOGÍA CORINE LAND COVER EN EL CONTEXTO COLOMBIANO.....	45
5. DISEÑO METODOLÓGICO	48
5.1. SELECCIÓN DE VARIABLES	48
5.1.1. Coberturas vegetales	48
5.1.2. Cuerpos de agua (aguas superficiales)	50
5.1.3. Vías.....	52
5.1.4. Asentamientos humanos.....	54
5.1.5. Explosión	55
5.1.6. Incendio	55
5.1.7. Superficies deslizantes.....	56
5.1.8. Daño estructural	56
5.2 Estructura de la jerarquía de decisión	57
5.3. Generación de las variables geográficas	59

6 DESARROLLO DEL PROYECTO	66
6.1 Vulnerabilidad ambiental general por cada uno de los factores	69
6.2. Vulnerabilidad Ambiental producto de las alternativas.....	70
6.3. Componente Biótico - Coberturas vegetales.....	76
6.4. Componente Físico – Cuerpos de Agua.....	81
6.5. Componente Socioeconómico y Cultural – Vías	85
6.6. Componente Socioeconómico y Cultural – Población	89
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES.....	97

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Escalas de comparación de Saaty.	34
Tabla 2. Leyenda nacional de las coberturas de tierra para Colombia.	46
Tabla 3. Valoración aguas superficiales – drenajes.	52
Tabla 4. Valoración de Vías.	53
Tabla 5. Valoración asentamientos humanos.	54
Tabla 6: Variables para elaboración del PAJ.	58
Tabla 7. Ejemplo de matriz de comparación pareada.	58
Tabla 8. Valoración Vulnerabilidad ambiental.	58
Tabla 9. Matriz Comparación de Pares – Componentes Ambientales.	66
Tabla 10. Priorización Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Componentes Ambientales.	68
Tabla 11. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Componentes Ambientales.	69
Tabla 12. Matriz de Comparación de Pares- Coberturas Vegetales.	76
Tabla 13. Matriz de Comparación de pares – Tipos de Cobertura.	78
Tabla 14. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Coberturas Vegetales.	79
Tabla 15. Matriz de Comparación de Pares- Cuerpos de Agua.	81

Tabla 16. Matriz de Comparación de pares – Tipos de Cuerpo de Agua.	83
Tabla 17. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Cuerpos de Agua.	83
Tabla 18. Matriz de Comparación de Pares – Vías.	86
Tabla 19. Matriz de Comparación de pares – Clasificación de las Vías.	87
Tabla 20. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Vías.	88
Tabla 21: Matriz de Comparación de Pares- Población.	90
Tabla 22: Matriz de Comparación de Pares- Tipos de Población.	91
Tabla 23. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Vías.	91

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág
Gráfica 1. Vulnerabilidad Componentes Ambientales	67
Gráfica 2. Consecuencias Derrame de Hidrocarburos	68
Gráfica 3. Consecuencias Derrame de Hidrocarburos – Coberturas Vegetales	77
Gráfica 4. Consecuencias Derrame de Hidrocarburos – Cuerpos de Agua	82
Gráfica 5: Consecuencias Derrame de Hidrocarburos – Vías	86
Gráfica 6: Consecuencias Derrame de Hidrocarburos – Población	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1: Localización zona de estudio - plancha 191	24
Figura 2. Esquema proceso de análisis jerárquico.	33
Figura 3: Jerarquía de decisión para el análisis de Vulnerabilidad ante derrame de Hidrocarburo.	57
Figura 4: Representación de Colores según Vulnerabilidad	60
Figura 5: Aplicación de la herramienta Multiple Ring Buffer	60
Figura 6: Geoprocesamiento preliminar de vulnerabilidad	61
Figura 7: Aplicación de la herramienta Clip	62
Figura 8: Aplicación de la herramienta Union	62
Figura 9: Aplicación de la herramienta Dissolve	63
Figura 10: Diseño de modelo Vulnerabilidad general por cada uno de los factores	64
Figura 11: Diseño de modelo Vulnerabilidad ambiental producto de las alternativas	65
Figura 12: Vulnerabilidad ambiental general por cada uno de los factores	70
Figura 13: Vulnerabilidad ambiental por daño estructural	72
Figura 14: Vulnerabilidad ambiental general por cada uno de los factores	73

Figura 15: Vulnerabilidad ambiental por incendios	74
Figura 16: Vulnerabilidad ambiental por superficies deslizantes	75
Figura 17. Zonificación Vulnerabilidad Coberturas Vegetales	80
Figura 18. Zonificación Vulnerabilidad Cuerpos de Agua	85
Figura 19. Zonificación Vulnerabilidad Vías	89
Figura 20. Zonificación Vulnerabilidad Población	93

GLOSARIO

ANÁLISIS MULTCRITERIO: Es un conjunto de técnicas utilizadas en la decisión multidimensional y los modelos de evaluación, dentro del campo de la toma de decisiones¹.

COBERTURA VEGETAL: La cobertura vegetal y el uso actual de los suelos en el municipio es otro componente de importancia en la definición de conflictos sociales y ambientales dentro del espacio territorial y que es la razón de ser del ordenamiento territorial, como quiera que se busca quebrar las tendencias de uso impactantes y proponer una mejor organización de las diferentes actividades socioeconómicas que se desarrollan en los suelos del municipio².

CUERPO DE AGUA: Cuerpo de agua. Masa aislada y permanente de agua. Aguas corrientes superficiales y subterráneas, lagos, lagunas, ciénagas, manantiales, humedales, embalses de formación natural o artificial, chucuas o madre viejas o antiguos cauces con flujos estacionales, esteros, bahías, lagunas costeras, ensenadas, estuarios, los golfos o las aguas marinas. En general hace referencia a cualquier depósito o corriente de agua. Arroyos, ríos, lagos o acuíferos que conforman el sistema hidrográfico de una zona geográfica³.

DAÑO ESTRUCTURAL: El daño estructural se refiere a los daños que hay dentro de una construcción, lo que no se ve, pero que podría poner en riesgo la seguridad de la edificación y las vidas de los habitantes de estas. El daño en estructuras puede ser causado por fenómenos naturales, o también por la acción humana al darle un uso inadecuado, poner peso excesivo para el cual no estaban diseñados los materiales, fallas en la cimentación, por falta de mantenimiento o bien por construir de manera incorrecta y sin asesoramiento técnico adecuado⁴.

¹ TRIANTAPHYLLOU, E. Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. Kluwer Academic Publishers. Louisiana State University. Louisiana, U. S. A. 2000.

² Taboada Barreto, Luis COBERTURA VEGETAL. PRACTICAS AGRO-CULTURALES DE CONSERVACION DESUELOS Boletín N° 04. 2011

³ <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/>

⁴ <https://blog.laminasyaceros.com/blog/c%C3%B3mo-detectar-da%C3%B1os-estructurales-en-una-edificaci%C3%B3n>

DERRAME: Derrame es una descarga súbita, intempestiva, impredecible, irresistible e imprevista de una sustancia líquida o semilíquida a un cuerpo exterior⁵.

ECOSISTEMA: El ecosistema es el conjunto de especies de un área determinada que interactúan entre ellas y con su ambiente abiótico; mediante procesos como la depredación, el parasitismo, la competencia y la simbiosis, y con su ambiente al desintegrarse y volver a ser parte del ciclo de energía y de nutrientes. Las especies del ecosistema, incluyendo bacterias, hongos, plantas y animales dependen unas de otras. Las relaciones entre las especies y su medio, resultan en el flujo de materia y energía del ecosistema⁶.

EXPLOSIÓN: Del latín *explosio*, una explosión es aquello que se produce cuando se libera violentamente una cierta dosis de energía que estaba atrapada en un espacio reducido, generando un repentino aumento de la presión y haciendo que se desprenda luminosidad, gas y calor⁷.

HIDROCARBURO: Son todos aquellos compuestos que resultan de la combinación de los elementos químicos carbono e hidrógeno. Los hidrocarburos surgen en la naturaleza y por ende son los principales compuestos de la química orgánica, siendo sus máximos representantes el petróleo (hidrocarburo en estado líquido) y el gas natural (hidrocarburo en estado gaseoso)⁸.

IMPACTO AMBIENTAL: Por impacto ambiental se entiende el efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. El concepto puede extenderse, con poca utilidad, a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente, es la alteración de la línea de base (medio ambiente), debido a la acción antrópica o a eventos naturales⁹.

INCENDIO: Del latín *incendĭum* es el fuego de grandes proporciones que destruye aquello que no está destinado a quemarse. El surgimiento de un incendio implica

⁵ GUÍA PARA LA PREVENCIÓN DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS CORPORARIÑO – Cultura para la Prevención de Desastres.2005

⁶ Williams-Linera, G. El bosque de niebla del centro de Veracruz: Ecología, Historia y destinos en tiempos de fragmentación y cambio climático. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad y el Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, México. 2007

⁷ Julián Pérez Porto y María Merino. Publicado: 2010. Actualizado: 2014.

⁸ Conceptodefinicion.de, Redacción. (Última edición:25 de julio del 2019). Definición de Hidrocarburos. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/hidrocarburos/>. Consultado el 22 de septiembre del 2019

⁹ Garmendia, A. Salvador, A. Crespo, C. Salvador, L. Evaluación de Impacto Ambiental. 1ª Edición. Pretince Hall: Pearson Education. ISBN: 84-205-4398-5. 2005.

que la ocurrencia de fuego fuera de control, con riesgo para los seres vivos, las viviendas y cualquier estructura¹⁰.

OLEODUCTO: La palabra oleoducto se originó uniendo las palabras latinas “oleum” que significa aceite, y “ductus” que alude a un conducto. Por ello un oleoducto hace referencia a un tubo destinado a que por allí fluya el petróleo o sus derivados, de manera rápida, económica y segura por tierra o agua recorriendo distancias lejanas hacia los puntos de embarque o con destino a las refinerías; menos el gas, que si bien deriva del petróleo su conducción se hace a través de gasoductos¹¹.

PARAMO: En el ámbito de la geografía se define como páramo a un tipo de ambiente el cual se caracteriza por presentar un clima de tipo montañoso intertropical, en donde la mayor parte de las plantas son arbustos. Por lo general este tipo de zona se encuentra localizado a una altura que supera los 2500 metros sobre el nivel del mar y pueden llegar hasta los 5000 metros por encima del mar, otra característica de los páramos es la ausencia de plantas debido a que son ambientes prácticamente desérticos¹².

POLIDUCTO: Líneas de acero que permiten el transporte de una variedad de productos líquidos y se emplea principalmente para el transporte de productos refinados de petróleo¹³

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG): Se definen de forma provisional como sistemas que permiten almacenar datos espaciales para su consulta, manipulación y representación¹⁴.

SUPERFICIE DESLIZANTE: masa viscosa e impenetrable de un producto dispuesto en la superficie de los suelos, o superficie del mar, con espesor de varios centímetros o pocos micrómetros, expuesta a agentes externos, generada principalmente por compuestos de hidrocarburos ¹⁵

¹⁰ Julián Pérez Porto y María Merino. Publicado: 2010. Actualizado: 2014.

¹¹ De Conceptos.com Copyright © 2019. Privacidad

¹² Conceptodefinicion.de, Redacción. (Última edición:30 de julio del 2019). Definición de Páramo. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/paramo/>. Consultado el 21 de septiembre del 2019

¹³ ASME B31.4, “Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids. 2002

¹⁴ Tomlinson, R., 2003. Thinking about GIS. Geographical Information System Planning for Managers, ESRI Press, 283 pp. WADSWORTH99:

¹⁵ NOAA / API / USCG / EPA, 2001. Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments. Dept Comercio de los EEUU, NOAA, American Petroleum Institute, US Coast Guard, US Environ. Protection Agency, 77pp.

VÍAS: Área destinada al tránsito público, vehicular o peatonal, o afectada por él, que compone la infraestructura vial de la ciudad y que comprende, avenidas, calles, carreras, transversales, diagonales, calzadas, separadores viales, puentes vehiculares y peatonales o cualquier otra combinación de los mismos elementos que puedan extenderse entre una y otra línea de las edificaciones.¹⁶.

VULNERABILIDAD: La vulnerabilidad es la incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante, o la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre¹⁷.

ZONIFICACIÓN: Zonificación. Identificación y delimitación de áreas con características comunes. Clasificación de usos que se realizan dentro de las unidades territoriales, conforme a un análisis previo de sus aptitudes, características y cualidades abióticas, bióticas y antrópicas¹⁸.

¹⁶ Fraume, N. Diccionario Ambiental. Ecoe Ediciones. ISBN 978-958-648-462-9. CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango. 2006

¹⁷ Cutter, S, "Vulnerability to environmental hazards", Progress in Human Geography, 1996. vol. 20, no. 4, pp. 529-539

¹⁸ Cardozo, R. y Quintero, Q. 2000. Zonificación agrícola como herramienta básica para el ordenamiento ambiental de un territorio (caso: Toluviejo-Sucre). Universidad Nacional de Colombia.

RESUMEN

Los derrames de hidrocarburos en el mundo, son considerados como uno de los mayores desastres provenientes de las actividades antrópicas y socioeconómicas, por los impactos significativos que se generan en el ecosistema, ya que altera considerablemente cada uno de los componentes medioambientales que hacen parte del área afectada.

La inclusión de la vulnerabilidad a una metodología de análisis multicriterio, ha permitido describir las alteraciones y los daños que pueden provocar los derrames de un poliductos u oleoductos sobre el medio ambiente, donde en conjunción con los Sistemas de información Geográfica, y el procesamiento de datos espaciales se visualice de forma clara y objetiva las consecuencias de un posible derrame de hidrocarburo en un área natural.

En el desarrollo de la metodología para el análisis de la vulnerabilidad, la interpretación de los resultados estaba directamente relacionada a las características de cada uno de los criterios y alternativas evaluadas en el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), y a la presión que ejercía el paso de un poliducto u oleoducto en medio ambiente, donde a través de la simulación frente a un posible derrame de hidrocarburo, se cuantifica la vulnerabilidad de los elementos y factores ambientales, generando un resultado objetivo frente al estado del medio ambiente y los posibles daños generados.

Los resultados de la priorización de criterios para cuantificar la vulnerabilidad, se analizaron mediante la aplicación de herramientas espaciales, donde a través del uso de Sistemas de Información Geográfica, permitió definir las áreas vulnerables, teniendo en cuenta las características de cada uno de los factores involucrados, y así poder determinar de forma espacial, las consecuencias que acarrearía un posible derrame de hidrocarburos en el medio ambiente.

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad, Derrame de hidrocarburo, Sistemas de Información Geográfica (SIG)

1. INTRODUCCIÓN

La industria de hidrocarburos en Colombia, es una de las más dinámicas, en comparación a otros frentes de producción minera. Los hidrocarburos se han convertido en elementos fundamentales para el desarrollo de la sociedad, en el ámbito económico, político, ambiental y social. Sin embargo, su explotación, junto con las características topográficas y climatológicas de Colombia, se han convertido en una amenaza para el medio ambiente, ya que son elevadas las probabilidades de un derrame, que de forma directa o indirecta tiene efectos tóxicos sobre la fauna, flora, cuerpos de agua y la población en general. Estas alteraciones provocan interferencia en la reproducción, crecimiento y comportamiento de los animales. Afectan los sistemas radiculares provocando la caída de hojas y muerte de árboles. Adicionalmente, provoca pérdidas económicas y migración de la población afectada, debido a la dificultad para eliminar de forma rápida el contaminante, el cual provoca impactos de corto, mediano y largo plazo.

La falta de estudios que integrarán las variables del medio ambiente, no permitía analizar la vulnerabilidad considerando la complejidad del espacio geográfico, para lo cual se requería el establecimiento de una metodología con base en el uso de sistemas de información geográfica, que determinara el grado de vulnerabilidad de los hábitats con influencia directa o indirecta con poliductos y oleoductos, mediante la valoración de los impactos generados en las poblaciones y en los ecosistemas naturales, por la extracción y un posible derrame de hidrocarburos.

Como medida para realizar un posible análisis predictivo de los impactos generados por este fenómeno, el análisis espacial con sistemas de información geográfica ha sido una de las herramientas más utilizadas para determinar los tramos que podrían causar mayor afectación al medio ambiente, mediante la simulación de posibles derrames superficiales, por lo tanto esta metodología permitió analizar los elementos del medio que se encontraban a lo largo de un ducto, teniendo en cuenta la interacción entre cada uno de ellos. Para realizar un análisis integrado de los factores ambientales y su relación con el medio, se priorizaron los elementos del ecosistemas y las posibles causas mediante el uso de la metodología de Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) propuesto por Tomas Saaty para determinar cuál es la interacción de cada uno de los elementos con la tubería, por lo tanto, con esta propuesta se desarrolló una metodología para el análisis de vulnerabilidad ambiental ante un posible derrame proveniente de los poliductos y oleoductos, contemplando los factores Biótico, abiótico y Socioeconómico.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para el análisis de vulnerabilidad ambiental ante un posible derrame de poliductos y oleoductos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y clasificar los elementos del territorio considerando su sensibilidad ambiental ante derrames.
- Establecer criterios para la sobreposición espacial de los elementos del territorio identificados.
- Diseñar una herramienta en un software de Sistemas de Información Geográfica para la sobreposición espacial y elaboración de mapas de vulnerabilidad ambiental.
- Elaborar un mapa de vulnerabilidad ambiental ante posibles derrames para un oleoducto o un poliducto en el territorio colombiano.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La industria de hidrocarburos en Colombia, hoy en día es una de las más dinámicas, en comparación a otros frentes de producción minera. Los hidrocarburos se han convertido en elementos fundamentales para el desarrollo de la sociedad, ya que no se limita al ámbito económico, sino que también aborda la política, el ambiente y el factor social de una sociedad¹⁹.

La producción de hidrocarburos en cuanto a cobertura geográfica se encuentra en cuencas sedimentarias y abarca aproximadamente 646.000 km² lo que equivale al 40% del territorio nacional. Esta se encuentra distribuida a lo largo de todas las regiones naturales del país, incluida la plataforma continental de los océanos atlántico y pacífico²⁰.

La localización geográfica y las características climatológicas de Colombia, la convierten en una nación con una gran biodiversidad²¹, por lo tanto, es un país potencialmente vulnerable a eventos de origen antropogénico y natural, que aumentan la probabilidad de impacto debido a un eventual derrame de hidrocarburos, ya que la infraestructura de la actividad minera, coincide con las áreas limítrofes de los Parques Nacionales Naturales (PNN).

Los impactos generados por el derrame de hidrocarburos ocasionan efectos tóxicos sobre la fauna y la flora debido a la composición fisicoquímica, provocando la variabilidad de los sistemas biológicos. Estas alteraciones provocan interferencia en la reproducción, crecimiento y comportamiento de los animales. Afectan los sistemas radiculares provocando la caída de hojas y muerte de árboles. Adicionalmente, provoca pérdidas económicas y migración de la población afectada. La magnitud del daño ocasionado se refleja por la cantidad de hidrocarburo derramado, ya que una pequeña cantidad de hidrocarburo en un área

¹⁹ Martínez, A. Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. Fedesarrollo. 2012.

²⁰ ANH. Indicadores de gestión y estadísticas de la industria a febrero 28 de 2011.

²¹ Andrade-C., M. G. Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ambiente-política. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 2011a. 35 (137): 491-507, ISSN 0370-3908

vulnerable puede ocasionar un daño mucho mayor que una gran cantidad de derrame en un área poco vulnerable²².

Algunos estudios realizados por la defensoría del pueblo, han determinado que en Colombia el derrame de hidrocarburos es once veces más que el derrame que se produjo en 1989 por parte del buque petrolero Exxon Valdez, en Alaska, catalogado como el incidente con mayor contaminación e impacto ambiental en el mundo, cuyos efectos no han sido remediados en su totalidad²³.

Los derrames de hidrocarburos en nuestro país se producen de forma accidental producto de la falla y el deterioro de la infraestructura utilizada, pero la mayoría se le atribuye a la voladura de oleoductos por parte de los grupos armados presentes en Colombia según la defensoría del pueblo^{24,25}

El análisis espacial con sistemas de información geográfica ha sido una de las herramientas más utilizadas para determinar los tramos que podrían causar mayor afectación al medio ambiente, mediante la simulación de posibles derrames superficiales. Esta metodología permite analizar los elementos del medio que se encuentran a lo largo del ducto, sin tener en cuenta la interacción que hay entre ellos. Para realizar un análisis integrado de los factores ambientales, se deben complementar las metodologías con métodos ya existentes para poder determinar cuál es la interacción de cada uno de los elementos con la tubería.

La falta de estudios que integren las variables del medio ambiente y permitan analizar la vulnerabilidad considerando la complejidad del espacio geográfico, requiere el establecimiento de una metodología que en base al uso de sistemas de información geográfica, determine el grado de vulnerabilidad de los hábitats que tengan influencia directa o indirecta con poliductos y oleoductos, mediante la valoración de los impactos generados en las poblaciones y en los ecosistemas

²² Etter, A., C. McAlpine & H. Possingham. Historical Patterns and Drivers of Landscape Change in Colombia Since 1500: A Regionalized Spatial Approach. *Annals of the Association of American Geographers*. 2008.98(1): 2-23.

²³ Ruiz Correa, J. "Crímenes ecológicos de EXXON siguen impunes por retardo del sistema judicial de EEUU que pretende quebrar a PDVSA", "Revista del Sur", 2004. Edición marzo-abril, Nº149.

²⁴ Andrade, G. I., Franco, L., & Delgado, J. Socio-ecological barriers to adaptive management of Lake Fúquene, Colombia. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2012. 7(3) 251-260

²⁵ Franco, L., Useche, D. C., y Hernández, S. Biodiversidad y el cambio antrópico del clima: ejes temáticos que orientan la generación de conocimiento para la gestión frente al fenómeno. *Ambiente y Desarrollo*. 2013. 17(32), 79-96.

naturales, por la extracción y un posible derrame de hidrocarburos, por lo cual esta investigación pretende responder la siguiente pregunta:

¿De qué manera se pueden integrar la modelación de derrames de hidrocarburos, y la evaluación de la vulnerabilidad en una metodología para clasificar poliductos y oleoductos en función del impacto sobre el medio ambiente?

3.2. JUSTIFICACIÓN

La extracción de hidrocarburos en Colombia, ha generado en sus diferentes etapas impactos ambientales, contaminación y cambios en los factores biótico, abiótico y socioeconómico. Los efectos del hidrocarburo sobre cada uno de los factores, pueden ser causados, bien sea por sus propiedades físicas o por sus componentes químicos, generando gran preocupación, ya que a menudo los derrames accidentales causan contaminación de los hábitats y los cuerpos de agua. Por lo tanto, se requiere la formulación de nuevas metodologías, para el análisis de los efectos que de forma directa o indirecta pueda afectar los ecosistemas y la población en general.

Adicionalmente en el país no se han desarrollado herramientas que aporten información para evaluar la vulnerabilidad de todos los factores frente a los impactos ambientales, producto de los derrames de hidrocarburos. Por lo tanto, se hace necesario el desarrollo de una metodología que mejore el estudio frente a esta problemática y aporte al desarrollo de nuevo conocimiento en el país.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. ZONA DE ESTUDIO

Colombia es un país tropical que se encuentra en la esquina noreste de Suramérica. Es una república constitucional que tiene una superficie de 1.141.748 km². La cual está dividida en 32 departamentos, que se subdividen en 1122 ciudades o municipios²⁶. Diez de estos municipios han sido designados como distritos debido a una característica distintiva relacionada con la política, el sector comercial, la historia, su estructura paisajística, la cultural, la industrial y su importancia ambiental. Colombia se extiende desde los 4° 13´ 30" de latitud sur, hasta los 12° 27´46" de latitud norte; y desde los 66° 50´54" al occidente del meridiano de Greenwich por el oriente, hasta los 79° 0´23" del mismo meridiano, por el occidente²⁷.

En la superficie del territorio podemos encontrar sistemas montañosos, llanuras y valles. Si bien casi el 67% del territorio presenta un relieve plano, aproximadamente el 70% de la población se concentra en las zonas montañosas, debido a factores como el clima, la calidad del suelo y la presencia de las ciudades más importantes. La cordillera de los Andes atraviesa el territorio colombiano de sur a norte, y está conformada por tres cadenas montañosas paralelas entre sí: las cordilleras Oriental, Central y Occidental. Entre las cordilleras se encuentran los valles de los ríos Magdalena que se encuentra entre las cordilleras Central y Oriental y el valle del río Cauca que se encuentra entre las cordilleras Central y la Occidental. Colombia cuenta con sistemas montañosos que están separados del sistema andino. Entre los más conocidos están: la Sierra Nevada de Santa Marta, ubicada en la llanura del mar Caribe con una altura aproximada de 5.775 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m); la serranía de la Macarena considerada como una zona de reserva natural ubicada en el departamento del Meta; y la serranía del Baudó ubicada en el departamento del Chocó paralela a la costa del Pacífico²⁸.

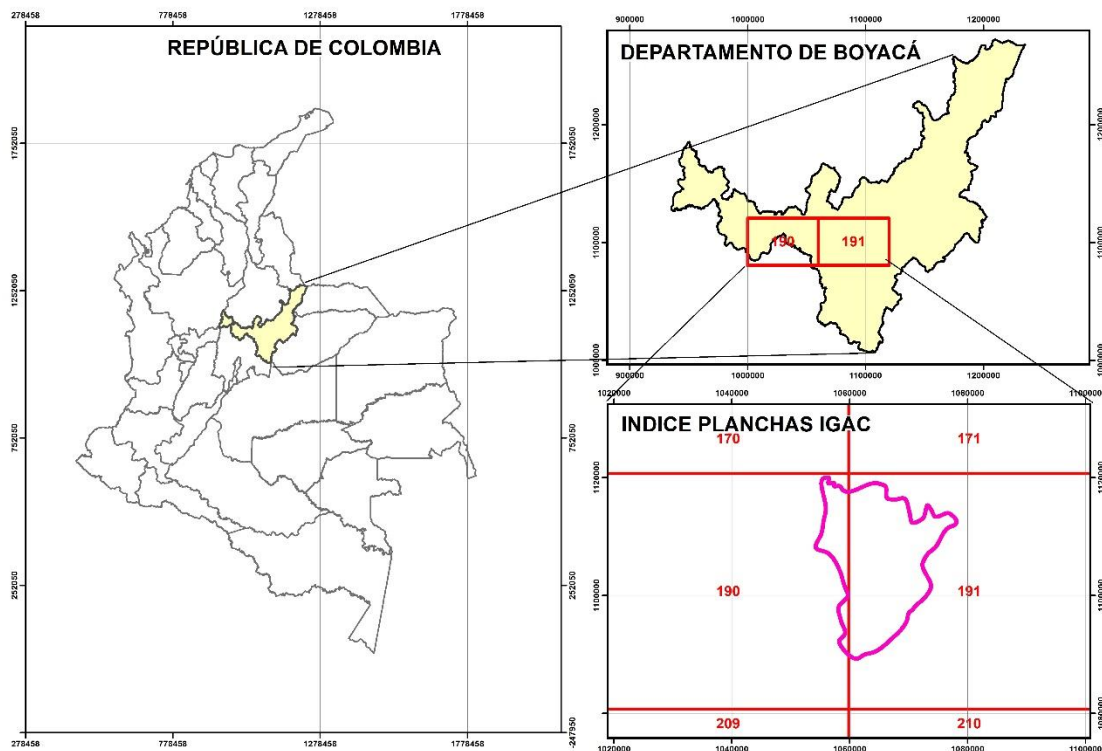
²⁶ División político administrativa. Conceptos básicos. DANE. Consultado el 30 de noviembre de 2019.

²⁷ Toro J. Constructive analysis of the process of Environmental Impact Assessment in Colombia. Proposals for improvement (in Spanish). PhD Dissertation. Granada (Spain): University of Granada, 2009.

²⁸ Hernández, Alexander Ed. Ciencias sociales, geografía. Nuevos territorios 6. Bogotá: Vincens Vives. 2005

La zona seleccionada para el presente estudio corresponde a la plancha 191 según la clasificación del IGAC-COLOMBIA (Figura 1), compuesta principalmente por los municipios de Tunja, Samacá, Ventaquemada, Cóbbita, Toca, Sotaquirá, Siachoque, Tuta, Chiquiza y Soracá. Antiguamente se presentaban caseríos de tipo chibcha de donde se consideraba a Soracá como la “Mansión Regia” ya que era la sede de los Caciques²⁹.

Figura 1: Localización zona de estudio - plancha 191



Fuente: Autor

Esta zona está situada dentro de la cordillera oriental comprendiendo partes de los departamentos de Santander y Boyacá, la cual ha tenido una importancia por el hallazgo de fósiles del Cretáceo en la región de Villa de Leiva.

En esta plancha se puede ubicar La Serranía de La Alfombra con alturas que llegan a los 3600 msnm, la depresión de Pesca-Rondón con la presencia de los ríos Pesca

²⁹ Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Soracá

y Tota los cuales se ensanchan hacia el noreste y los del Mueche y Fuche que desembocan en la vertiente del Orinoco a través del río Lengupá. Así mismo se puede encontrar la Serranía de los páramos de Siachoqué y de Las Tronadoras. Hacia el sur y este del valle de Turmequé, se encuentra la depresión del Río Chicamocha el cual desemboca al Río Magdalena. La Serranía de Arcabuco que nace en las inmediaciones de Villa de Leiva para ampliarse a medida que se dirige al noreste, la pequeña Sierra de Loma blanca que separa a los ríos Gambita y Riachuelo los cuales bañan la depresión del río Suarez³⁰.

En el área de estudio predominan las unidades sedimentarias con potencial para almacenar y movilizar aguas subterráneas (acuíferos); y, en menor proporción, se encuentran materiales impermeables (acuitardos) y un complejo ígneo – metamórfico (acuifugas) que no tienen interés hidrogeológico. Los acuíferos tienen porosidad primaria y/o secundaria y son del tipo libres a confinados, en unidades del Cuaternario, y libres a semiconfinados, para el resto de unidades; la vulnerabilidad de los acuíferos varía de extrema a alta, siendo los depósitos Cuaternarios los más vulnerables³¹.

Estratigráficamente en la Formación Cuche se hace evidente la actividad prehistórica en base a los hallazgos realizados en lo ancho y largo del valle de Villa de Leiva así como en zonas circunvecinas, estos datan principalmente del Cretáceo principalmente en la Cuenca de Sogamoso y la Cuenca Terciaria de Sogamoso. En cuanto a la geomorfología la Formación Montebel presenta una sucesión de argelitas y areniscas de tonos rojo-violeta a amarillo-crema con un espesor entre 300 y 400 metros. En el camino de Palermo a Paipa sobre la vertiente derecha de la quebrada Las Varas se encuentran Shales negros alternando con limolitas grises verduscas, así como limolitas ocreas a rojizas con intercalaciones de areniscas arcillosas grises, blancuzcas junto con restos de vegetales y lamelibranchios. La Formación La Rusia predomina la presencia de areniscas con colores como blanca y verde, junto con lentes de arcilla hacia la parte alta. La Formación Arcabuco está constituida principalmente por capas de arenisca cuarzosa blanca con intercalaciones de Shales rojos los cuales a veces llegan a formar niveles de 10 a 50 m de grueso. La Formación Cumbre la cual se encuentra en el descenso de la carretera Arcabuco-Moniquira consta de areniscas grises oscuras alternando con

³⁰ Renzoni, G. Geología del cuadrángulo J-12 Tunja. Informe No. 1546. Bogotá. 1967.

³¹ MEDINA, A. M., MONTAÑA, T. R., ROZO, L. F & RIVEROS, M. T. 2011. Cuenca Río Chicamocha. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Duitama

Shales negros al igual que la Formación Paja descrita por la carretera Sáchica-Tunja y la Formación San Gil superior³².

Los ecosistemas más representativos son: Áreas Agrícolas Heterogéneas del Orobioma Medio de Los Andes con 33,08 %, las Áreas Agrícolas Heterogéneas del Orobioma alto de los Andes con 14,7%, las Zonas Urbanizadas del Orobioma Medio de Los Andes ocupando el 4,28 %, el Bosque del Orobioma medio de los Andes con un 5,24, Zonas Urbanizadas del Orobioma alto de los Andes con 4,34 %, y Pastos del Orobioma medio de los Andes con 3,75 %; estos ecosistemas representan el 65,39%. En cuanto a los recursos minerales esta zona presenta arcillas caolínicas, calizas, material de recebo, carbón, arenas aptas para construcción y arcillas aptas para la construcción de ladrillos y tejas. Estas zonas son aptas para la producción de papa, trigo, frutales y pastos para la ganadería³³.

Los Orobiomas de Media Montaña están localizados entre los 1800 y 2800 msnm con temperaturas entre los 12°C y 18°C, denominados Orobiomas Medios de Los Andes, se caracteriza por presentar principalmente tres tipos de clima: frío seco (48%), frío húmedo (34%) y frío muy húmedo 12%; los Orobiomas de Alta Montaña están localizados entre los 2800 y 3200 msnm, con temperaturas entre los 6°C y 12°C denominados Orobiomas Altos de Los Andes³⁴.

Esta área se encuentra en su mayor parte sobre una zona de amenaza sísmica alta tan solo en el centro poblado de Tunja y entre los límites municipales de Sotaquirá y Tuta la amenaza sísmica es media³⁵, se han presentado 63 eventos, desde 1993 hasta el 01 diciembre de 2014, cuyas magnitudes varían de 0,8 a 3,6 y las profundidades de 0 a 178,9, predominando las menores de 56,2 m. Las amenazas por remoción en masa son entre alta y muy alta principalmente en las cercanías de Tunja, en cuanto a las inundaciones la zona no presenta condiciones para que se presente este tipo de afectación.³⁶

Con respecto a la clasificación de los bosques, en esta zona se tienen:

³² Hubach. Informe del S.G.N 1212 pág. 49. 1957.

³³ Ramírez, o. Zonificación Geotécnica de Tunja. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1990

³⁴ Felicísimo, A. Ramirez, M. Posada, E. FORCLIM, Bosques y Cambio Global. Red Temática CYTED 408RT0338. Volumen 2. Colombia-Ecuador. 2011

³⁵ INGEOMINAS & UNAL. Mapa Nacional de Amenaza Sísmica, periodo de retorno 475 años. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá. 2010.

³⁶ CEV. Lineamientos para la elaboración de EIA Corredor 5, Transversales Cusiana-Carare-Boyacá. Tramo Tunja-Sogamoso. Capítulo 3. 2015.

Bosque húmedo montano (bh-M) el cual se caracteriza por presentar lluvias durante todo el año, no son excesivas, durante el día la temperatura es templada enfriándose durante la noche, predominan los paisajes ondulados y pendientes. Es una de las áreas donde se ha establecido gran parte de la población por lo tanto la vegetación natural se encuentra alterada, reemplazándose los bosques por cultivos y pastos.

Bosque húmedo montano bajo (bh-MB) este se caracteriza por poseer un clima suave con lluvias durante todo el año las cuales no son excesivas, la temperatura es templada durante el día pero durante la noche es fría en épocas de verano dichas oscilaciones de temperatura dan paso a la formación de heladas y escarchas; predominan los paisajes ondulados y pendientes aunque también hay vallecitos, la vegetación natural ha sido muy alterada reemplazándose el bosque natural por coberturas agrícolas y de pastos.

Bosque muy húmedo montano (bmh-M) se caracteriza por encontrarse ubicada donde las laderas de las cordilleras se encuentran expuestas a masas de aire húmedo, las cuales producen abundantes lluvias que se prolongan durante todo el año, siendo frecuentes allí las neblinas espesas y nubes bajas, en esta formación predomina el relieve bastante pronunciado, encontrándose montañas. En estas zonas aún hay bosques naturales sin embargo están en proceso de desaparición debido a la expansión ganadera.

Bosque seco montano bajo (bs-MB): Los límites climáticos generales son una temperatura media entre 12 - 18°C y un promedio anual de lluvias entre 500 - 1.000 mm. La afectación antrópica ha disminuido la vegetación nativa. Los suelos de esta formación son muy productivos³⁷.

Con respecto a flora se cuenta con variedad de pastos, arbustos y zonas arbóreas nativas, en cuanto a la fauna se cuenta con especímenes silvestres como zorro (*Potos florus*), comadreja colombiana (*Mustela felipei*), Fara (*Delphis albiventris*), Conejo Silvestre (*Silvilagus sp.*), Ratón montaño (*Thomasomys aureus*), Murciélago lengüilargo (*Anoura geoffroyi peruana*), colibrí (*Phaethormis sp.*), Turpial Toche (*Icterus chrysater girauddi*), Halcón Dorado (*Falco sparverius*), Paloma (*Columba fasciata*), Búho de Montaña (*Otus sp*), Lechuza Común (*Tyto alba*),

³⁷ Cuatrecasas, J.. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Pérez-Arbelaezia, 2, 147-283. 1989.

Lagartija (*Proctoporus striatus*), Ranas y Sapos (*Atelopus sobornatus*, *Atelopus ebenoides marynkeyi*, *Colosthetus subpunctatus*, *Eleuterodactylus bogotensis*)³⁸.

En general Boyacá se ha visto beneficiada por las regalías que representa la explotación de hidrocarburos principalmente proveniente de Miraflores, y cabe resaltar que aunque en la zona de estudio previamente mencionada aunque no existe un punto de explotación el territorio es usado para el transporte tanto del crudo como con la línea Caño Limón Coveñas, el Poliducto Andino y Central de Los Llanos como líneas de gasoducto Centro Oriente las cuales estas últimas además de beneficio particular favorecen un beneficio general tanto para el departamento como incluso la nación. Dentro de los beneficios por regalías se tiene la construcción de redes de acueducto y alcantarillado en las zonas circunvecinas de Tunja, así como en ámbitos de la salud, educación, recreación, cultura y fortalecimiento institucional³⁹.

El sistema del Poliducto Andino es una infraestructura de transporte, la cual se encarga de conducir nafta desde la Planta Sutamarchán en el departamento de Boyacá, hasta la Planta Monterrey en el departamento de Casanare. En su recorrido de 139,431 kilómetros atraviesa los departamentos de Boyacá y Casanare, a lo largo de quince (15) municipios. El Poliducto Andino cuenta en la Planta Sutamarchán con una trampa de raspadores por cambio de diámetro de la tubería de 12"; en la Planta de Miraflores cuenta con una válvula reductora de presión, trampa de raspadores, un tanque de relevo de 5000 bbl y un tanque sumidero⁴⁰.

El término nafta es usado para describir una clase de mezcla de hidrocarburos obtenidos de la destilación del petróleo. Presenta un color transparente a pálido amarillo y olor similar a la gasolina / kerosene. La nafta es usada en la industria petroquímica como solvente, en la elaboración de barnices, adhesivos, revestimientos. En el caso específico de la nafta que transporta Ecopetrol, se usa para diluir crudos pesados y facilitar el proceso de transporte⁴¹.

³⁸ Esquema de Ordenamiento Territorial. Municipio de Motavita. Acuerdo No 022 / 2000.

Esquema de Ordenamiento Territorial. Municipio de Combita. Acuerdo No 018 / 2001.

Plan de Ordenamiento Territorial. Municipio de Tunja. Acuerdo No 0014 / 2001

³⁹ <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-274005>

⁴⁰ Cenit. Planes de emergencia sistemas de transporte de hidrocarburos departamento O&M. Poliducto Miraflores. 2018.

⁴¹ Cenit. 2018. Planes de emergencia sistemas de transporte de hidrocarburos Departamento O&M Casanare.

Es importante tener presente que a pesar de las demandas e inconformidades de la población civil parte de este poliducto bordea la zona de paramos, por lo que de presentarse algún incidente las superficies deslizantes así como los incendios y explosiones pueden afectar con pérdidas irremplazables la vegetación nativa de estas zonas al igual que las afectaciones que se puedan presentar por parte de la nafta en los cuerpos de agua ya que debido a su contenido de aromáticos y solubilidad generan ecotoxicidad en organismos acuáticos, igualmente puede afectar el suelo ya que la baja viscosidad y tensión superficial favorece su infiltración ⁴².

4.2. VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es descrita como el grado de sensibilidad física, biótica y socioeconómica y cultural frente a una actividad antrópica o un evento natural. Es usada como una herramienta que reduce la incertidumbre de los datos que se analizan frente al daño o exposición de un aspecto ambiental, ya que se basa en indicadores ambientales, y no depende exclusivamente de las ponderaciones elaboradas por los evaluadores. La vulnerabilidad ambiental también se determina por el estado de los indicadores de los sitios, donde se ejecutan las actividades y proyectos que generan perturbaciones al medio ambiente. La vulnerabilidad, reduce la subjetividad en los resultados obtenidos, ya que la interpretación está influenciada por la presión de los proyectos sobre cada uno de los componentes del medio ambiente, por lo que resulta importante para la comprensión de alteraciones que se generan en el ambiente.

La vulnerabilidad es una herramienta que se usa para analizar los problemas ambientales^{43,44,45,46,47,48}. Se aplica en el análisis de problemas que surgen en la

⁴²<http://www.oilwatchesudamerica.org/petroleo-en-sudamerica/colombia/4566-colombia-metase-el-petroleo-por-el-tubo-.html>

⁴³ Adger WN. Vulnerability. *Glob Environ Chang* 2006;16:268–81.

⁴⁴ Füssel H. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. *Glob Environ Chang* 2007;17:155–67.

⁴⁵ Gallopín G. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environ Chang* 2006;16:293–303.

⁴⁶ Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environ Chang* 2006;16:282–92.

⁴⁷ Tran L, O'Neill R, Smith E. Spatial pattern of environmental vulnerability assessment in the Mid-Atlantic Region, USA. *Appl Geogr* 2010;30:191–202.

⁴⁸ Turner II B. Vulnerability and resilience: coalescing or paralleling approaches for sustainability science? *Glob Environ Chang* 2010;20:570–6.

economía, la sociología, la ecología, la agricultura, el cambio climático y los riesgos naturales. La vulnerabilidad es también una expresión de cómo el entorno natural y humano puede responder a eventos externos^{49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59}.

La vulnerabilidad en términos más generales se define como la susceptibilidad a daños, debido a la sensibilidad o a la exposición de un sistema, personas y lugares a los impactos, o perturbaciones y la capacidad del sistema para adaptarse a condiciones cambiantes^{60, 61, 62}.

Según Gallopin en el año 2006, el término vulnerabilidad lo considera como el potencial de cambio o transformación de los sistemas sometidos a perturbaciones, donde la vulnerabilidad biofísica, y la vulnerabilidad social está asociado a las características de cada uno de los elementos del ecosistema.

⁴⁹ Adger WN. Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam. *World Dev* 1999;27:249–69.

⁵⁰ Becker H. Social impact assessment. *Eur J Oper Res* 2001;128:311–21.

⁵¹ Berry PR, Rounsevell, Harrison P, Audsley E. Assessing the vulnerability of agricultural land use and species to climate change and the role of policy in facilitating adaptation. *Env Sci Policy* 2006;9:189–204.

⁵² Burdge R, Fricke P, Finsterbusch K, Freudenburg W, Gramling R, Holden A, Llewellyn L, Petterson J, Thomson J, Williams G. Guidelines and principles for social impact assessment. *Environ Impact Assess Rev* 1995;15:11–43.

⁵³ Cutter S, Boruff B, Shirley W. Social vulnerability to environmental hazards. *Soc Sci Quart* 2003;84:242–61.

⁵⁴ Downing T, Butterfield R, Cohen S, Huq S, Moss R, Rahman A. *Climate change vulnerability: linking impacts and adaptation*. Oxford: University of Oxford; 2001.

⁵⁵ Metzger M, Rounsevell M, Acosta-Michlik L, Leemans R, Schröter D. The vulnerability of ecosystem services to land use change. *Agric Ecosyst Environ* 2006;114: 69–85.

⁵⁶ Smith E, McKinnis P, Tran L, O'Neill R. The effects of uncertainty on estimating the relative environmental quality of watersheds across a region. *Landscape Ecol* 2008a;21:225–31.

⁵⁷ Smith W, Zollner P. Sustainable management of wildlife habitat and risk of extinction. *Biol Conserv* 2005;125:287–95.

⁵⁸ Turner II B, Matson P, McCarthy J, Corell R, Christensen L, Eckley N, Hovelsrud-Broda G, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc Natl Acad Sci* 2003;100:8074-9.

⁵⁹ Wei Y, Fan Y, Lu C, Tsai H. The assessment of vulnerability to natural disasters in China by using the DEA method. *Environ Impact Assess Rev* 2004;24:427–39.

⁶⁰ Kelly P, Adger WN. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Clim Chang* 2000;47:325–52.

⁶¹ Luers A, Lobella D, Sklar L, Addams L, Matson P. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Glob Environ Chang* 2003;13:255–67.

⁶² Smith B, Pilifosova O. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Clim Chang* 2002;45:223–51.

4.3. ANÁLISIS MULTICRITERIO

El análisis multicriterio es un conjunto de técnicas, modelos, métodos y herramientas que tiene como objetivo mejorar la calidad integral de los procesos de decisión en cuanto a la efectividad, eficacia y eficiencia y así incrementar el conocimiento de los mismos. El uso de estas técnicas permite la realización de una resolución más realista y a la vez mas practica sin tener en cuenta otros factores que arrojan resultados herrados⁶³. Este análisis compara las alternativas que pueden ser tanto cualitativas como cuantitativas, por medio de puntuaciones que se obtienen de diferentes criterios^{64,65}.

4.4. PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (PAJ)

El proceso de análisis jerárquico, fue desarrollado por Thomas Saaty a finales de los años 60 quien, a partir de su experiencia docente e investigaciones de tipo militar, diseño una herramienta que facilitaría la toma de decisiones frente a un tema en particular, la cual ha sido aplicada y es la base de muchos paquetes de software para los procesos de tomas de decisiones complejas.

El PAJ es una metodología para estructurar, medir y sintetizar datos, donde se evalúan alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios, y está basado en el principio de la experiencia y el conocimiento de los actores

⁶³ Moreno, José M. El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. Universidad de Zaragoza. 2000

⁶⁴ Belacel, N. Multicriteria assignment method PROAFTN: Methodology and medical application. European Journal of Operational Research. 2000. 125(1), 175–183

⁶⁵ Smith, Q.R., Mesa, S.O., Dyner, R.I., Jaramillo, A.P., Poveda, J. G. y Valencia, R.D. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbres. Medellín, Colombia: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2000.

involucrados y los datos utilizados en el proceso los datos utilizados en el proceso^{66,67,68,69,70,71}.

El Proceso de análisis jerárquico utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior.

Cuando las prioridades de los elementos en cada nivel se tienen definidas, se agregan para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión.

El procedimiento para usar el PAJ puede ser resumido en las siguientes premisas: El primer paso del PAJ consiste en modelar el problema de decisión que se pretende resolver como una jerarquía, la toma de decisiones es un proceso de selección entre cursos alternativos de acción, basado en un conjunto de criterios, para alcanzar uno o más objetivos (Figura 2).

- Establecer prioridades de los elementos de la jerarquía haciendo una serie de juicios basados en comparaciones por pares de elementos.
- Sintetizar los juicios para producir un conjunto de prioridades globales de la jerarquía.
- Revisar la consistencia de los juicios.
- Llegar a una decisión final basada en los resultados de este proceso⁷².

⁶⁶ Subramaniam, V. Lee K. Dynamic selection of dispatching rules for job shop scheduling. *Production Planning and Control*. 2000. Vol 11, No 1, pp. 73-81.

⁶⁷ Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Evaluación ambiental comparativa de dos sitios considerados para la ubicación del nuevo aeropuerto internacional de la ciudad de México. Julio 2001.

⁶⁸ Frei F. Harker P. Measuring aggregate process performance using AHP. Working Paper. The Wharton School. University of Pennsylvania .1998.

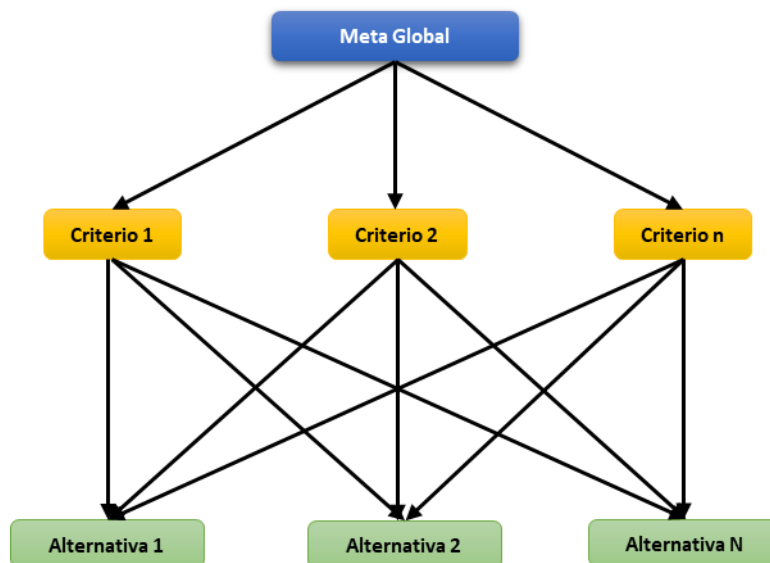
⁶⁹ Fulcrum Ingeniería Ltda. Proyectos y Asesorías con el Analytic Hierarchy Process (AHP). Chile. 2000

⁷⁰ Asma M. A. Bahurmoz. The Analytic Hierarchy Process at Dar Al-Hekma, Saudi Arabia. *Interfaces*, Vol. 33, No. 4, July–August 2003, pp. 70–78

⁷¹ Bascetin A. An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine. Technical note. *Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. Vol 113, No 3. septiembre 2004 pp. 192 – 199

⁷² SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int J. Services Sciences*. Vol 1 No .1, University of Pittsburgh, USA 2008.

Figura 2. Esquema proceso de análisis jerárquico.



Fuente: Saaty. 2008.

Una vez revisadas estas tres funciones básicas y para completar la visión acerca de la base sobre la cual se establece el AHP, es importante conocer los principios y axiomas de esta metodología.

4.4.1. Principios:

- El principio de Descomposición

Para resolver la complejidad, el AHP permite estructurar un problema complejo en subproblemas jerárquicos con dependencias de acuerdo con el nivel de descomposición en el que se encuentren (Tabla 1).

Tabla 1. Escalas de comparación de Saaty.

ESCALA	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	Igualmente preferida	Los dos criterios contribuyen igual al objetivo
3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen un poco a un criterio frente al otro
5	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio frente al otro
7	Muy fuertemente preferida	Un criterio es favorecido muy fuertemente sobre el otro. En la práctica se puede demostrar su dominio
9	Extremadamente preferida	La evidencia favorece en la más alta medida a un factor frente al otro

Fuente: Saaty. 2008.

Los valores 2, 4, 6 y 8 se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores.

Estos son valores intermedios de preferencia⁷³.

➤ Juicios Comparativos:

Permite realizar combinaciones en parejas de todos los elementos de un sub-grupo con respecto al criterio principal del subgrupo, por ello se habla de comparaciones biunívocas.

➤ Composición Jerárquica o Síntesis de prioridades:

Permite producir prioridades globales a través de las multiplicaciones de las prioridades locales, es decir, que una vez se tienen soluciones locales, se agregan para obtener la solución general que se está buscando.

⁷³ Saaty, Thomas. How to make a decision: the analytic hierarchy process. University of Pittsburgh. 1994 12

4.4.2. Axiomas

➤ Axioma recíproco

Si frente a un criterio, una alternativa A es n veces mejor que B, entonces B es 1/n veces mejor que A. Este principio es utilizado en el análisis matricial que se realiza a los criterios y las alternativas. Garantiza que el análisis se haga de manera bidireccional.

➤ Axioma de homogeneidad

Los elementos que son comparados no deben diferir en mucho en cuanto a la característica de comparación establecida.

➤ Axioma de la síntesis

Los juicios acerca de las prioridades de los elementos en una jerarquía no dependen de los elementos del nivel más bajo. Este axioma es rebatible y en algunos análisis no se aplica puesto que puede ser posible que exista dependencia de la importancia de un objetivo con el nivel más bajo⁷⁴.

4.4.4. Estimación del índice de consistencia

Este índice es útil para determinar si las comparaciones son consistentes; se calcula a partir de un Índice de Inconsistencia Aleatorio (IA) y una Razón de Consistencia (CR), para lo cual dicha razón debe tener un valor <0.10; cualquier valor superior a éste, indica juicios inconsistentes en la matriz de comparaciones⁷⁵.

El índice de consistencia se obtiene mediante la fórmula:

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

⁷⁴ Bryson N. and Mobolurin A. An approach to using The analytic Hierarchy for solving multiple criteria decision making problems. European Journal of Operational Research. 1994

⁷⁵ MALCZEWSKI, Jacek. GIS-Based Multicriteria Decision Analysis: A Survey Of The Literature. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 20, Nº 7. Agosto 2006, pág. 703 – 726.

Dónde, λ_{max} es el valor principal de la matriz de comparaciones; n es el número de criterios usados en la toma de decisión y λ es el valor promedio del vector de consistencia.

Cuándo la matriz de comparación por pares es consistente, se cumple que $\lambda_{max} = n$ y por tanto el CI es igual a cero, en otros casos el valor de CI es positivo. Para superar el problema de la dependencia del índice al orden de la matriz, Saaty propuso una medida normalizada denominada razón de consistencia:

$$CR = \frac{CI}{IA} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde CR es un índice aleatorio para matrices de orden n , definido como el valor esperado del CI asociado a las matrices de orden n y es estimado mediante simulaciones de matrices aleatorias de orden n , donde las entradas de dichas matrices fueron llenadas usando elementos aleatorios del conjunto de valores $\{1, 2, \dots, 9, 1/2, 1/3, \dots, 1/9\}$.

Los valores de CR están en el rango entre cero y uno, donde $CR = 0$ indica una matriz totalmente consistente y $CR = 1$ indica una matriz completamente aleatoria. El criterio de Saaty para aceptar una matriz como consistente es $CR \leq 0,1^{76}$.

4.5. ZONIFICACIÓN AMBIENTAL

La zonificación ambiental es una herramienta valiosa para la planificación y el uso de los recursos naturales, en ella se identifican unidades de manejo ambiental acorde a la tasa de extracción, capacidad de uso, acervo cultural de las comunidades y capacidad de auto recuperación de los ecosistemas⁷⁷.

El análisis integral de los criterios permite la definición de áreas de manejo de ecosistemas estratégicos, recuperación, aprovechamiento sostenible, producción sostenible y zonas urbanas y suburbanas, las cuales dan las pautas para la

⁷⁶ Anderson, David R., D. J. Sweeney y T. A. Williams, An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making, West Publishing Company, Minneapolis, 1994, pp. 390-392. Citado por Vidal Carlos Julio en Material de clase Sistemas de Transporte y Redes de Abastecimiento. Módulo Selección del modo de transporte y transportista. Universidad del Valle. 2004.

⁷⁷ Cardozo, R. y Quintero, Q. Zonificación agrícola como herramienta básica para el ordenamiento ambiental de un territorio (caso: Toluviéjo-Sucre). Universidad Nacional de Colombia. 2000.

definición de las orientaciones de manejo integrado del área, por lo que la zonificación ambiental se constituye como una herramienta para el ordenamiento y manejo del territorio, la cual se basa en la definición e integración de criterios que consideran aspectos biofísicos, socioeconómicos y de gobernabilidad⁷⁸.

La zonificación es una de las herramientas fundamentales con la que cuentan las autoridades ambientales para la conservación y protección de los ecosistemas. Es un proceso de análisis geográfico en el cual se integra información espacial con el propósito de identificar áreas que comparten elementos comunes y que sirven de base para tomar decisiones para el manejo ya que permite establecer de manera clara las potencialidades, fragilidades y sensibilidad ambiental.

El objetivo primordial de una zonificación ambiental es el determinar y espacializar áreas dentro de la cuenca hidrográfica, que conforme a sus potencialidades de utilización, procuren desarrollarse armónicamente bajo los principios de sustentabilidad y de conservación y protección de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, todo esto basándose en la interpretación e integración de los elementos temáticos de diagnóstico, así como los problemas y conflictos ambientales vislumbrados en el área de estudio⁷⁹.

La zonificación se entiende como un instrumento de planificación que facilita la identificación de áreas geográficas con una combinación de características físicas, biológicas, humanas e institucionales, tanto de los componentes terrestres como marinos, que pueden ser interpretadas en términos de objetivos para la gestión. La aplicación de este instrumento debe estar respaldada por información que permita analizar los diferentes procesos ambientales que describen la heterogeneidad y particularidad de la zona⁸⁰.

La oferta ambiental se define como la capacidad actual y potencial para producir bienes y servicios ambientales y sociales en un área según el conocimiento de los elementos físico-bióticos del medio. Este conocimiento permite desarrollar procesos

⁷⁸ Rodríguez, A., Lozano, Pilar, Sierra, Paula. 2012. Criterios de zonificación ambiental usando técnicas participativas y de información: estudio de caso zona costera del departamento del Atlántico. Bol. Invest. Mar. Cost. 41 (1) ISSN 0122-9761 Santa Marta, Colombia.

⁷⁹ CORTOLIMA. Proyecto piloto ajuste parcial a la zonificación ambiental Al plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica Del río Coello. 2018.

⁸⁰ Ortiz-Lozano, L., A. Granados-Barba y I. Espejel. Ecosystemic zonification as a management tool for marine protected areas in the coastal zone: applications for the system arrecifal Veracruzano National Park, Mexico. Ocean Coast. Manag. 2009. 52: 317-323.

productivos específicos manteniendo el equilibrio dinámico entre el clima, el aire, el suelo, la flora, la fauna, el ser humano y sus actividades⁸¹.

Se entiende como criterios, aquellos atributos que caracterizan un ambiente, los cuales se pueden expresar en forma cuantitativa o cualitativa, y su aplicación determina la asignación de categorías de zonificación a las unidades diferenciadas, los criterios son descriptores de la situación general del área: los ecosistemas presentes, su función, los impactos ambientales y socioeconómicos⁸².

Las zonas de especial significancia ambiental incluyen sectores de bosques primarios y secundarios poco intervenidos, reservas hidrológicas y naturales, áreas de sistemas de parques naturales, refugios de fauna y flora, zonas de recarga hidrogeológica, áreas de reserva forestal y zonas de nacimiento de las corrientes de agua y especial protección de aguas subterráneas, áreas alto andinas (páramo, nevados), lagos naturales, humedales, ecosistemas naturales de gran biodiversidad, manglares y márgenes de río y quebradas. Estas áreas incluyen también los ecosistemas cuya estructura no ha sido seriamente degradada y que prestan servicios ecológicos vitales como los bosques de niebla⁸³.

Las zonas de alta fragilidad ambiental Incluyen aquellos lugares donde existe un alto riesgo de degradación, se presenta una posible debilidad de la estructura, que puede originarse en la presencia de elementos críticos muy susceptibles a la acción humana. Estas áreas tienen una dinámica más acelerada, una vez son intervenidas por el hombre, por lo cual requieren una atención oportuna. Se consideran como áreas de alta fragilidad aquellos sectores muy escarpados y quebrados no aptos para actividades agropecuarias, donde abundan los nacimientos de agua, estructuras geológicas falladas y diaclasadas. Por lo general, en un estado inicial aún no presentan deterioro apreciable de los bosques y los suelos como consecuencia de las actividades humanas.

Las áreas de aptitud agraria y desarrollo socioeconómico son zonas donde los suelos presentan aptitud para sustentar actividades económicas, producción

⁸¹ Forst, M. The convergence of integrated coastal zone management and the ecosystems approach. *Ocean Coast. Manag.* 2009.52: 294-306.

⁸² Portman, M. Zoning design for cross-border marine protected areas: The Red Sea Marine Peace Park case study. *Ocean Coast. Manag.* 2007. 50: 499-522.

⁸³ Ortiz-Lozano, L., A. Granados-Barba y I. Espejel Ecosystemic zonification as a management tool for marine protected areas in the coastal zone: applications for the system arrecifal Veracruzano National Park, Mexico. *Ocean Coast. Manag.* 2009. 52: 317-323.

agrícola, ganadera, forestal y faunística (pesca y zootecnia de especies dulceacuícolas, marinas y terrestres) y asentamientos humanos. Se incluyen los sistemas que han resistido la acción humana, manteniendo procesos capaces de producir excedentes económicos. La demanda ambiental está representada por el uso actual y los requerimientos de las comunidades sobre el ambiente biofísico. Sintetiza el conjunto de actividades que realizan los pobladores locales y las formas de apropiación de los recursos agua, aire, suelo, flora, fauna, insumos y servicios⁸⁴.

Las unidades de demanda involucran las formas de aprovechamiento de los recursos naturales y sus posibles impactos en una región determinada. La demanda se establece según: Uso del suelo, del agua, procesos denudativos (erosivos), vegetación, crecimiento de la población. Cada actividad que conlleve al uso de los diferentes recursos representa una demanda diferente de flujos de materia y energía, y estas demandas implican desequilibrio sobre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Las áreas de preservación y protección ambiental son aquellos espacios que mantienen integridad en sus ecosistemas y tienen características de especial valor, en términos de singularidad, biodiversidad y utilidad para el cumplimiento de funciones ambientales⁸⁵.

Por medio del establecimiento de las unidades de uso y cobertura del suelo que dejan entrever como se está utilizando la tierra dentro de la población se correlaciona dicha información con la ya existente pudiendo determinar la zonificación ecológica o de unidades de tierra homogéneas, la cual busca dentro de la evaluación del territorio el conocer la aptitud de las zonas desde el punto de vista ecosistémico para la implementación de usos y aprovechamientos adecuados a las condiciones económicas y sociales existentes dentro del territorio con el fin de establecer los tipos generales de usos acordes a los sistemas productivos desarrollados⁸⁶.

Para llevar a cabo una correcta evaluación de zonificación ambiental se deben tener en cuenta la línea base, la cual debe o se recomienda ser desarrollada por diferentes profesionales los cuales pueden evaluar según su área un aspecto

⁸⁴ Salzwedel, H., N. Zapata, M. Eilbrecht y M. Arzola. Zoning the coast-methodological guidelines for the municipal level: the experience of the Region of Bio Bio. Chilean-German Technical Cooperation Project Spatial Planning of the Coastal Zone of the Region of Bio Bio. Concepción, Chile. 2003. 61 p.

⁸⁵ Varghesea, K., L. S. Ganeshb, M. Manic, P. P. Anilkumar, R. Murthy y B. R. Subramaniam. Identifying critical variables for coastal profiling in ICZM planning - A systems approach. Ocean Coast. Manag. 2008. 51: 73-94.

⁸⁶ IGAC. Estudio de Clasificación de Suelos del Tolima. 1993.

importante que esté afectando o no el posible impacto que se evalué. Para ello se tiene una serie de factores tales como, los factores físicos que corresponde a todo lo relacionado con el relieve, la corteza terrestre y los elementos naturales que la modifican. Estos son el relieve, la topografía, la hidrología y la hidrografía; factores biológicos como el suelo, la vegetación, la fauna, la ecología; factores humanos o socioeconómicos donde se estudian aspectos o ítems como población, origen, incremento poblacional, mortalidad, comportamiento social, necesidades, infraestructura, actividades agrícolas y pecuarias, prácticas de aprovechamiento forestal, entre otros.

Según Holdridge⁸⁷, una zona de vida es un grupo de asociaciones vegetales dentro de una división natural del clima, las que tomando en cuenta las condiciones edáficas y las etapas de sucesión, tiene una fisonomía similar en cualquier parte del mundo constituyendo una unidad bioclimática. Un aspecto a tener en cuenta en el estudio de zonificación ambiental es el referente a las amenazas naturales, las más comunes son las amenazas sísmicas, amenazas por procesos tectónicos, amenazas por factores climáticos, amenazas por movimientos en masa y remoción.

4.6. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de componentes específicos que permiten a los usuarios finales crear consultas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio. La información geográfica va a ser aquella información que tiene algún componente espacial, es decir, una ubicación, y además, una información atributiva que nos detalle más sobre ese elemento en cuestión. Esa ubicación se podrá definir con un nombre de una calle, por ejemplo, o con coordenadas espaciales⁸⁸.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica. Esto quiere decir que en un solo mapa el sistema muestra la distribución de recursos, edificios, poblaciones, entre otros datos de los municipios, departamentos, regiones o todo un país. Este es un conjunto que

⁸⁷ Holdridge, L.R. Determination of World Plant Formation from Simple Climate Data. Science. 1947.105, 367-368.

⁸⁸ Martínez Llario JC and Coll Aliaga E, "Análisis vectorial en PostGIS y Oracle Spatial: estado actual y evolución de la especificación Simple Features for SQL", In Jornadas Técnicas para la Infraestructura de Datos Espaciales de España. 2005.

mezcla hardware, software y datos geográficos, y los muestra en una representación gráfica. Los SIG están diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar la información de todas las formas posibles de manera lógica y coordinada. En general, los SIG son empleados para el almacenamiento, análisis e integración de datos de campo, información proveniente de sensores remotos (imágenes o fotografías aéreas), cartografía, estadísticas y percepción de las comunidades.

Los SIG facilitan la revisión de la brecha entre las condiciones deseadas y las actuales, ya que permiten moverse entre una visión general y los acercamientos selectivos al tema y grado de detalle que requiere cada usuario en particular. Si se observa el mapa de un municipio para determinar el estado de los bosques, por ejemplo, puede ser importante tener la visión general de la ubicación de los fragmentos de bosque, las corrientes de agua y vías que los atraviesan y la cercanía a centros poblados. Igualmente, importante puede ser comprender en detalle cada una de estas capas temáticas, es decir, conocer el área total en bosques, el número de fragmentos, los nombres y características de las fuentes de agua y el número de habitantes de cada centro poblado⁸⁹.

Cuando los SIG se encontraban en sus etapas de desarrollo iniciales y eran meras herramientas para visualizar datos y realizar análisis sobre ellos, cada usuario tenía sus propios datos con los cuales trabajaba de forma independiente del resto de usuarios, incluso si estos llevaban a cabo su trabajo sobre una misma área geográfica y estudiando las mismas variables. Hoy en día, la información no se concibe como un elemento privado de cada usuario, sino como un activo que ha de gestionarse, y del que deriva toda una disciplina completa. La aplicación de esta disciplina es la base de algunos de los avances más importantes en la actualidad, teniendo implicaciones no ya solo técnicas sino también sociales en el ámbito de los SIG⁹⁰.

Gracias a la tecnología SIG, la información espacial puede ser aprovechada en mayor medida, y en muchos casos pasa de ser una información inherente a los datos, pero sin una verdadera aplicación, a ser un elemento sumamente enriquecedor y clave para muchos análisis. Es una herramienta integradora que busca abarcar en su ámbito todas las funcionalidades que se requieren para el

⁸⁹ López, L. Molina, A. Villegas, G. Los sistemas de información geográfica (sig) en la planificación municipal. Revista EIA Escuela Ingeniería Antioquia no.4 Envigado July/Dec. 2005.

⁹⁰ MacEachren A. Visualization in Geographical Information Systems. pp. 115-130. John Wiley. 1994.

trabajo con variables y elementos espacialmente localizados, incorporando para ello capacidades variadas que serán las que vayamos viendo progresivamente a lo largo de esta obra⁹¹.

SIG es un elemento que permite analizar, presentar e interpretar hechos relativos a la superficie terrestre, es un conjunto de software y hardware diseñado específicamente para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos⁹².

La empresa productora de software de mayor comercialización en Colombia es ESRI, habiendo sido los programas ArcInfo, ArcView 3.2 y ArcExplorer los más utilizados hasta hace pocos años. En la actualidad se está dando una transición de los usuarios de ArcView 3.2 hacia ArcGis, que tiene funciones de ArcInfo y ArcView. Las funciones generales de cada programa son las siguientes:

ArcExplorer: distribuido gratuitamente por ESRI (se puede descargar del sitio web de ESRI), que permite visualizar información en formato shape generada por ArcView. Tiene funciones básicas para manipular la información.

ArcView: permite editar y realizar distintos tipos de análisis, suficientes para organizar y manejar la información comúnmente utilizada por un municipio.

ArcInfo: permite elaborar mapas desde el inicio, definiendo la topología de los elementos con lo cual se puede realizar una gran cantidad de análisis espaciales entre ellos.

ArcGis: paquete de aplicaciones con la versatilidad para la edición de ArcView y con funciones de elaboración de mapas de ArcInfo. "ArcGis está compuesto por las aplicaciones ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, y extiende ArcView al proveer edición multiusuario, una capacidad avanzada de análisis interfaz con Internet y una gran capacidad para el manejo de bases de datos espaciales"⁹³.

En cuanto al ingreso de los datos a un SIG, ESRI define tres formas básicas:

Datos espaciales de tipo vector: componen la cartografía digital, constituida por puntos, líneas o polígonos. Son el tipo principal de datos para un SIG. Usando como

⁹¹ Steede-Terry K. Integrating GIS and the Global Positioning System. ESRI Press. 2000.

⁹² Tomlin, C. Geographic information systems and cartographic modelling. Prentice Hall. 1990.

⁹³ ESRI. What is GIS. [En línea]. [Citado, 01 de febrero de 2017]. Disponible en internet: <https://www.gis.com/whatisgis/index.html>.

ejemplo los ríos de un área dada, cada elemento, es decir, cada río, es una línea definida por pares de coordenadas x e y. Una capa temática está constituida por un número variable de elementos.

Datos espaciales de tipo *raster*: incluyen imágenes satelitales, fotografías aéreas e información escaneada. Las fotografías aéreas e imágenes satelitales requieren un proceso previo de ortorrectificación y georreferenciación, de manera que puedan ser correctamente incorporadas al sistema. Las imágenes escaneadas sin este proceso se utilizan con frecuencia como referencia o fondo para los mapas en formato vector, de manera que proporcionan una información visual que puede resultar igualmente valiosa.

Datos tabulares: información que describe cada elemento de una capa temática. Para el ejemplo de la capa de ríos, el orden, la longitud y la profundidad del cauce serían, entre otros, los datos que se recogerían en una tabla para cada río. Puede utilizarse en la práctica cualquier base de datos (incluso archivos de MsExcel) para alimentar la información espacial.

Star define un SIG como un sistema de información diseñado para trabajar con datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas. En otras palabras, un SIG es tanto un sistema de base de datos con capacidades específicas para datos georreferenciados, como un conjunto de operaciones para trabajar con esos datos. En cierto modo, un SIG es un mapa de orden superior.

El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población. Además, permiten realizar las consultas y representar los resultados en entornos web y dispositivos móviles de un modo ágil e intuitivo, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión, conformándose como un valioso apoyo en la toma de decisiones⁹⁴.

La gestión de los datos e información se convierte en un elemento importante en el proceso de zonificación, ya que un buen manejo de la información permitirá generar una base de conocimiento confiable para la toma de decisiones. En numerosos trabajos se ha demostrado la utilidad de herramientas de administración de datos

⁹⁴ Martínez ME. Las Infraestructuras de Datos Espaciales. Experiencias en su implantación. Boletic. Vol. Septiembre-Octubre 2001., pp. 38-50.

geográficos para apoyar procesos y temáticas como pesca, turismo, contaminación, entre otras^{95,96,97,98}.

El SIG permite el manejo y despliegue de la información georreferenciada de manera ágil y facilita analizar y explorar la distribución espacial de las variables ambientales consideradas, la Geodatabase permite el almacenamiento centralizado espacial y de atributos y soporta una variedad de funciones de modelado, manejo y análisis, un SIG es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados⁹⁹

Un mapa es una representación de un conjunto de datos espaciales y, aunque esta representación resulta de enorme importancia, en el entorno de un SIG no es sino un elemento más de una serie de componentes (tales como el software y el hardware que antes mencionábamos). Más aún, un SIG contiene no solo los datos y la representación, sino también las operaciones que pueden hacerse sobre el mapa, que no son ajenas a este sino partes igualmente de todo el sistema conformado por el SIG¹⁰⁰.

Podemos entender la Ciencia de la Información Geográfica como todo el conjunto de disciplinas y conocimientos que residen tras los SIG, tanto en su desarrollo y creación como en su utilización y aspectos prácticos. El término geomática, formado a partir de los vocablos geografía e informática, se emplea con frecuencia para hacer mención a todo ese grupo de ciencias relacionadas con los SIG¹⁰¹.

Los datos son necesarios para hacer que el resto de componentes de un SIG cobre sentido y puedan ejercer su papel en el sistema. La información geográfica, la

⁹⁵ Kitsiou, D., H. Coccossis y M. Karydis. Multi-dimensional evaluation and ranking of coastal areas using GIS and multiple criteria choice methods. *Sci. Total Environ.* 2002. 284 (1-3): 1-17.

⁹⁶ Douven, W. J. A. M., J. J. G. Buurman y W. Kiswara. Spatial information for coastal zone management: the example of the Banten Bay seagrass ecosystem, Indonesia. *Ocean Coast. Manag.* 2003. 46 (6-7): 615-634.

⁹⁷ Shalaby, A. y R. Tateishi. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Ap. Geogr.* 2007. 27 (1): 28-41.

⁹⁸ De Freitas, D. M. y P. R. A. Tagliani. The use of GIS for the integration of traditional and scientific knowledge in supporting artisanal fisheries management in southern Brazil. *J. Environ. Manag.* 2009. 90 (6): 2071-2080

⁹⁹ Korte G. *The GIS Book* (5th Ed. Rev.) Autodesk Press. 2001.

¹⁰⁰ Ananthanarayanan K and Varghese K , *Vectorization of Contours From Scanned Topographical Map*, GIS Development. Asia Pacific Edition. Vol. 10, 2006

¹⁰¹ Jarvis A, Yeaman S, Guarino L and Tohme J. The role of geographic analysis in locating and using plant genetic diversity. *Methods in enzymology.* 2005. Vol. 395, pp. 279-298.

verdadera razón de ser los SIG, reside en los datos, y es por ello que el conocimiento exhaustivo de los datos y su naturaleza resulta obligado para una buena comprensión. Un aspecto clave para una utilización correcta de un SIG es saber integrar datos de distinta procedencia, para lo cual es vital entender cómo esta afecta a las propias características de dichos datos¹⁰².

Un SIG siempre incorpora una serie de formulaciones que permiten la obtención de resultados y el análisis de los datos espaciales. Estas formulaciones representan procesos que pueden ser sumamente sencillos o enormemente complejos, y que pueden resultar de aplicación en uno u otro campo, o incluso con carácter general. Su origen puede ser muy variado, y no derivan necesariamente del ámbito puro de la geografía, sino que pueden ir desde simples consultas o mediciones a elaborados modelos que empleen datos de variables muy numerosas y arrojen resultados complejos¹⁰³ (Lozano y Martínez, 1998).

4.7. METODOLOGÍA CORINE LAND COVER EN EL CONTEXTO COLOMBIANO

La Metodología CORINE Land Cover (CLC), tiene como objetivo la elaboración de un inventario homogéneo, donde permite unificar los criterios, conceptos y métodos para conocer cómo está cubierto el país, a partir de la adaptación realizada de la metodología europea a nuestro entorno.

La metodología Corine Land Cover se engloba dentro del Programa CORINE (Coordination of Information of the Environment), el cual inicia el 27 de junio de 1985, y en virtud de una decisión del Consejo de Ministros de la Unión Europea, pasa a ser responsabilidad de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) en el año 1995¹⁰⁴. Este proyecto tiene como objetivo fundamental la captura de datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 sobre la cobertura y/o uso del territorio (ocupación del suelo)¹⁰⁵.

¹⁰² Jenks GF. The Data Model Concept in Statistical Mapping. International Yearbook of Cartography. 1967. Vol. 7, pp. 186-190.

¹⁰³ Lopez, L. Molina, A. Villegas, G. Los sistemas de información geográfica (sig) en la planificación municipal. Revista EIA Escuela Ingeniería Antioquia no.4 Envigado July/Dec. 2005.

¹⁰⁴ V. Perdigão, and A. Annoni, Technical and methodological guide for updating CORINE Land Cover database., Luxembourg: Joint Research Centre (JRC) and European Environment Agency (EEA), 1997.

¹⁰⁵ M. Nunes de Lima, Image 2000 and CLC2000 Products and methods, Toscana: Joint Research Centre, 2005

La generación de base de datos geográficos, se realiza a través de la interpretación de imágenes de satélite Landsat y SPOT, utilizando sistemas de información geográfica (SIG). El fundamento de esta metodología se fundamenta en imágenes de teledetección como fuente primaria y se basa en la fotointerpretación y no en la clasificación automatizada.

En el contexto de Colombia, se adopta la metodología, donde se tomó como base la leyenda desarrollada para la Cuenca Cauca-Magdalena elaborada conjuntamente por IDEAM, IGAC y Cormagdalena. La leyenda nacional fue estructurada de manera jerárquica, derivando las unidades de coberturas de la tierra con base en criterios fisonómicos de altura y densidad, claramente definidos y aplicables a todas las unidades consideradas para un grupo de coberturas del mismo tipo (Tabla 2).

Tabla 2. Leyenda nacional de las coberturas de tierra para Colombia

LEYENDA NACIONAL DE LAS COBERTURAS DE TIERRA COLOMBIA	
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1 Zonas Urbanizadas 1.2 Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación 1.3 zonas de extracción minera y escombreras 1.4 Zonas verdes artificializadas no agrícolas
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	2.1 Cultivos transitorios 2.2 Cultivos Permanentes 2.3 Pastos 2.4 Áreas Agrícolas heterogéneas
3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	3.1 Bosques 3.2 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva 3.3 Áreas abiertas sin o con poca vegetación
4. ÁREAS HÚMEDAS	4.1 Áreas húmedas continentales 4.2 Áreas húmedas costeras
5. SUPERFICIES DE AGUAS	5.1 Aguas continentales 5.2 Aguas marítimas

Fuente: Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena – Cauca, 2008.

Para la construcción de la presente leyenda se definieron los siguientes criterios rectores:

- La unidad mínima cartografiable para la escala 1:100.000 es de 25 hectáreas, excepto para los territorios artificializados, donde la unidad mínima es de cinco hectáreas.
- La identificación y delimitación de la unidad de cobertura de la tierra corresponderá a la fecha de toma de la imagen de satélite.
- Los niveles 1 y 2 de la leyenda permanecen iguales a los de la leyenda de CORINE Land Cover de Europa.
- Las unidades de la leyenda para la escala 1:100.000 varían desde el nivel 3 hasta el nivel 6 en los diferentes grupos de coberturas, variación que depende del tipo de cobertura¹⁰⁶

¹⁰⁶ COLOMBIA. IDEAM, IGAG y CORMAGDALENA. 2008. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena –Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 200p. + 164 hojas cartográficas.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Para determinar la vulnerabilidad ambiental ante un posible derrame de hidrocarburos provenientes de un poliducto o un oleoducto, se identificaron los componentes ambientales del territorio teniendo en cuenta la legislación ambiental vigente y las referencias de estudios realizados por otros autores a nivel nacional y a nivel mundial, las cuales estarán en función de la proximidad (cuerpos de agua, vías), la densidad (población) y el tipo de estructura (coberturas vegetales).

5.1. SELECCIÓN DE VARIABLES

5.1.1. Coberturas vegetales

La cobertura vegetal puede ser definida como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisionómicas y ambientales las cuales incluyen desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales, así mismo las coberturas vegetales inducidas son el resultado de la acción humana como por ejemplo las áreas de cultivos¹⁰⁷

En el presente estudio se tiene en cuenta las coberturas vegetales ya que ante derrame de hidrocarburos presenta una afectación directa debido a la proximidad que existe frente a la ubicación de los tubos de transporte y al tipo de cobertura afectada^{108,109}.

La metodología CORINE Land Cover maneja una nomenclatura de tipo jerárquica, que consta de categorías con información a nivel regional, las cuales pueden ser agregadas en niveles superiores de las categorías a nivel nacional, lo cual facilita el manejo de información para la ordenación, la cual principalmente maneja territorios

¹⁰⁷ Rincón-Romero, M. Jarvis, A. y Mulligan, M. Cobertura vegetal en Colombia. *Renata*. 2012. 6 (4), 12-26.

¹⁰⁸ Benavides, L., Quintero, G., Guevara, A.L., Jaimes, A., Gutiérrez, S.M. & García, J. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *NOVA Publicación científica*. 2006. Vol.4 No. 5.

¹⁰⁹ Díaz-Martínez, E., Alarcón, A., Ferrera- Cerrato, R., Almaraz-Suarez, J. J. & García- Barradas, O. Crecimiento de *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae) en suelo con diesel, y aplicación de bioestimulación y bioaumentación. *Biol. Trop.* 2013. Vol. 61 (3): 1039-1052.

artificializados incluyendo en ello: zonas urbanizadas, zonas industriales o comerciales, zonas de extracción minera, zonas verdes no agrícolas; territorios agrícolas incluyendo en ello: cultivos anuales, transitorios, cultivos permanentes, pastos, áreas agrícolas heterogéneas-mosaicos; bosques y áreas seminaturales: bosques, áreas con vegetación herbácea o arbustiva, áreas abiertas con poca vegetación, superficies de agua: aguas continentales.

Para el desarrollo de este trabajo se tuvieron en cuenta los siguientes tipos de coberturas naturales:

➤ Paramo:

De acuerdo a la resolución No. 769 del Ministerio de Ambiente del 5 de agosto de 2012, se define como un ecosistema de alta montaña ubicado entre el límite superior del bosque andino y si se da el caso, con el límite inferior de los glaciares o nieves perpetuas, en el cual domina una vegetación herbácea y de pajonales, frecuentemente frailejones y pueden haber formaciones de bosques bajos así como arbustivos y presentar humedales como los ríos, quebradas, arroyos, turberas, pantanos, lagos y lagunas.

➤ Bosque natural denso:

Comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Los árboles son plantas leñosas perennes con un solo tronco principal, que tiene una copa más o menos definida. De acuerdo con FAO (2001), esta cobertura comprende los bosques naturales y las plantaciones. Para la leyenda de coberturas de la tierra de Colombia, en esta categoría se incluyen otras formas biológicas naturales, tales como la palma y la guadua. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales¹¹⁰).

➤ Arbustos Matorrales:

Los arbustos se caracterizan por tener la forma aproximada de un árbol, pero nunca superan los 8 metros de altura y en la gran mayoría de ocasiones son de un tamaño muy inferior, por tanto, el paisaje que ofrece un matorral es de una cubierta vegetal

¹¹⁰ IDEAM. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p. 2010

a ras de suelo, que será más o menos densa según el tipo de arbustivo del que hablemos, y salpicada aquí y allá de arbustos, casi siempre de baja altura. Los matorrales son un tipo de ecosistema terrestre que comprende un campo o espacio natural con vegetación predominante de matas y arbustos. Habitualmente se encuentran en ellos también distintos tipos de césped, así como plantas herbáceas y geófitas, que son las plantas que pasan sus épocas menos favorables en forma de rizoma, tubérculo o bulbo¹¹¹.

➤ Vegetación esclerofítica espinosa:

Son bosques que a través del tiempo han sufrido una gran presión a causa de diferentes acciones antrópicas como la agricultura y ganadería expansiva quedando muy reducido, en algunas áreas se conservan remanentes de bosques naturales, en ocasiones son considerados como bosques secos. En estas zonas las plantas presentan espinas como método de defensa, así como el de captar agua ya que son áreas con recurso hídrico limitado y una humedad relativa baja.

Pastos naturales sabanas: Abarca las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominado principalmente por la familia Poaceae (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (IDEAM), 2010), dedicadas pastoreo permanente por un periodo de dos o más años, algunas de las categorías pueden presentar anegamientos temporales o permanentes en zonas bajas o en depresiones del terreno. Una característica fundamental es que un alto porcentaje su presencia se debe a la acción antrópica, referida a su plantación, y al manejo posterior. Para su clasificación se manejaron las unidades de pastos limpios, pastos arbolados, pastos enmalezados¹¹².

5.1.2. Cuerpos de agua (aguas superficiales)

Un cuerpo de agua es cualquier extensión que se encuentran en la superficie terrestre (ríos y lagos) o en el subsuelo (acuíferos, ríos subterráneos); tanto en estado líquido, como sólido (glaciares, casquetes polares); tanto naturales como artificiales (embalses) y pueden ser de agua salada o dulce. El agua es esencial para el desarrollo de la vida, ya que es un recurso que atiende las necesidades

¹¹¹ www.ecologiaverde.com/matorrales-que-son-tipos-y-fauna-2103.html

¹¹² LINARES, PINZÓN & CORTÉS. Estudios en Líquenes y Briófitos en Enclaves Subxerofíticos de la Sabana de Bogotá. 2007.

básicas de un sociedad y es fuente para el consumo humano¹¹³, y su importancia radica, en que es un compuesto fundamental de desarrollo debido a la función que cumple en los procesos biológicos¹¹⁴. Es por ello que en el presente estudio se tuvo en cuenta los cuerpos de agua debido a que estos son los más afectados cuando se presenta un derrame de hidrocarburos ya que como consecuencia de las superficies deslizantes que se presentan afecta las condiciones fisicoquímicas propias del agua ocasionando principalmente una disminución de oxígeno¹¹⁵. Por esta razón el recurso hídrico, requiere del establecimiento de propuestas para la protección y conservación, que beneficien el mantenimiento del recurso teniendo en cuenta la normativa nacional y los parámetros técnicos que esta establece.

Para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia, el decreto 2245 de 2017 establece los criterios técnicos con base en los cuales las Autoridades Ambientales competentes realizarán los estudios para el acotamiento de las rondas hídricas en el área de su jurisdicción.

La ronda hídrica se acotará desde el punto de vista funcional y su límite se traza a partir de la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, considerando los siguientes criterios técnicos:

1. Criterios para la delimitación de la línea de mareas máximas y la del cauce Permanente.
2. Los criterios para la delimitación física de la ronda hídrica: El límite físico será el resultado de la envolvente que genera la superposición de mínimo los siguientes criterios: geomorfológico, hidrológico y ecosistémico¹¹⁶.

La calificación de las aguas superficiales se da en función de la proximidad (Tabla 3), teniendo en cuenta que existe una normativa que regula la franja de protección del recurso hídrico superficial en términos de distancia.

¹¹³ Departamento de Información Pública de las Naciones Unidas 32950—DPI/2378—Septiembre 2005—5M

¹¹⁴ Toledo, A. El agua en México y el Mundo. Gaceta Ecológica-Instituto. 2002.

¹¹⁵ Jiménez, D. L. (2006). Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre una zona estearina, aledaña al terminal de Ecopetrol en Tumaco. (tesis de pregrado). Ingeniería Ambiental Sanitaria. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.

¹¹⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 2245. “Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas. Bogotá D.C. Diciembre. 2017.

Tabla 3. Valoración aguas superficiales -- drenajes

Proximidad (m) a al recurso hídrico	Valor	Vulnerabilidad ambiental
0 – 30	9	Muy alta
30 – 100	7	Alta
100 – 200	5	Media
200 – 300	3	Baja
>300	1	Muy baja

Fuente: Autor

5.1.3. Vías

Una vía pública es cualquier espacio de dominio común por donde transitan los peatones o circulan los vehículos. Las vías públicas se rigen por la normativa internacional, nacional y local en su construcción, denominación, uso y limitaciones; con el objetivo de preservar unos derechos esenciales (a la vida, a la salud, a la libertad, a la propiedad, a transitar, etc.). A diferencia de las vías privadas, que las regulan sus dueños, tanto en sus características como accesibilidad¹¹⁷.

Según INVIAS, las carreteras o vías se clasifican así:

➤ Primarias

Son aquellas troncales, transversales y accesos a capitales de Departamento que cumplen la función básica de integración de las principales zonas de producción y consumo del país y de éste con los demás países. Este tipo de carreteras pueden ser de calzadas divididas según las exigencias particulares del proyecto. Las carreteras consideradas como Primarias deben ser pavimentadas.

➤ Secundarias

Son aquellas vías que unen las cabeceras municipales entre sí y/o que provienen de una cabecera municipal y conectan con una carretera Primaria. Las carreteras consideradas como Secundarias pueden funcionar pavimentadas o en afirmado.

¹¹⁷ INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Norma 3.1-I.C. Trazado. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras.2000.

➤ Terciarias

Son aquellas vías de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí. Las carreteras consideradas como Terciarias deben funcionar en afirmado. En caso de pavimentarse deberán cumplir con las condiciones geométricas estipuladas para las vías Secundarias.

Las vías se tienen en cuenta como parámetro a evaluar en el presente trabajo ya que estas son usadas tanto en la fase inicial de una explotación de hidrocarburos como en las fases operativas, así mismo y debido a la proximidad de estas durante el recorrido del hidrocarburo por la tubería, es un parámetro que se puede ver afectado frente a un posible derrame ya que se produce un intercambio de gases, en ocasiones incluso un agotamiento de recursos ya que puede mantenerse el hidrocarburo en la vía como ser transportada a través de ella hacia un cuerpo de agua o cobertura vegetal cercana¹¹⁸.

Para la valoración se consideran los tres tipos de vías, primarias, secundarias y terciarias y la ley 1228 de 2008¹¹⁹ en el artículo 2 considera las siguientes fajas de retiro obligatorio o áreas de reserva o de exclusión (Tabla 4) para las carreteras que forman parte de la red vial nacional:

Tabla 4. Valoración de Vías.

Proximidad a Vías primarias (m)	Valor	Vulnerabilidad ambiental
0 - 60	9	Muy alta
60 - 75	7	Alta
75 - 90	5	Media
90 -100	3	Baja
>100	1	Muy baja
Proximidad a vías secundarias (m)	Valor	Vulnerabilidad ambiental
0 - 45	9	Muy alta
45 - 60	7	Alta
60 - 75	5	Media

¹¹⁸ Mendelsohn, I. A., Andersen, G.L., Baltz, D., Caffey, R., Carman, K., Fleeger, J, Joye, S. B., Lin, Q., Maltby, E., Overton, E. B. & Rozas, L. Oil Impacts on Coastal Wetlands: Implications for the Mississippi River Delta Ecosystem after the Deepwater Horizon Oil Spill. 2012. 62, 562-574.

¹¹⁹ COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Ley 1228. Por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión, para las carreteras del sistema vial nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras y se dictan otras disposiciones. Art 1. 2008.

75 - 90	3	Baja
>90	1	Muy baja
Proximidad a vías terciarias y otras no consideradas en epígrafes anteriores (m)	Valor	Vulnerabilidad ambiental
0 -30	9	Muy alta
30-45	7	Alta
45 -60	5	Media
60-75	3	Baja
>75	1	Muy baja

Fuente: Autor

5.1.4. Asentamientos humanos

Asentamiento humano, es el establecimiento de un conglomerado demográfico, con el conjunto de sus sistemas de convivencia, en un área físicamente localizada, considerando dentro de la misma los elementos naturales y las obras materiales que lo integran¹²⁰.

Se clasifican dos tipos:

- Asentamientos humanos nucleados: están definidos en términos de la densidad de población, representan áreas en las que los miembros de la sociedad tienden a estar más concentrados.
- Asentamientos humanos dispersos: Para este estudio corresponde a las construcciones, o a infraestructura aislada de actividad económica como industrias, comercio o viviendas individuales especialmente en el área rural.

La calificación asignada al tema de asentamientos humanos (tabla 5) se da en función de la densidad poblacional por km². Incluye los asentamientos humanos nucleados y dispersos.

Tabla 5. Valoración asentamientos humanos.

Habitantes por km²	Valor	Vulnerabilidad ambiental
>750	9	Muy alta
87 - 750	7	Alta

¹²⁰ Ley general de asentamientos humanos. MEXICO 2014

45 - 87	5	Media
42 - 45	3	Baja
0 - 42	1	Muy baja

Fuente: Autor

5.1.5. Explosión

Es una liberación brusca de energía por lo general, de masa gaseosa que produce un incremento rápido de la presión, con desprendimiento de calor, luz y gases, y va acompañada de estruendo y rotura violenta del cuerpo que la contiene. Debido a que las explosiones son eventos de generación abrupta y repentina, se generan por consiguiente ondas de presión que implican un movimiento más o menos desordenado que puede alcanzar grandes distancias. Teniendo en cuenta lo anterior, se tomó la decisión de tener este parámetro de análisis ya que como lo menciona Patin¹²¹ en 1999, las explosiones afectan tanto la biodiversidad principalmente porque debido a la generación de ruido se producen desplazamientos de fauna los cuales a su vez indirectamente ocasionan afectaciones en las coberturas vegetales y/o los cuerpos de agua.

5.1.6. Incendio

Un incendio etimológicamente deriva del latín “incendium” y es conocido como un desencadenamiento importante y sin control de fuego, que se propaga de una manera fenomenal, el cual es capaz, y debido a la voracidad que presenta, de destruir a su paso todo aquello con lo que se encuentra, ya sean vidas o bienes de tipo material. En los seres humanos puede provocar intoxicación por inhalación de monóxido de carbono, o por el sufrimiento de quemaduras. Rahman¹²² en el año 2004 considera importante tener en cuenta los incendios ya que los hidrocarburos al ser altamente inflamable, son una de las principales consecuencias que se pueden presentar cuando ocurren afectaciones por derrame y con ello afectaciones el entorno.

¹²¹ Patin, S. Factors of the offshore oil and gas industry's impact on the marine environment and fishing. En. Environmental Impact of the Offshore Oil and Gas Industry. EcoMonitor Publishing. NY. 1999

¹²² Rahman, A. Heading for a repeat of the Magurchara disaster. Gas fires and living forests just don't mix. The Daily Star. 2004. <http://www.thedailystar.net/2004/12/27/d41227020422.htm>

5.1.7. Superficies deslizantes

Un derrame de petróleo o marea negra es un vertido de este hidrocarburo que se produce debido a un accidente o práctica inadecuada que contamina el medio ambiente, especialmente el mar. Una vez el hidrocarburo es vertido sobre la superficie del mar este se extenderá inmediatamente como consecuencia de las propiedades físicas y químicas, así como las condiciones externas, resultando un vertido no homogéneo consistente en manchas espesas y grumos entremezclados con finas capas oleosas. Por lo anterior se tiene en cuenta este ítem ya que ante un derrame de hidrocarburos es muy factible que se presenten manchas las cuales afectan de forma muy directa tanto los cuerpos de agua, vías como las coberturas vegetales y por ende la población y como lo menciona NOAA¹²³ la velocidad y extensión de la mancha o superficie deslizante es incontrolable debido al movimiento de las mareas o los vientos.

5.1.8. Daño estructural

El daño estructural hace referencia a los daños que hay dentro de una construcción, es decir lo que no se ve, pero que podría poner en riesgo la seguridad de la edificación y las vidas de los habitantes de estas. El daño en estructuras puede ser causado por fenómenos naturales, o también por la acción humana al darle un uso inadecuado, falta de mantenimiento o bien por construir de manera incorrecta y sin asesoramiento técnico adecuado. Entre los fenómenos naturales que pueden afectar podemos considerar a los fenómenos geológicos (sismos, volcanes, deslizamientos de tierras y hundimientos).

Es por ello que se tiene en cuenta este parámetro ya que como consecuencia de la falta de mantenimiento de algunos puntos de los oleoductos o poliductos se presentan afectaciones o presencia de daños estructurales en las tuberías ocasionando con ello pequeñas filtraciones de hidrocarburo y como lo menciona

¹²³ NOAA. ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills). NOAA's oil weathering model—an oil spill response tool that models how different types of oil weather (undergo physical and chemical changes) in the marine environment. Website of the NOAA Office of Response and Restoration, US Department of Commerce. 2015.

IPIECA-IOGP¹²⁴ en el 2015 los derrames de hidrocarburos en las costas se generan principalmente por fallos o daños en la estructura.

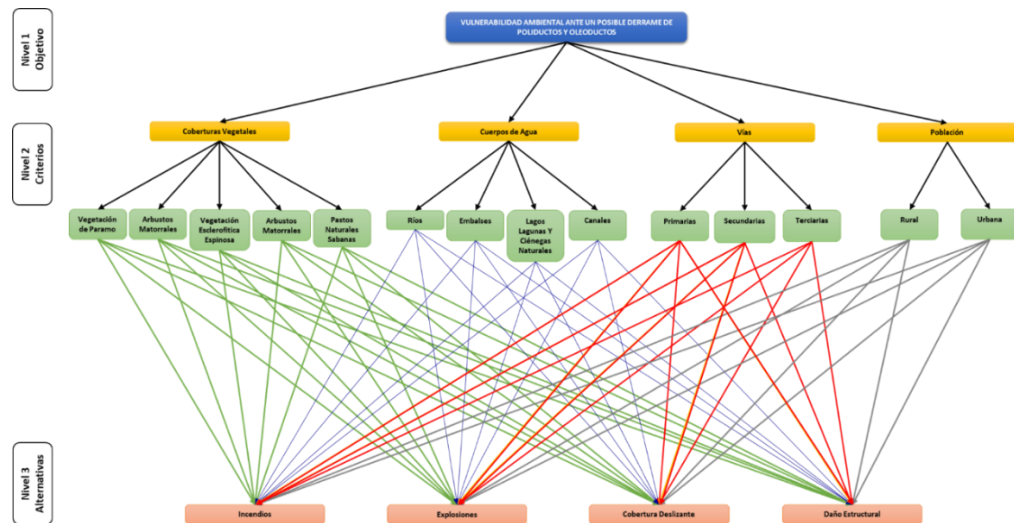
5.2 Estructura de la jerarquía de decisión

El proceso metodológico tiene como referencia el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) desarrollado por Tomas Saatty, donde se siguen los siguientes pasos:

1. Se definió el objetivo de decisión
2. Se estructuró la Jerarquía de decisión
3. Se elaboraron las matrices de comparación de criterios y alternativas
4. Se ponderó el nivel de importancia de los criterios y alternativas evaluadas
5. Se evaluó el índice de consistencia de los valores obtenidos en cada matriz

Mediante el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), se construye la jerarquía de decisión (Figura 3), considerando como objetivo determinar la vulnerabilidad del medio ambiente ante un posible derrame de un poliducto y oleoducto.

Figura 3: Jerarquía de decisión para el análisis de Vulnerabilidad ante derrame de Hidrocarburo.



Fuente: Saaty. 2008.

¹²⁴ IPIECA-IOGP. Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la ecología marina. Directrices de buenas prácticas para el personal de manejo de impactos y respuesta a emergencias. Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas. Informe de IOGP N.º 525. 2015

Este proceso se construye teniendo en cuenta las variables presentadas en la tabla 6, donde a través de una matriz de comparación pareada (Tabla 7), se determina si influyen de la misma forma en el interés de las alternativas o si estas intervienen en porcentajes distintos.

Tabla 6: Variables para elaboración del PAJ

CRITERIOS	ALTERNATIVAS
Coberturas Vegetales	Incendios
Cuerpos de Agua	Explosiones
Vías	Superficies deslizantes
Población	Daño estructural

Fuente: Autor

Tabla 7. Ejemplo de matriz de comparación pareada

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3
Alternativa 1	1		
Alternativa 2		1	
Alternativa 3			1

Fuente: Autor

Para realizar la valoración y determinar la vulnerabilidad ambiental, cada variable se califica teniendo en cuenta la escala de razón en términos de referencia, donde se tiene en cuenta la escala numérica de Saaty y se establece el nivel de importancia de cada criterio sobre la alternativa evaluada (Tabla 8)

Tabla 8. Valoración Vulnerabilidad ambiental

Vulnerabilidad ambiental	Valor
Muy alta	9
Alta	7
Media	5
Baja	3
Muy baja	1

Fuente: Autor

Una vez determinados los valores asignados en la ponderación, se evalúa el índice de consistencia de los datos, para determinar si los valores asignados dentro del PAJ presentan coherencia, estableciendo relaciones entre las ideas de cada uno de los evaluadores y garantizar la proporcionalidad y la transitividad de los juicios emitidos.

5.3. Generación de las variables geográficas

La información utilizada para las variables fue obtenida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IDEAM, DANE, Ministerio de Medio Ambiente, Parques nacionales naturales, INVIAS Portal de Datos Abiertos de Esri Colombia, en Sistema de Coordenadas Proyectada MAGNA Colombia Bogotá. Escala 1:100000. Planchas Geológicas: 191 Tunja - 190 Chiquinquirá

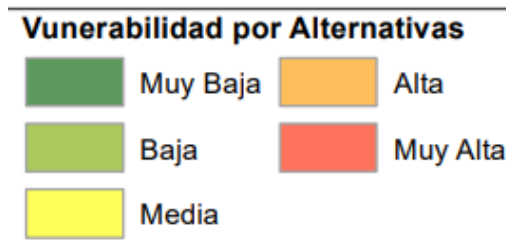
El software utilizado para procesar las coberturas geográficas y llevar acabo el análisis de superficies y generación del multicriterio fue Arcgis versión 10.3 mediante el uso de las herramientas de las extensiones Spatial Analyst, 3D Analyst, Spatial Analyst Tools, Multiple Ring Buffer, Clip, Dissolve, Union, Polygon to Raster, Raste Calculator, Reclassify.

Para el procesamiento de la información se llevan a cabo los siguientes pasos:

- ✓ Se realiza una reclasificación de los datos, de las capas que se tienen en cuenta para la zonificación de vulnerabilidad, donde teniendo en cuenta los atributos seleccionados se les asigna una categoría según corresponda al grado de vulnerabilidad.
- ✓ Para la capa de poliductos y oleoductos se lleva a cabo una vectorización para asignar coordenadas geográficas y de esta manera someterla a formato raster y de esta manera poderla utilizar en el diseño del modelo.

Realizada la delimitación de las coberturas, se procedió a realizar los geoprocесamientos necesarios para estandarizar cada una de las variables en términos de la aptitud establecida para el análisis multicriterio, dando como resultado áreas vulnerables representadas en los siguientes colores (Figura 4):

Figura 4: Representación de Colores según Vulnerabilidad

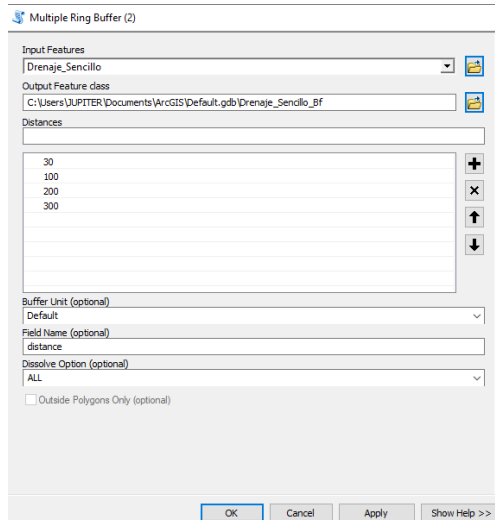


Fuente: Autor

Para realizar el geoprocésamiento de datos y determinar la vulnerabilidad del medio ambiente ante un posible derrame de hidrocarburos, se crea una herramienta a través de la extensión ArcToolbox, denominada vulnerabilidad ambiental en la que se aplican una serie de herramientas que se describirán a continuación:

Teniendo en cuenta las capas de vías, líneas hídricas y la capa del poliducto, se crea un buffer de proximidad usando la herramienta *Multiple Ring Buffer* donde se tiene en cuenta la ley 1228 del año 2008 para el caso del polígono de las vías y el Decreto 2245 del año 2017 para el caso de las coberturas de los cuerpos de agua, creando zonas de influencia específicas, las cuales se combinaron y se disolvieron utilizando los valores de distancia en el área de influencia del poliducto (Figura 4).

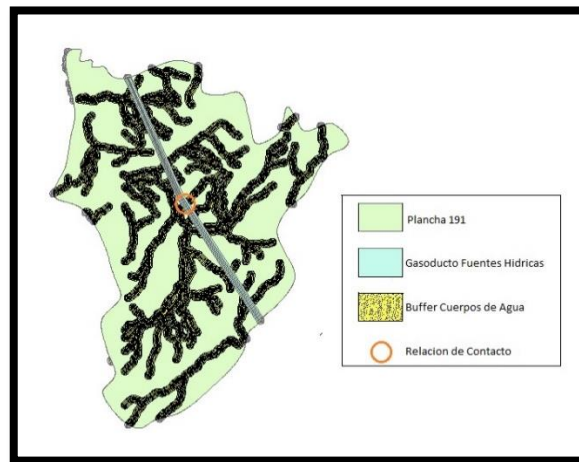
Figura 5: Aplicación de la herramienta *Multiple Ring Buffer*



Fuente: Autor

Obteniendo las áreas de influencia, se realiza un geoprocesamiento preliminar (Figura 6), donde se establecen cuáles son las zonas de contacto con el ducto para determinar un análisis de relación y poder visualizar las áreas vulnerables en la zona de estudio, de esta manera poder modificar la tabla de atributos y dejar la información necesaria e idónea que nos represente de forma correcta la vulnerabilidad ambiental.

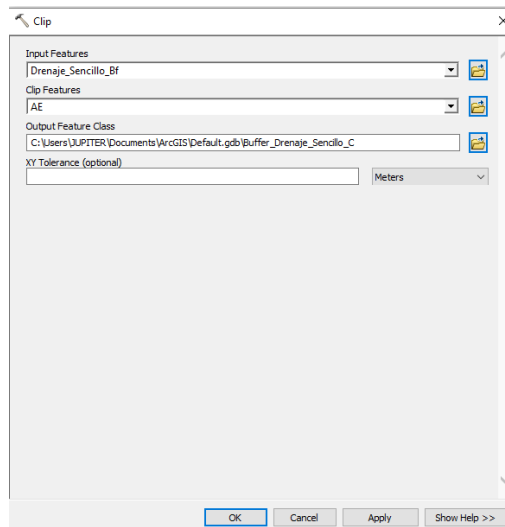
Figura 6: Geoprocesamiento preliminar de vulnerabilidad



Fuente: Autor

Una vez se han determinado las áreas de influencia se aplica la herramienta *Clip* (Figura 7), para recortar los puntos, las líneas y los elementos que no hagan parte de las planchas geográficas 190 y 191 del departamento de Boyacá, permitiendo de esta manera definir el contorno de la capa utilizada en el desarrollo de esta metodología.

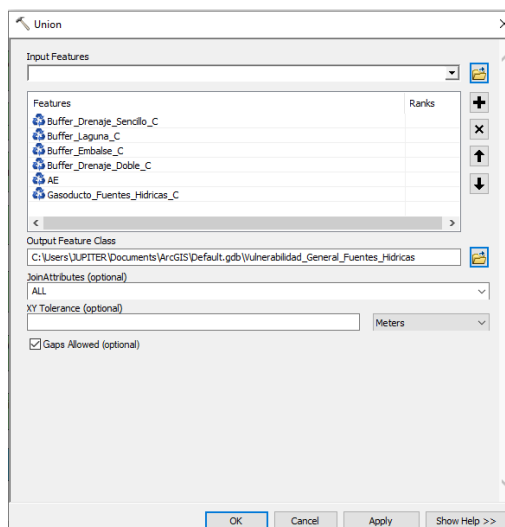
Figura 7: Aplicación de la herramienta *Clip*



Fuente: Autor

Definidos los polígonos de trabajo (Cuerpos de agua, coberturas vegetales, vías, población, poliducto y panchas geográficas 190 y 191 del departamento de Boyacá), se aplica la herramienta *Union* (Figura 8), donde a través de la superposición de capas se crea la cobertura de vulnerabilidad ambiental por cada uno de los componentes, en donde el elemento de salida contiene los polígonos y atributos de las coberturas utilizadas en el desarrollo del modelo.

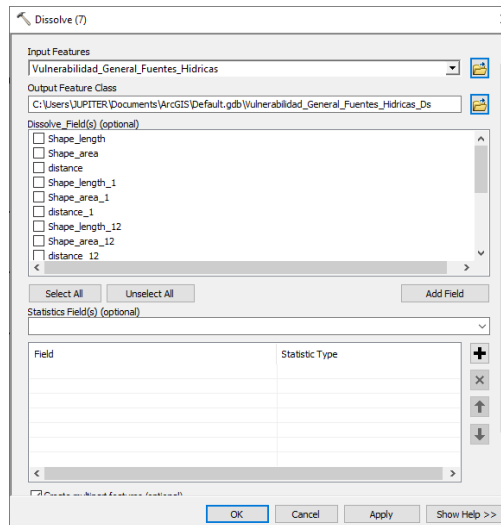
Figura 8: Aplicación de la herramienta *Union*



Fuente: Autor

Para obtener la vulnerabilidad general por cada factor, se simplifican los datos basados en el atributo de valor vulnerabilidad, utilizando la herramienta *Dissolve* (Figura 9), la cual nos permitió fusionar los polígonos cuyos valores son iguales en el campo de la tabla de atributos.

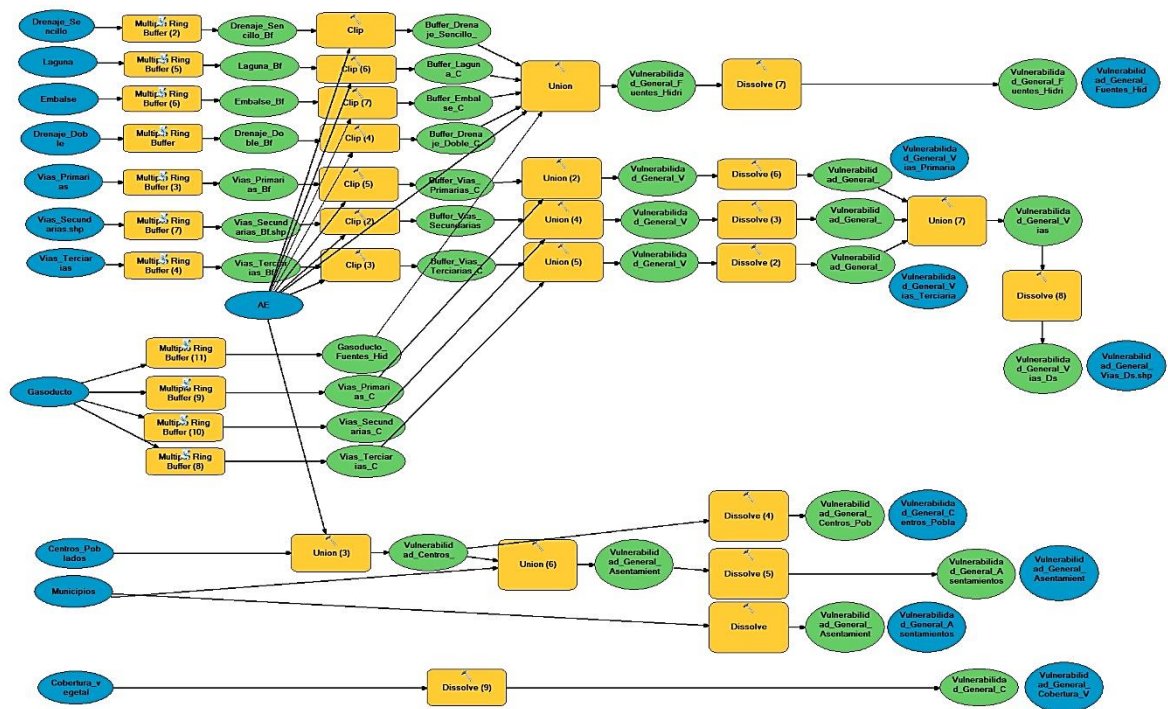
Figura 9: Aplicación de la herramienta *Dissolve*



Fuente: Autor

Para determinar la vulnerabilidad general por cada uno de los factores se unen las herramientas descritas anteriormente, donde los insumos de salida mostrarán la vulnerabilidad ambiental producto de un posible derrame de hidrocarburos, para lo cual se diseñó el siguiente modelo de vulnerabilidad (Figura 10):

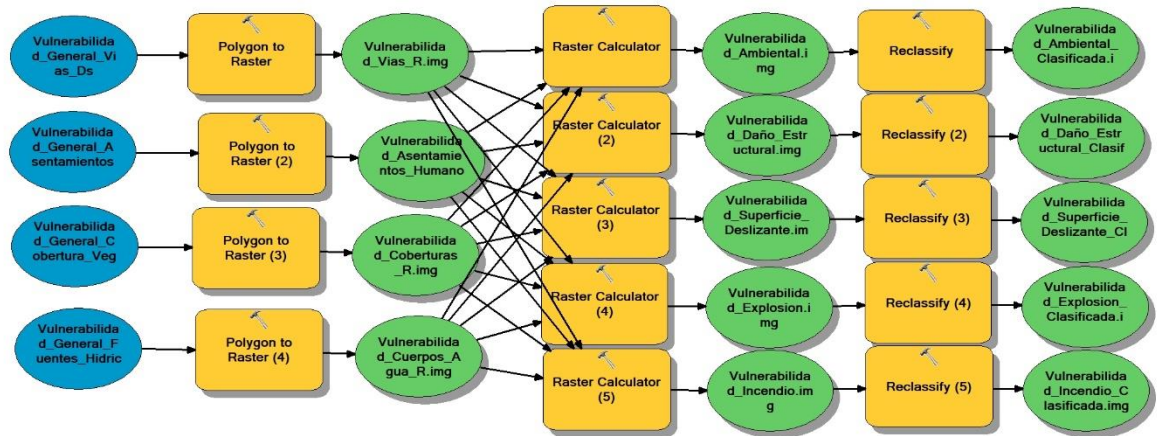
Figura 10: Diseño de modelo Vulnerabilidad general por cada uno de los factores



Fuente: Autor

Definida la vulnerabilidad general para cada factor, los insumos de salida serán utilizados para determinar la vulnerabilidad ambiental producto de las alternativas evaluadas para esta metodología (incendios, superficies deslizantes, explosiones, daño estructural), donde el procedimiento se realiza de la siguiente manera (Figura 11):

Figura 11: Diseño de modelo Vulnerabilidad ambiental producto de las alternativas



Fuente: Autor

A partir de los insumos de entrada, las entidades que contienen datos de polígono, se convierten a un *Dataset Raster* usando la herramienta *Polygon to Raster*, y de esta manera, se construye y se ejecuta una expresión simple de álgebra de mapas utilizando para ello la sintaxis de *Python* en una interfaz similar a una calculadora (*Raster Calculator*), la cual genera un *Raster* que se reclasifica para cambiar o modificar algunos valores de entrada, lo cual definiría como resultado final la vulnerabilidad ambiental producto de las alternativas.

La expresión matemática que define el álgebra de mapas es:

$$\text{Vulnerabilidad ambiental total} = (\text{Vector promedio población} * \text{Insumo vulnerabilidad ambiental población}) + (\text{Vector promedio Cuerpos de Agua} * \text{Insumo vulnerabilidad ambiental cuerpos de agua}) + (\text{Vector promedio vías} * \text{Insumo vulnerabilidad ambiental vías}) + (\text{Vector promedio coberturas vegetales} * \text{Insumo vulnerabilidad ambiental coberturas vegetales})$$

6 DESARROLLO DEL PROYECTO

Para realizar la evaluación multicriterio mediante el método del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) propuesto por Saaty, se definieron las unidades de decisión, estableciendo como criterios los componentes ambientales y como alternativas las consecuencias del derrame de hidrocarburos. Se construyó una estructura jerárquica y se realizó la ponderación para determinar cuáles son los criterios más afectados frente a las alternativas evaluadas. De esta manera y a partir del juicio de expertos (Tabla 9), se establece que los cuerpos de agua (45%) y las coberturas vegetales (35%) son los más vulnerables frente al derrame (Gráfica 1), ya que, favorece la migración de especies, el deterioro de la calidad del suelo, la reducción de diversidad en ecosistemas estratégicos, así como las afectaciones de servicios de aprovisionamiento y regulación propios de las áreas naturales.

Tabla 9. Matriz Comparación de Pares – Componentes Ambientales

Matriz de comparación de pares – Componentes Ambientales									
	Población	Cuerpos de agua	Vías	Cobertura vegetal	Matriz normalizada				Vector promedio
Población	1	1/5	5	1/3	0,10869565	0,08653846	0,25	0,13157895	0,14420327
Cuerpos de agua	5	1	9	1	0,54347826	0,43269231	0,45	0,39473684	0,45522685
Vías	1/5	1/9	1	1/5	0,02173913	0,04807692	0,05	0,07894737	0,04969086
Cobertura vegetal	3	1	5	1	0,32608696	0,43269231	0,25	0,39473684	0,35087903
Suma	9,2	2,31111111	20	2,53333333					

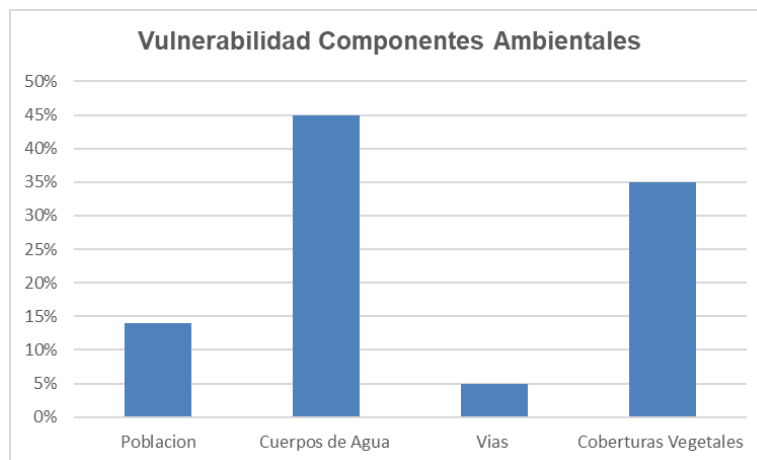
Fuente: Autor

Según Almeida¹²⁵ en el año 2006 las actividades de explotación petrolera, generan destrucción de la biodiversidad y del ambiente en general, donde las afectaciones de esta actividad producen daño principalmente en las coberturas vegetales y los cuerpos de agua.

¹²⁵ Almeida, A. Fases e impactos de la actividad petrolera. En: Manuales de Monitoreo Ambiental Comunitario. Acción Ecológica. Quito.3. Jackson A et al. 2011. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER – Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. J Animal Ecol. 2006. 80:595–602

Así mismo, como lo menciona Di Toro et al¹²⁶ en el año 2007, estudios desarrollados sobre el destino ambiental del petróleo demuestran que aunque la toxicidad del crudo disminuya con la degradación biológica o física, esta sigue siendo una fuente de contaminación para los organismos presentes en un ecosistema por largo tiempo, por lo que la población, los cuerpos de agua y las coberturas vegetales son susceptibles a afectaciones ya sea por daños estructurales, incendios, explosiones o la presencia de superficies deslizantes.

Gráfica 1. Vulnerabilidad Componentes Ambientales

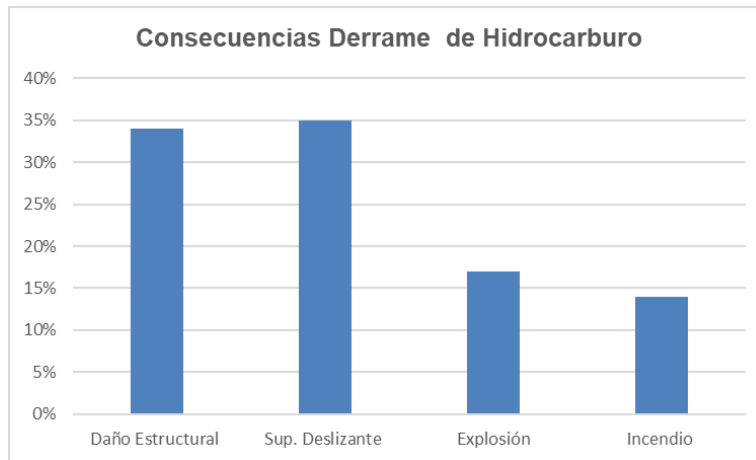


Fuente: Autor

Según la priorización de las consecuencias de los derrames de Hidrocarburos con respecto a los criterios ambientales, emitidos por el juicio de experto, se determina que la superficie deslizante es el evento que causa mayor vulnerabilidad en el ambiente con una ponderación del 34% (Gráfica 2).

¹²⁶ Di Toro, D.M. McGrath, J.A., Stubblefield, W.A. Predicting the Toxicity of Neat and Weathered Crude Oil: Toxic Potencial and the Toxicity of Saturated Mixtures. Environmenatl Toxicology and Chemistry. 2007. 26(1): 24 36

Gráfica 2. Consecuencias Derrame de Hidrocarburos



Fuente: Autor

Atlas y Bartha¹²⁷ en el 2002 respaldan esta jerarquía (Tabla 10), ya que para estos investigadores los accidentes de petróleo pueden ser más fácilmente contenidos en el medio ambiente, debido que los hidrocarburos son fluidos de baja viscosidad y pueden penetrar en el subsuelo y persistir, debido a las condiciones anóxicas predominantes, así como la contaminación debido a la persistencia del derrame en los acuíferos.

Tabla 10. Priorización Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Componentes Ambientales

PRIORIZACION CONSECUENCIAS DERRAMES DE HIDROCARBURO VS COMPONENTES AMBIENTALES					
	Población	Cuerpos de Agua	Vías	Coberturas Vegetales	Total
Daño estructural	0,11640811	0,25164835	0,21950133	0,550048969	0,33525137
Sup. Deslizante	0,53135324	0,55494505	0,04044743	0,039193532	0,34501082
Explosión	0,31402251	0,0967033	0,62348066	0,149282843	0,17266651
Incendio	0,03821614	0,0967033	0,11657058	0,261474656	0,14707129
Ponderación	0,14420327	0,45522685	0,04969086	0,350879027	

Fuente: Autor

¹²⁷ Atlas, R.M. y Bartha, R.. Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental. Pearson Educación, S.A. Madrid. 2002

Después de analizados los datos se tiene que $CI= 0,08754$. Luego se aplica el índice aleatorio (IA), donde se tiene un valor estándar de 0,99 cuando se evalúan 4 criterios. Para finalizar se determina la relación de consistencia $CR=0,088034$, Lo cual indica que los juicios no se encuentran sesgados y existe consistencia en el factor de ponderación.

De acuerdo a los valores obtenidos en el vector propio para la matriz del componente físico se establece el siguiente ponderador (Tabla 11):

Tabla 11. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Componentes Ambientales

AxP		
0,600662589	$CI=(n_{max}-n)/(n-1)$	0,08715351
1,974339905	$RI=1,98*(n-2)/n$	0,99
0,199288075	$CR=CI/RI$	0,08803385
1,487169952		
4,261460521		

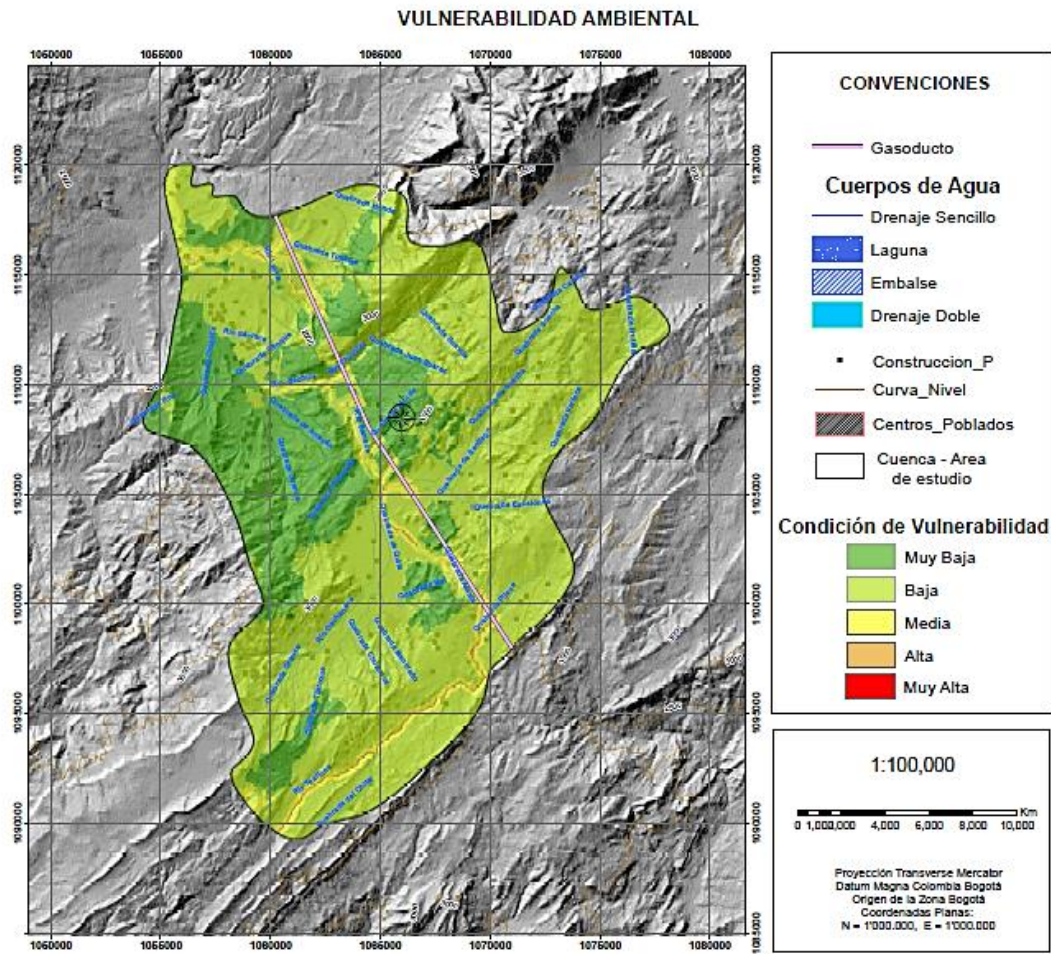
Fuente: Autor

6.1 Vulnerabilidad ambiental general por cada uno de los factores

A partir de los resultados presentados en el análisis jerárquico, se presenta la vulnerabilidad ambiental ante un posible derrame de hidrocarburos (Figura 12), donde se evidencia en la zona de estudio que el río Teatinos en jurisdicción de los municipios de Samacá y Ventaquemada, y la vegetación relacionada al río y próxima al ducto, presenta la vulnerabilidad en una categoría muy alta, debido que la escorrentía de las aguas se mueve en sentido oriente occidente, por la pendiente que se presenta en la cuenca, lo que genera que ante un eventual derrame de un oleoducto o poliducto, los materiales contaminantes seguirán la dirección de flujo, generando alteraciones de los elementos que se encuentren relacionados en el recorrido de afluente hídrico, esto debido a que las características físicas de la zona de estudio como la pendiente y el relieve favorece la movilidad y rutas de derrame del fluido contaminante¹²⁸.

¹²⁸ Parrot, F., Sommer, I., Oropeza, O., Ortiz Pérez, M. A., Sánchez Salazar, T., Casado Izquierdo, J. M., . . . Quintero Pérez, J. A. Modelación del comportamiento ambiental de derrames de hidrocarburos en sitios. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. (2009).

Figura 12: Vulnerabilidad ambiental general por cada uno de los factores



Fuente: Autor

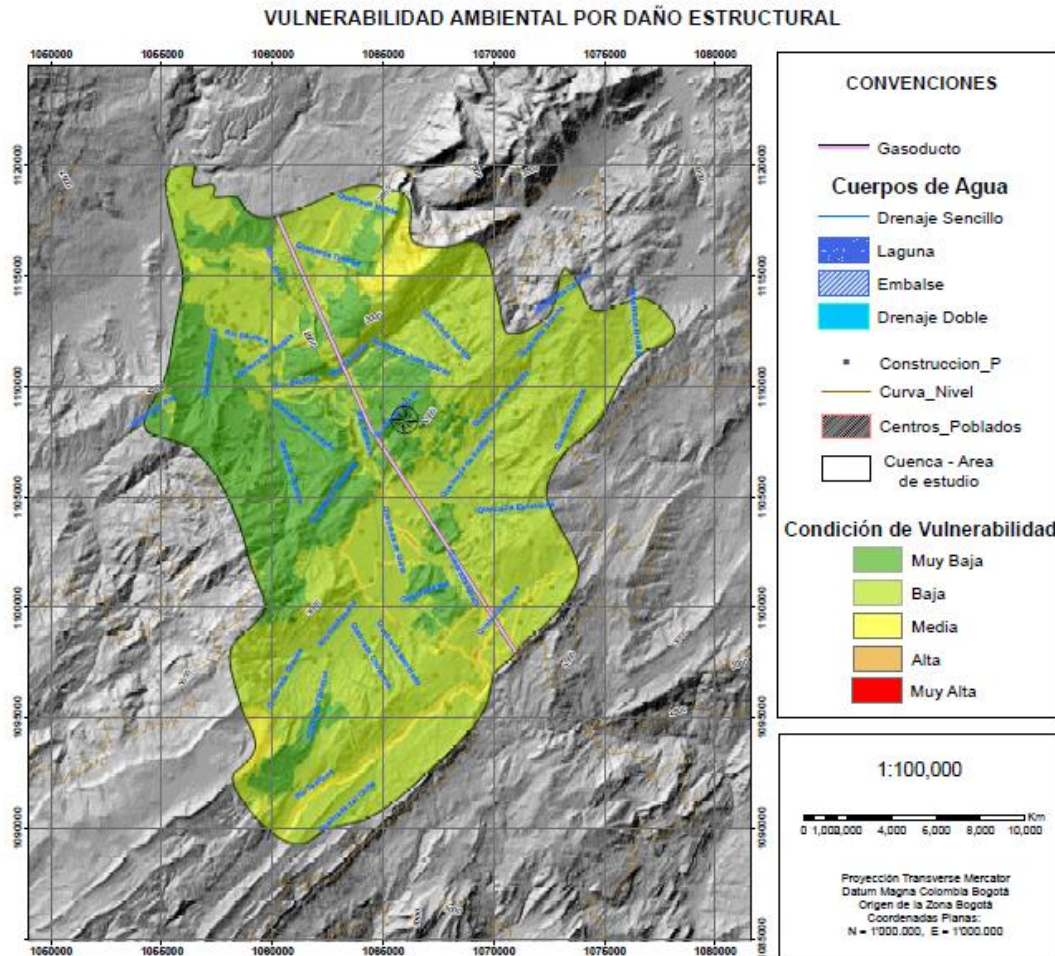
6.2. Vulnerabilidad Ambiental producto de las alternativas

A continuación, se presenta el procesamiento y análisis espacial desarrollado para las alternativas evaluadas en el proceso de análisis jerárquico las cuales corresponden a las posibles consecuencias que se pueden generar frente a un derrame de un oleoducto o poliducto.

✓ Daño estructural

Los elementos ambientales asociados al ducto, presentan en todos sus puntos un grado de vulnerabilidad que varía de la proximidad que se encuentre de estas estructuras. Esto se debe a que los daños estructurales pueden presentarse eventualmente a causa de la falta de mantenimiento de las tuberías o a la intervención directa de grupos al margen de la ley, que ocasiona rupturas de tuberías para el desarrollo de sus actividades institucionales, lo que acarrearía que se generaran derrames, y por ende afectación a los recursos circunvecinos, provocando afectación de las estructuras ecosistémicas establecidas en el medio ambiente, como parte de la interacción de los recursos naturales, por tanto el juicio de expertos genera una ponderación del 33%, ya que los eventos provocados por la actividad de explotación de hidrocarburos en nuestro país se ha generado principalmente por los daños estructurales. A continuación se presenta el mapa de vulnerabilidad por daño estructural (Figura 13):

Figura 13: Vulnerabilidad ambiental por daño estructural



Fuente: Autor

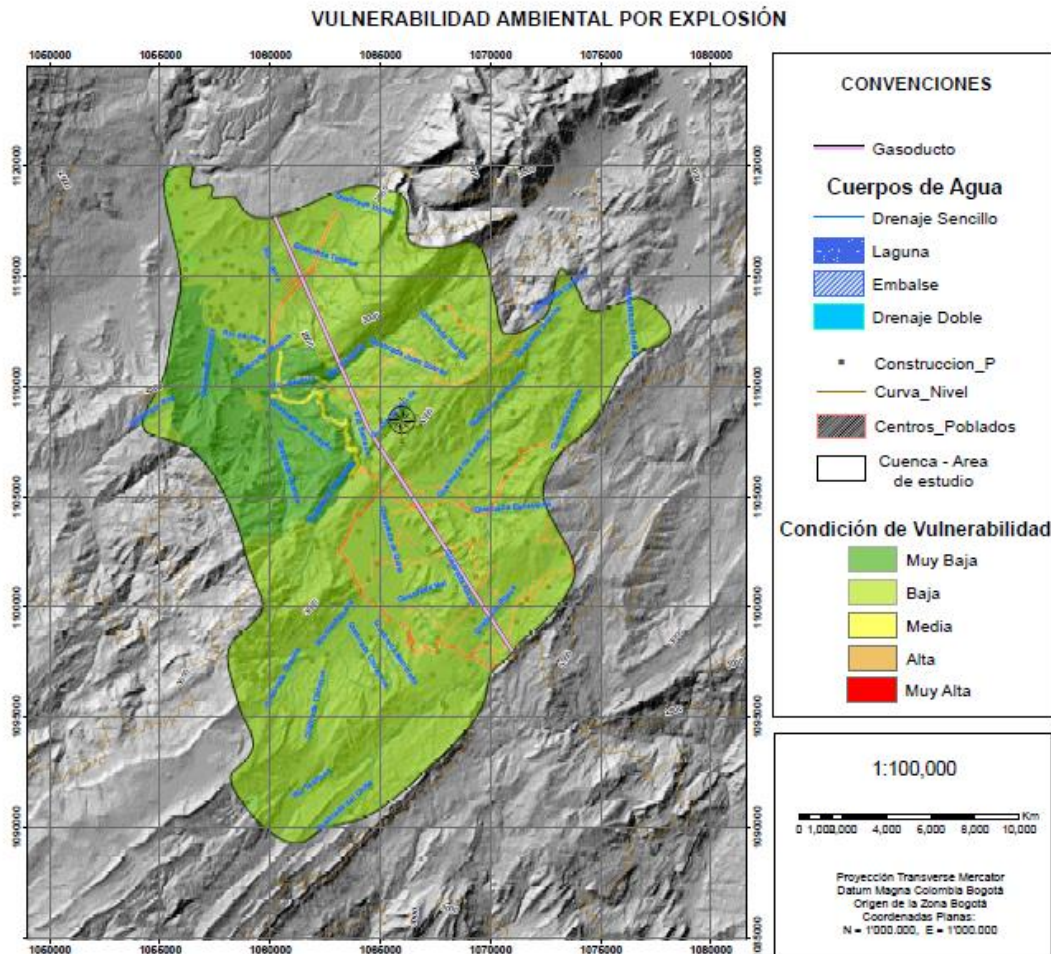
✓ Explosión

Las explosiones generadas por accidentes en oleoductos y poliductos, ocasiona daños directos a los elementos presentes en el área de influencia de esta consecuencia.

En los datos obtenidos por el juicio de expertos vemos que esta se presenta con una ponderación total del 17%, afectando principalmente el componente de vías, esto se debe a que son infraestructuras físicas que para su construcción y adecuación se requiere de obras de ingeniería, presupuesto y capital humano, y frente a una explosión, estas estructuras se perderían totalmente, o los daños serían tan críticos que provocaría la afectación de otros componentes ambientales incluido

la población, ya que esta utiliza estas rutas para desarrollar sus actividades diarias dentro de una zona determinada. Teniendo en cuenta los valores obtenidos se presenta el mapa de vulnerabilidad ambiental por incendios (Figura 14)

Figura 14: Vulnerabilidad por explosión



Fuente: Autor

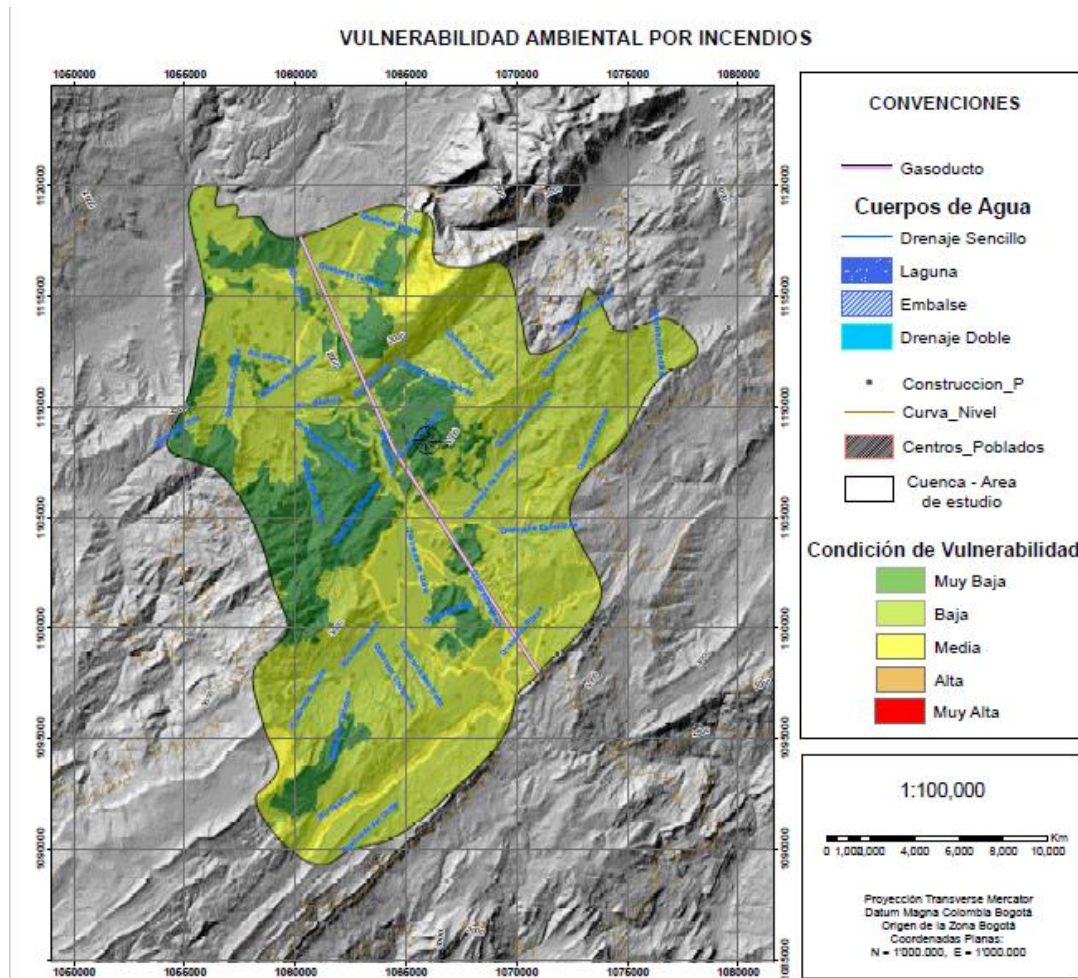
✓ Incendios

De acuerdo a la vulnerabilidad ambiental evaluada por el juicio de expertos, la alternativa de incendios presenta un porcentaje del 14% de ponderación total, siendo esta consecuencia la principal causa de remoción de coberturas vegetales frente a una posible fuga de un oleoducto o poliducto.

Ante un posible derrame de hidrocarburo, los incendios afectan principalmente a las coberturas vegetales, ya que las altas temperaturas ocasionan afectación en el

sustrato y por ende daño a las plantas presentes en la zona. Por otra parte, la afectación por las llamas produce remoción de coberturas vegetales, llevando a cabo una pérdida de biodiversidad, ya que el recurso flora es el habitat de las especies de fauna de una región. Teniendo en cuenta los valores obtenidos se presenta el mapa de vulnerabilidad ambiental por incendios (Figura 15), en la que podemos identificar que, en toda la zona de influencia del ducto, presenta vulnerabilidad ante un posible derrame.

Figura 15: Vulnerabilidad ambiental por incendios



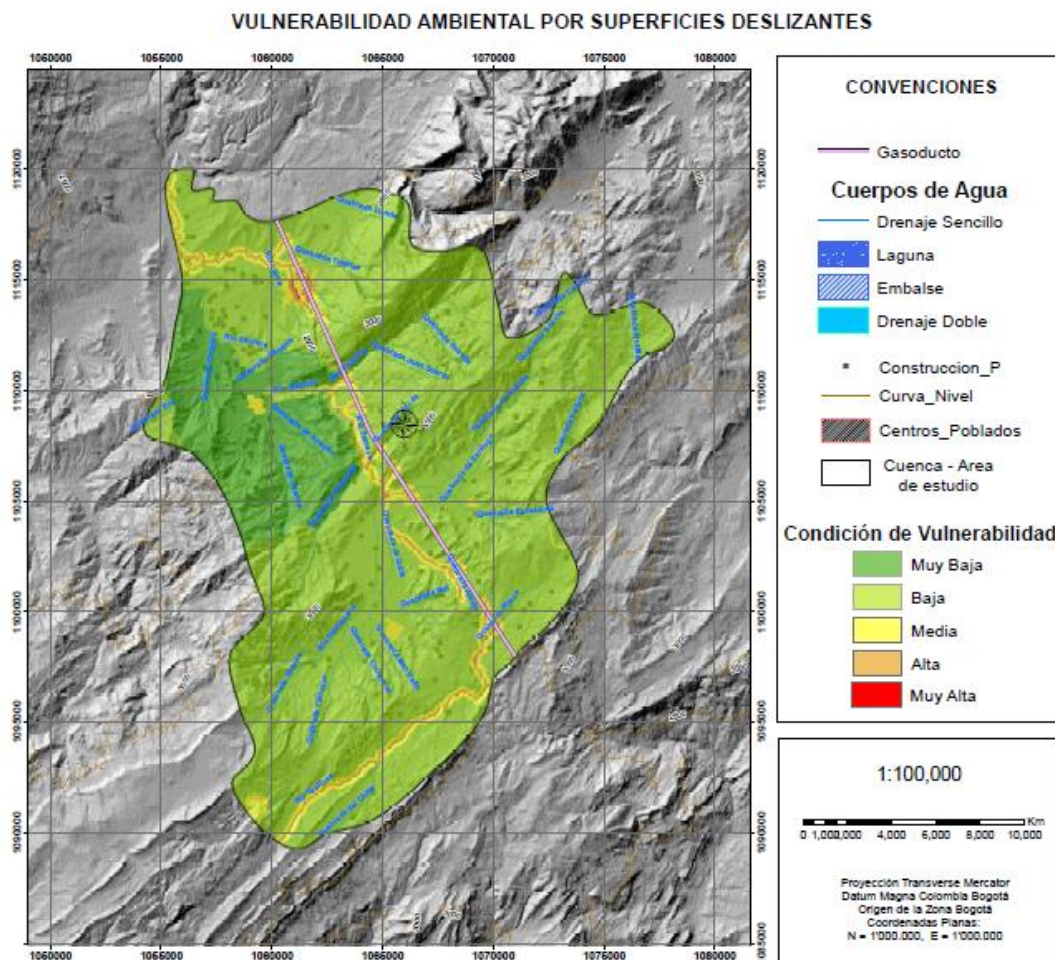
Fuente: Autor

✓ Superficies deslizantes

En el desarrollo de la metodología, las superficies deslizantes afectan principalmente a la población y a los cuerpos de agua, con un porcentaje de

ponderación total de 53 y 55% respectivamente. En el caso de estudio se debe, a que el paso del ducto afectaría directamente al casco urbano del municipio de Villa de Leiva, ya que frente a un eventual derrame del ducto, impactaría negativamente la infraestructura de esta población, ocasionando pérdidas económicas y en mayor grado pérdida de vidas humanas, ya que estas superficies deslizantes contaminarían los recursos naturales de los cuales se provee la población en general. De igual manera la afectación al recurso hídrico, desarrollaría una generación de alteraciones a nivel ecosistémico ya que no solo las personas hacen uso de este recurso, sino que muchas especies bióticas se verían afectadas por la contaminación y pérdida del recurso, siendo esta la consecuencia más significativa evaluada para el desarrollo de esta metodología. A continuación, se presenta el mapa de vulnerabilidad por superficies deslizantes (Figura 16)

Figura 16: Vulnerabilidad ambiental por superficies deslizantes



Fuente: Autor

6.3. Componente Biótico - Coberturas vegetales

Para el criterio de coberturas vegetales, se calculó el factor de ponderación (Tabla 12), donde el juicio de expertos determinó que los incendios son los que podrían llegar a generar mayor afectación en las coberturas vegetales con un porcentaje de vulnerabilidad del 54% (Gráfica 3).

Tabla 12. Matriz de Comparación de Pares- Coberturas Vegetales.

MATRIZ DE COMPARACION DE PARES - COBERTURA VEGETAL									
	Explosión	Incendio	Sup. Deslizante	Daño Estructural	Matriz Normalizada				Vector Promedio
Explosión	1	7/30	7/30	4	0,0974026	0,14216634	0,04359431	0,19047619	0,11840986
Incendio	4 1/2	1	4	7 1/2	0,43831169	0,60928433	0,74733096	0,35714286	0,53801746
Sup. deslizante	4 1/2	4/15	1	8 1/2	0,43831169	0,16247582	0,18683274	0,4047619	0,29809554
Daño estructural	4/15	13/92	5/42	1	0,02597403	0,0860735	0,02224199	0,04761905	0,04547714
Suma	10,2666667	1,64126984	5,35238095	21					

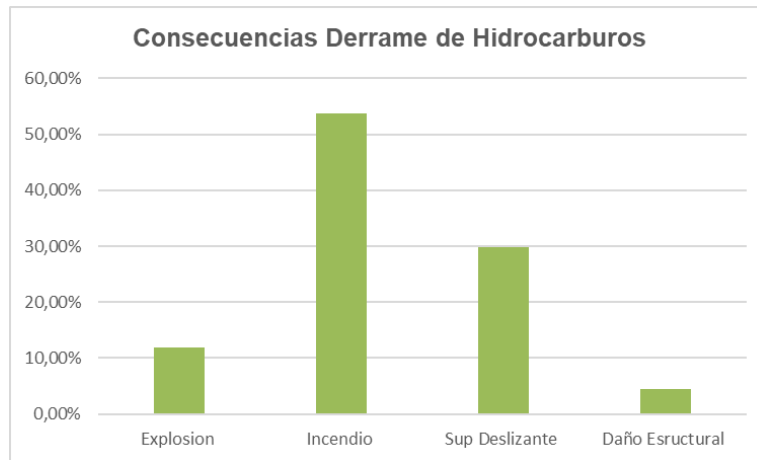
Fuente: Autor

Según como se menciona en el Tributo¹²⁹ en el año 2001, como consecuencia de un accidente en un gasoducto, los incendios ocasionaron un daño considerable en la vegetación circunvecina, a causa de la propagación de las llamas, debido a que generan quema y remoción de las coberturas vegetales, provocando la destrucción de hábitats y pérdidas de biodiversidad debido a la migración de especies, igualmente Rahman¹³⁰ en el 2004 presenta efectos similares en el evento sucedido en Lawachhara National Park en Bangladesh, donde la afectación más considerable ocurrió en las coberturas vegetales, lo cual se enfatiza al tener presente que los componentes de los hidrocarburos son altamente volátiles y generan ignición de forma fácil y rápida.

¹²⁹ El Tributo. Explotó una cañería del gasoducto Norandino en el departamento Orán. Editorial. 2001

¹³⁰ Rahman, A. Heading for a repeat of the Magurchhara disaster. Gas fires and living forests just don't mix. 2004. The Daily Star. <http://www.thedailystar.net/2004/12/27/d41227020422.htm>

Gráfica 3. Consecuencias Derrame de Hidrocarburos – Coberturas Vegetales



Fuente: Autor

Otra de las consecuencias que genera mayor afectación ante un derrame de hidrocarburo en las coberturas vegetales son las superficies deslizantes, debido a que este componente biótico es vulnerable (30%), ya que esta mancha ocasiona daños en las membranas celulares de las plantas ocasionando intoxicación directa por impedir el proceso natural de exclusión de sales¹³¹.

En cuanto a las explosiones, según el juicio de expertos, el porcentaje de vulnerabilidad frente a la vegetación es del 12 %, debido a que estas son afectadas por la onda de choque alterando de forma directa las especies vegetales causando lesiones a nivel puntual, ya que estas no se generan sinergias en el medio ambiente¹³².

Finalmente, en las coberturas vegetales los daños estructurales no ocasionan una afectación considerable frente a la vulnerabilidad que se genera ante un derrame de hidrocarburo, obteniendo 5% de ponderación después de la evaluación por parte del juicio de expertos, debido a que estas afectaciones no se ven tan marcadas en términos globales si no que se presenta una afectación puntual¹³³.

¹³¹ Olguín E, EM Hernández, G Sánchez. Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. Rev. Int. Contam. Ambient. 2007 23(3), 139-154.

¹³² Kimerling, J. Crudo Amazónico. Ed. Abya Yala. Quito. 1993

¹³³ IPIECA. Biological Impacts of oil pollution: rocky shores. IPIECA Reporte Series 7. London. 2000

Teniendo en cuenta los tipos de cobertura vegetal, después de evaluar la matriz de ponderación (tabla 13), los expertos consideran que posiblemente las coberturas más vulnerables son la vegetación de paramo (VP) (28%), el Bosque denso (BND) y arbustos- matorrales (AM) (27%), esto debido a sus características fisiológicas y morfológicas que para su desarrollo y recuperación necesitan un periodo de tiempo muy prologado generando que varias de estas especies se encuentren en peligro crítico y vía de extinción

Tabla 13. Matriz de Comparación de pares – Tipos de Cobertura

MATRIZ DE COMPARACION DE PARES – TIPOS DE COBERTURA											
	VP	BND	AM	VEE	PNS	Matriz Normalizada					Vector Promedio
VP	1	1	1	4	3	0,27777778	3/11	3/11	0,28571429	0,29032258	0,27985384
BND	1	1	1	3	3	0,27777778	0,27272727	3/11	0,21428571	0,29032258	0,26556812
AM	1	1	1	3	3	5/18	3/11	3/11	3/14	9/31	0,26556812
VEE	4/15	1/3	1/3	1	1/3	0,07407407	0,09090909	1/11	0,07142857	0,03225806	0,07191578
PNS	1/3	1/3	1/3	3	1	0,09259259	0,09090909	1/11	0,21428571	0,09677419	0,11709414
SUMA	3 3/5	3,66666667	3 2/3	14	10,33333333						

Fuente: Autor

En cuanto a la cobertura de los pastos naturales sabanas (PNS) muestra un porcentaje de vulnerabilidad del 12%, el cual es bajo debido a que este tipo de vegetación no se encuentra tan próxima a la infraestructura del transporte de hidrocarburos. Finalmente se tiene la vegetación esclerófitia espinosa (VEE) con una ponderación del 7%, esto se debe a las características que tienen este tipo de plantas, ya que pueden adaptar de mejor forma a las posibles afectaciones que se presentan frente a un derrame de hidrocarburo.

Después de analizados los datos de las coberturas vegetales se tiene que CI= 0,0085132. Luego se aplica el índice aleatorio (IA), donde se tiene un valor estándar de 0,99 cuando se evalúan 5 criterios. Para finalizar se determina la relación de consistencia CR=0,085992, Lo cual indica que los juicios no se encuentran sesgados y existe consistencia en el factor de ponderación.

De acuerdo a los valores obtenidos en el vector propio para la matriz del componente físico se establece el siguiente ponderador (Tabla 14):

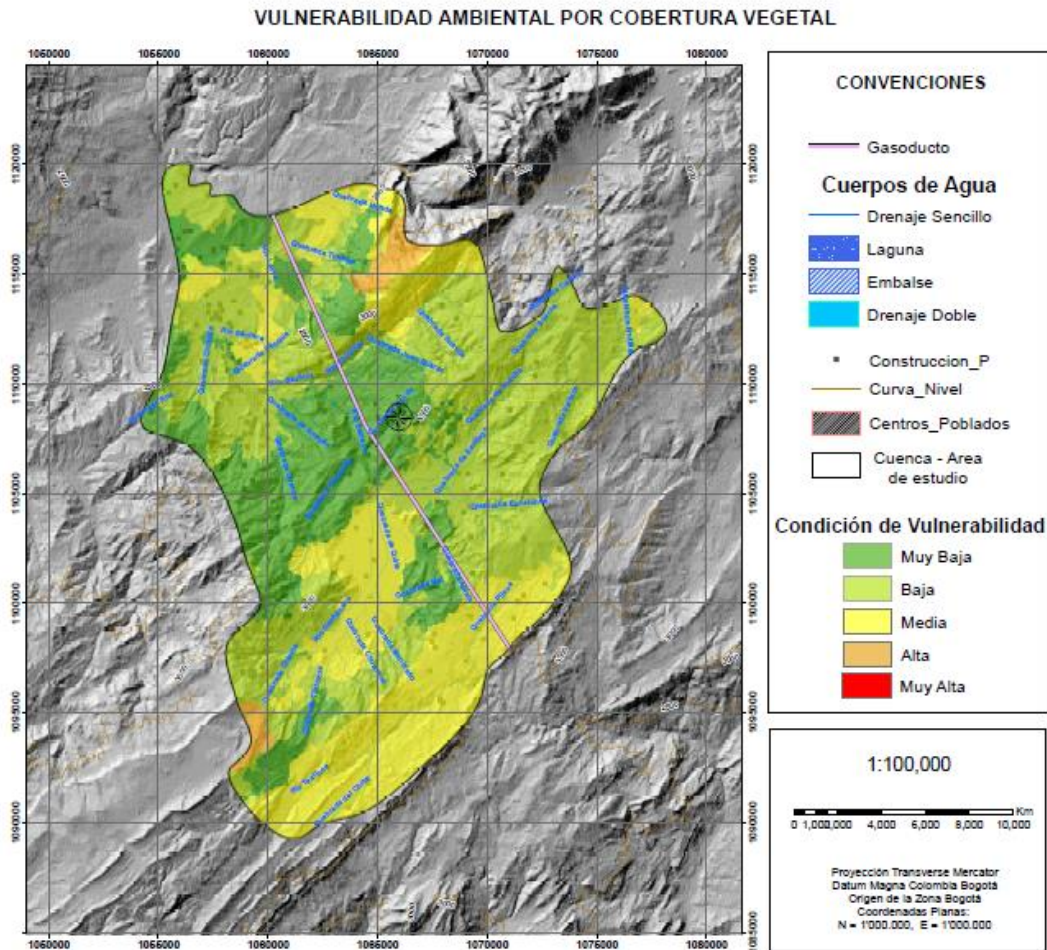
Tabla 14. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Coberturas Vegetales

AxP		
0,542102	$CI=(n_{max}-n)/(n-1)$	0,0085132
2,400598	$RI=1,98*(n-2)/n$	0,99
1,144228	$CR=CI/RI$	0,085992
1,487169952		
0,168469		
4,255397		

Fuente: Autor

A continuación, se presenta el mapa de zonificación de coberturas vegetales (Figura 17), para la zona 191 de la grilla dispuesta para el departamento de Boyacá según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), donde se distinguen cuatro categorías de vulnerabilidad ambiental (alta, media, baja y muy baja). Siendo las más representativas la categoría de sensibilidad alta y media con porcentajes de territorio de 28% y 27% que corresponden a zonas de paramo y bosques naturales densos.

Figura 17. Zonificación Vulnerabilidad Coberturas Vegetales



Fuente: Autor

A partir de este resultado se presenta una aproximación espacial de las condiciones del territorio, frente al paso de un poliducto, en donde ante un posible derrame de hidrocarburos, las coberturas vegetales, presentan en todos los puntos geográficos un grado de vulnerabilidad que varía según el tipo de vegetación existente o próximo a la tubería, donde los municipios de Chiquiza y Ventaquemada presentan un grado de Vulnerabilidad alta, debido a que la vegetación existente en esta zona corresponde a vegetación de Bosque Denso y vegetación de páramo, las cuales son coberturas vegetales de difícil recuperación, esto debido a que sus

características fisiológicas, bajas tasas de reproducción y por sus periodos extensos de desarrollo¹³⁴.

6.4. Componente Físico – Cuerpos de Agua

Para el criterio de Cuerpos de Agua, se calculó el factor de ponderación (Tabla 15), donde el juicio de expertos determinó que las superficies deslizantes son las que podrían llegar a generar mayor afectación en los cuerpos de agua con un porcentaje de vulnerabilidad del 33% (Gráfica 4).

Tabla 15. Matriz de Comparación de Pares- Cuerpos de Agua

MATRIZ DE COMPARACION DE PARES - CUERPOS DE AGUA									
	Incendio	Sup Deslizante	Daño Estructural	Explosión	Matriz Normalizada				Vector Promedio
Incendio	1	2 13/30	1 13/30	4	0,127478 75	0,334132 52	0,257779 05	0,233657 86	0,23826204
Sup deslizante	3 5/18	1	2 2/7	5 11/14	0,417847 03	0,137314 73	0,411076 22	0,337969 4	0,32605185
Daño estructural	3 3/10	2	1	6 1/3	0,420679 89	0,274629 47	0,179845 85	0,369958 28	0,31127837
Explosión	4/15	1 62/73	53/63	1	0,033994 33	0,253923 28	0,151298 89	0,058414 46	0,12440774
SUMA	7,844444 44	7,28253968	5,56031746	17,119047 62					

Fuente: Autor

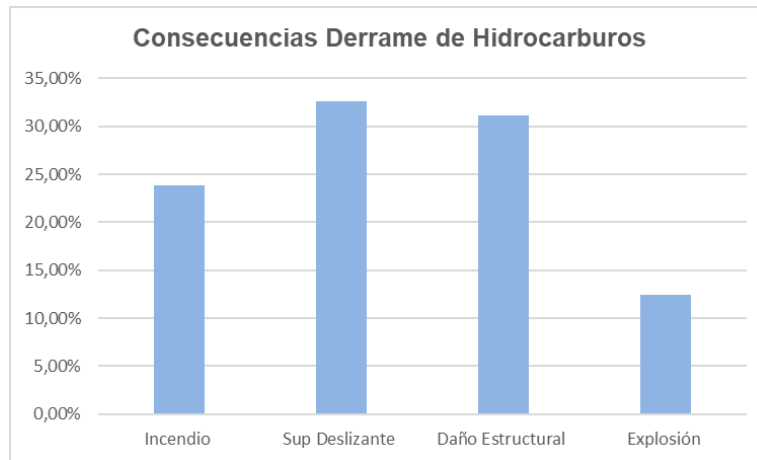
Según los expertos las superficies deslizantes, son las que más afectan los cuerpos de agua, Tejada y Afanador¹³⁵ en el 2003 argumentan que el desplazamiento de las manchas de hidrocarburo afecta todo el ecosistema acuático. Así mismo, ITOPF¹³⁶ en el 2011 consideran que una de las principales afectaciones es la pérdida de biodiversidad en los cuerpos de agua, esto debido principalmente a la composición química propia de los hidrocarburos.

¹³⁴ <https://ecosistemas.ovacen.com/bioma/paramo/> consultada el 27 de octubre de 2019

¹³⁵ Tejada, E. y Afanador, F. Evaluación del riesgo debido a derrame de hidrocarburos en la bahía de Tumaco. División de Zona Costera, Centro Control Contaminación del Pacífico –CCCP Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia. 2003.

¹³⁶ ITOPF. Efectos de la contaminación por hidrocarburos en el medio marino. Documento de información técnica. Olivers Yard, 55 City Road, London. 2011.

Gráfica 4. Consecuencias Derrame de Hidrocarburos – Cuerpos de Agua



Fuente Autor

Los daños estructurales son los causantes de varias afectaciones a los cuerpos de agua principalmente debido a los componentes aromáticos disueltos, que alteran los mecanismos de quimiorrecepción para algunos organismos marinos y por ende acabar con los procesos de reproducción, por lo tanto el juicio emitido por los expertos consideran que el porcentaje de vulnerabilidad es de un 31%, debido a las alteraciones que se generan a nivel hídrico.

Los cuerpos de agua también presentan una vulnerabilidad frente a los incendios producto de un derrame de hidrocarburos, con una ponderación del 24%, aunque este porcentaje es bajo, se pueden presentar como consecuencia de la volatilidad de los compuestos de los hidrocarburos, por lo que las afectaciones serían más del tipo superficial¹³⁷, debido a que el petróleo es más liviano que el agua y puede permanecer expuesto por un periodo de tiempo en el medio ambiente, generando no solo la contaminación propia del compuesto, sino además afectaciones como consecuencia de los incendios. Y finalmente la destrucción de las vertientes de agua a causa de las explosiones, produce contaminación de aguas, para lo cual los derrames en el recurso hídrico presentan vulnerabilidad, que según la ponderación emitida es del 12%

¹³⁷ Wernersson, A.S. Aquatic ecotoxicity due to oil pollution in the Ecuadorian Amazon. *Aquatic Ecosystem Health & Management*. 7(1): 127-136. 2004.

Para los cuerpos de agua se analizaron cuatro tipos de estructuras hídricas (Ríos, lagos, canales, embalses), obteniendo que los ríos son considerados por los expertos como los más vulnerables frente a un derrame de un poliducto u oleoducto además que la historia ha demostrado que estos cuerpos hídricos siempre son los más afectados por su proximidad a la infraestructura petrolera, y a la propagación de la contaminación por acción del caudal, por lo tanto la ponderación realizada presenta la siguiente jerarquía frente a la vulnerabilidad de los cuerpos de agua (Tabla 16):

Tabla 16. Matriz de Comparación de pares – Tipos de Cuerpo de Agua

MATRIZ DE COMPARACION DE PARES – TIPO DE CUERPOS DE AGUA									
	Ríos	Embalse	Lago	Canales	Matriz Normalizada				Vector Promedio
Ríos	1	8	6	3	0,61284047	0,42105263	0,58441558	0,66596195	0,57106766
Embalse	8/63	1	4/15	6/35	0,07782101	0,05263158	0,02597403	0,03805497	0,0486204
Lago	6/35	4	1	1/3	0,10505837	0,21052632	0,0974026	0,07399577	0,12174576
Canales	1/3	6	3	1	0,20428016	0,31578947	0,29220779	0,22198732	0,25856618
SUMA	1,63174603	19	10,2666667	4,5047619					

Fuente: Autor

Después de analizados los datos de las coberturas vegetales se tiene que $CI=0,0901091$. Luego se aplica el índice aleatorio (IA), donde se tiene un valor estándar de 0,99 cuando se evalúan 4 criterios. Para finalizar se determina la relación de consistencia $CR=0,0910192$ Lo cual indica que los juicios no se encuentran sesgados y existe consistencia en el factor de ponderación.

De acuerdo a los valores obtenidos en el vector propio para la matriz del componente físico se establece el siguiente ponderador (Tabla 17):

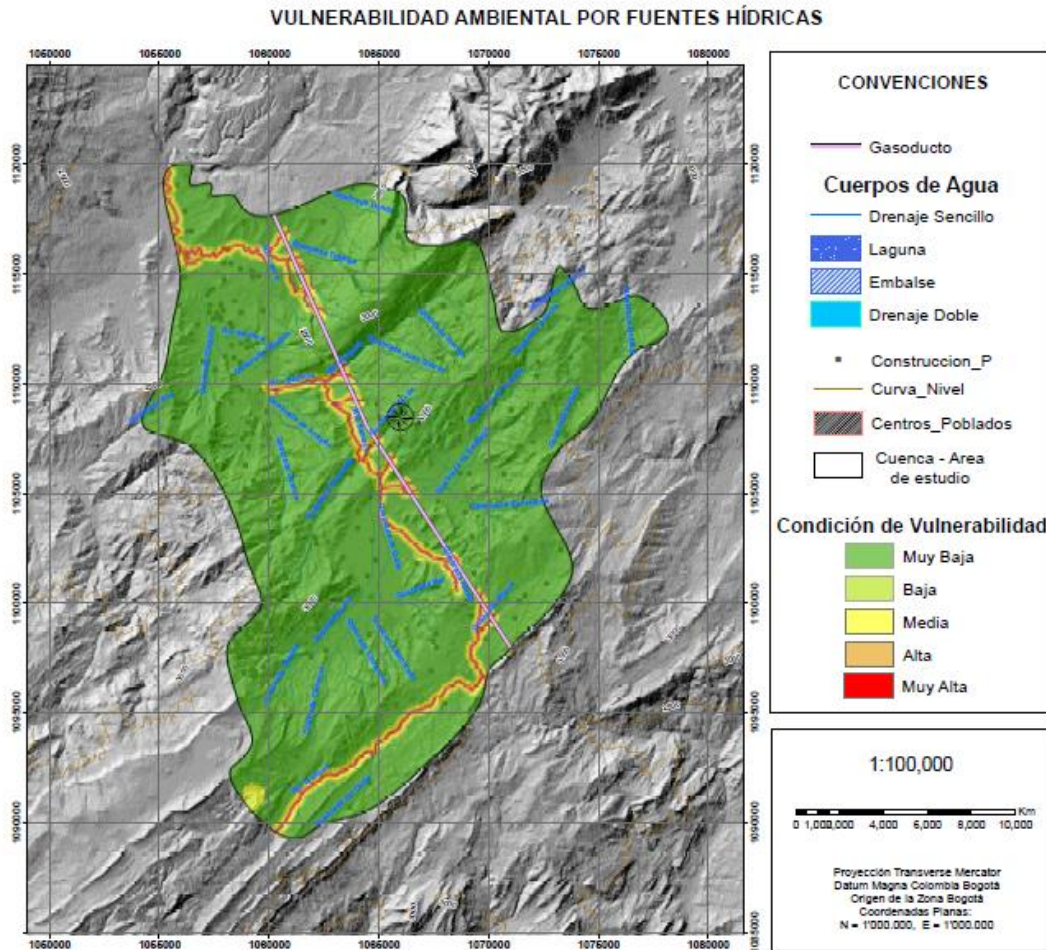
Tabla 17. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Cuerpos de Agua

AxP		
2,466204	$CI=(n_{max}-n)/(n-1)$	0,0901091
0,1979281	$RI=1,98*(n-2)/n$	0,99
0,5003134	$CR=CI/RI$	0,0910192
1,1058817		
4,255397		

Fuente: Autor

Para este estudio se consideraron los ríos como principal elemento. Para el análisis de esta variable y como se observa en el mapa temático (Figura 18), en el departamento de Boyacá y principalmente en los municipios de Villa de Leyva, Chíquiza, Motavita, Samacá, Sora y Cucaita, esta zona presenta una gran riqueza de recurso hídrico, donde sus tierras están surcadas por numerosos ríos que constituyen un gran potencial hídrico y eléctrico para el departamento y el país, por lo que la vulnerabilidad de este componente natural es alta debido a la utilidad y por ser un bien natural al servicio de la sociedad y el medio ambiente. Ante un posible derrame de un oleoducto o poliducto los ríos más afectados serían el río Leyva, El río Sáchica, el río Samacá, el río Chíquiza, y el río Teatinos, debido a que el relieve de la zona presenta una pendiente que favorece la escorrentía de los elementos contaminantes, generando una afectación de los componentes ambientales asociados a los cuerpos de agua.

Figura 18. Zonificación Vulnerabilidad Cuerpos de Agua



Fuente: Autor

6.5. Componente Socioeconómico y Cultural – Vías

Para el criterio de Vías, se calculó el factor de ponderación (Tabla 18), donde el juicio de expertos determinó que los incendios son las que podrían llegar a generar mayor afectación en las vías con un porcentaje de vulnerabilidad del 53% (Gráfica 5), como consecuencia del daño que se puede ocasionar debido a las altas temperaturas que pueden alcanzar, generando desgaste y pérdida de la capa asfáltica.

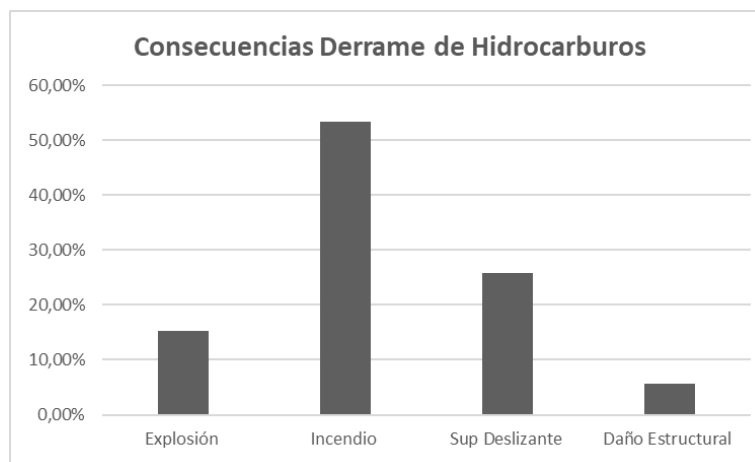
Tabla 18. Matriz de Comparación de Pares – Vías

Matriz De Comparación De Pares - Vías					Matriz Normalizada				Vector Promedio
	Explosión	Incendio	Sup. Deslizante	Daño Estructural					
Explosión	1	7/30	14/15	4	0,1098901	0,1421663	0,1487477	0,2105263	0,15283264
Incendio	4 1/2	1	4	7 1/2	0,4945054	0,6092843	0,6374905	0,3947368	0,5340043
Sup deslizante	3 1/3	4/15	1	6 1/2	0,3663003	0,1624758	0,1593726	0,3421052	0,25756352
Daño estructural	4/15	13/92	14/41	1	0,0293040	0,0860735	0,0543890	0,0526315	0,05559955
Suma	9,1	1,6412698 4	6,2746031 7	19					

Fuente: Autor

Las vías son consideradas como una parte activa del entorno natural, ya que en ocasiones se comportan como un corredor ecológico. Según Arévalo¹³⁸ en el año 2006 las vías son un parámetro que se debe tener en cuenta principalmente para atender las emergencias ocasionadas por eventos naturales o actividades antrópicas lo que las convierte en un elemento importante para el desarrollo de un ecosistema y una sociedad.

Gráfica 5: Consecuencias Derrame de Hidrocarburos – Vías



Fuente: Autor

¹³⁸ Arévalo, P. 2006. Plan de emergencias para derrames de hidrocarburos Provenientes de las estaciones de servicio en las redes de Alcantarillado de la zona 2 del acueducto de Bogotá. Universidad de la Salle Facultad de ingeniería ambiental y sanitaria. BOGOTÁ D.C. 2006.

Por otra parte, las vías presentan vulnerabilidad ante las superficies deslizantes con una ponderación del 26%, debido a que estas manchas causan inestabilidad de vehículos y bloqueo de vías, afectando directamente la movilización y la comunicación terrestre del territorio nacional.

La vulnerabilidad de las vías a causa de las explosiones presenta un valor de 15% las cuales originan problemas por la afectación directa que se presenta, esto teniendo en cuenta la proximidad de la línea del oleoducto o poliducto, y finalmente el daño estructural con un valor del 6%.

Teniendo en cuenta los tipos de vías en nuestro territorio nacional, las vías se clasifican en primarias, secundarias y terciarias, la cual depende de la composición y/o acabados del terreno, como por ejemplo si estas cuentan con capa asfáltica-pavimentada o afirmado. Los expertos consideran que las vías primarias (VP) son las más vulnerables debido a que son el eje de comunicación entre municipios y ciudades y en algunos lugares comunica la parte urbana con la parte rural, es por esto que estas vías por su uso y su infraestructura se pueden ver más alteradas por los derrames de hidrocarburos por lo tanto según el juicio de expertos recibe un valor de 68%, frente a un 22% de las vías secundarias (VS) y finalmente un 9% de las vías terciarias (VT) las cuales son carreteras de uso netamente rural (Tabla 19).

Tabla 19. Matriz de Comparación de pares – Clasificación de las Vías

MATRIZ DE COMPARACION DE PARES – VIAS							
	Vp	Vs	Vt	Matriz Normalizada			Vector Promedio
VP	1	4	6	0,69536424	0,75	0,6	0,68178808
VS	4/15	1	3	0,18543046	0,1875	0,3	0,22431015
VT	6/35	1/3	1	0,1192053	0,0625	0,1	0,09390177
SUMA	1 39/89	5,33333333	10				

Fuente: Autor

Después de analizados los datos de las coberturas vegetales se tiene que CI= 0,0579073. Luego se aplica el índice aleatorio (IA), donde se tiene un valor estándar de 0,66 cuando se evalúan 3 criterios. Para finalizar se determina la relación de consistencia CR=0,0877384 Lo cual indica que los juicios no se encuentran sesgados y existe consistencia en el factor de ponderación.

De acuerdo a los valores obtenidos en el vector propio para la matriz del componente físico se establece el siguiente ponderador (Tabla 20):

Tabla 20. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Vías

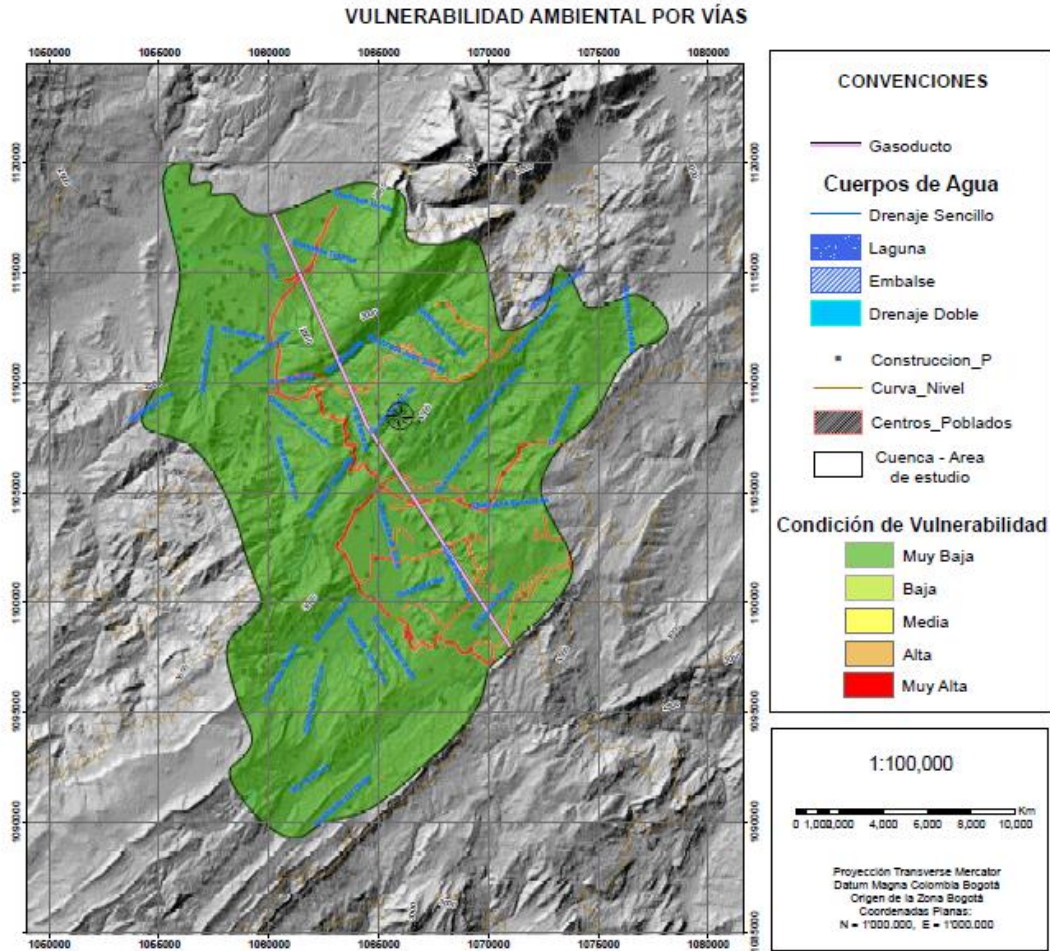
AxP		
2,1424393	$CI=(n_{max}-n)/(n-1)$	0,0579073
0,6978256	$RI=1,98*(n-2)/n$	0,66
0,2855498	$CR=CI/RI$	0,0877384
3,1158147		

Fuente: Autor

La calificación para el tema de vías presenta que el 0,04% de vulnerabilidad frente a los demás factores evaluados para lo cual con una ponderación del 68% las vías primarias son las más afectadas ante un posible derrame de hidrocarburo, estas estadísticas se deben a que las redes viales son las que predominan en la zona de estudio son los ejes viales terciarios y rurales.

En lo referente a la infraestructura vial, el departamento de Boyacá, actualmente se encuentra comunicado con una extensa red vial que ofrece cobertura a un alto porcentaje del territorio especialmente en el área rural, ante un posible accidente en un oleoducto o poliducto, la vulnerabilidad en las vías es alta, esto debido a que en los sitios de relación de las vías con el ducto hay una afectación directa, ya que frente a un posible derrame, se van a generar taponamiento de vías impidiendo la comunicación de las regiones, y la movilidad de los vehículos, interfiriendo en las actividades propias de la zona. (Figura 19).

Figura 19. Zonificación Vulnerabilidad Vías



Fuente: Autor

6.6. Componente Socioeconómico y Cultural – Población

Para el criterio de Población, se calculó el factor de ponderación (Tabla 21), donde el juicio de expertos determinó que las superficies deslizantes son las que podrían llegar a generar mayor afectación en los cuerpos de agua con un porcentaje de vulnerabilidad del 39% (Gráfica 6), ya que las afectaciones se presentan de forma indirecta, es decir, los ítems evaluados afectan principalmente tanto a los cuerpos de agua como las coberturas vegetales ocasionando con ello pérdidas en las actividades económicas desarrolladas en una región.

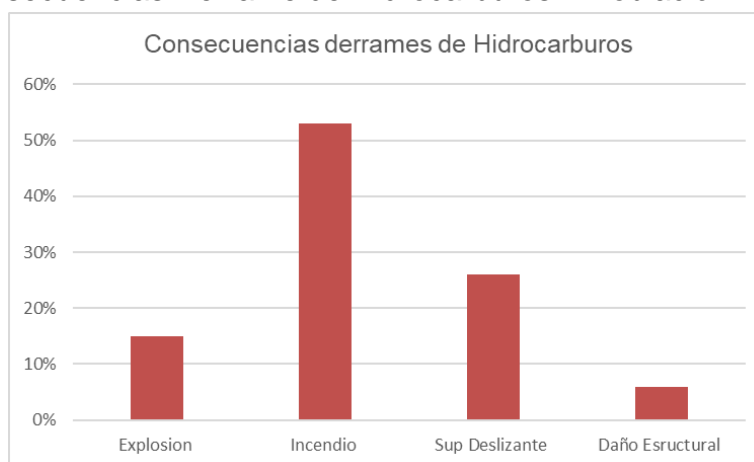
Tabla 21: Matriz de Comparación de Pares- Población

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE PARES- POBLACION									
	Explosión	Incendio	Sup. Deslizante	Daño Estructural	Matriz Normalizada				Vector Promedio
Explosión	1	1 14/15	7/30	4 1/2	0,11087645	0,28537957	0,06413613	0,22727273	0,1719162
Incendio	3 2/7	1	2 5/18	6 3/10	0,36430834	0,14761012	0,62609075	0,31818182	0,36404776
Sup deslizante	4 1/2	2 1/2	1	8	0,49894403	0,3690253	0,27486911	0,4040404	0,3867197
Daño estructural	7/30	1 29/85	8/63	1	0,02587117	0,197985	0,03490401	0,05050505	0,0773163
Suma	9,01904762	6,77460317	3,63809524	19,8					

Fuente: Autor

Los incendios por su parte presentan una ponderación del 36% ya que en ocasiones se presentan estaciones petrolíferas muy cercanas a la población y de presentarse una afectación el nivel de exposición de la población será muy alto, tal como lo menciona Tejada y Afanador en el año 2003. Las explosiones con un 17% junto con los daños estructurales con un 8% ocasionan afectaciones leves, ya que estos parámetros no afectarían de forma considerable el desarrollo de la población, esto como consecuencia que son impactos de tipo puntual mas no global, dado que la producción de las actividades socioeconómicas no se ve influenciada negativamente.

Gráfica 6: Consecuencias Derrame de Hidrocarburos – Población



Fuente: Autor

Para el ítem de población se evaluó la población rural frente a la población urbana (Tabla 22), donde los expertos consideran que la población con mayor afectación

debido al derrame de un poliducto u oleoducto la población rural con un valor de 81%, esto debido a las pérdidas económicas por contaminación de cobertura vegetal o cuerpos de agua, debido a que las actividades socioeconómicas dependen principalmente de estos componentes ambientales, frente a un 19% de la población urbana, los cuales aunque también pueden tener afectaciones tienen otras alternativas de desarrollo.

Tabla 22: Matriz de Comparación de Pares- Tipos de Población

MATRIZ DE COMPARACION DE PARES – POBLACION					
	Rural	Urbana	Matriz Normalizada		Vector Promedio
RURAL	1	4 1/2	0,79847909	9/11	0,80833045
URBANA	1/4	1	0,20152091	0,18181818	0,19166955
SUMA	1 1/4	5,5			

Fuente: Autor

Después de analizados los datos de la población se tiene que $CI = 0,0665202$. Luego se aplica el índice aleatorio (IA), donde se tiene un valor estándar de 0,99 cuando se evalúan 2 criterios. Para finalizar se determina la relación de consistencia $CR = 0,0671921$ Lo cual indica que los juicios no se encuentran sesgados y existe consistencia en el factor de ponderación.

De acuerdo a los valores obtenidos en el vector propio para la matriz del componente físico se establece el siguiente ponderador (Tabla 23):

Tabla 23. Relación de consistencia Consecuencias Derrames De Hidrocarburo Vs Vías

AxP		
1,6708434	$CI = (n_{max} - n) / (n - 1)$	0,0665202
0,3956768	$RI = 1,98 * (n - 2) / n$	0,99
2,665202	$CR = CI / RI$	0,0671921

Fuente: Autor

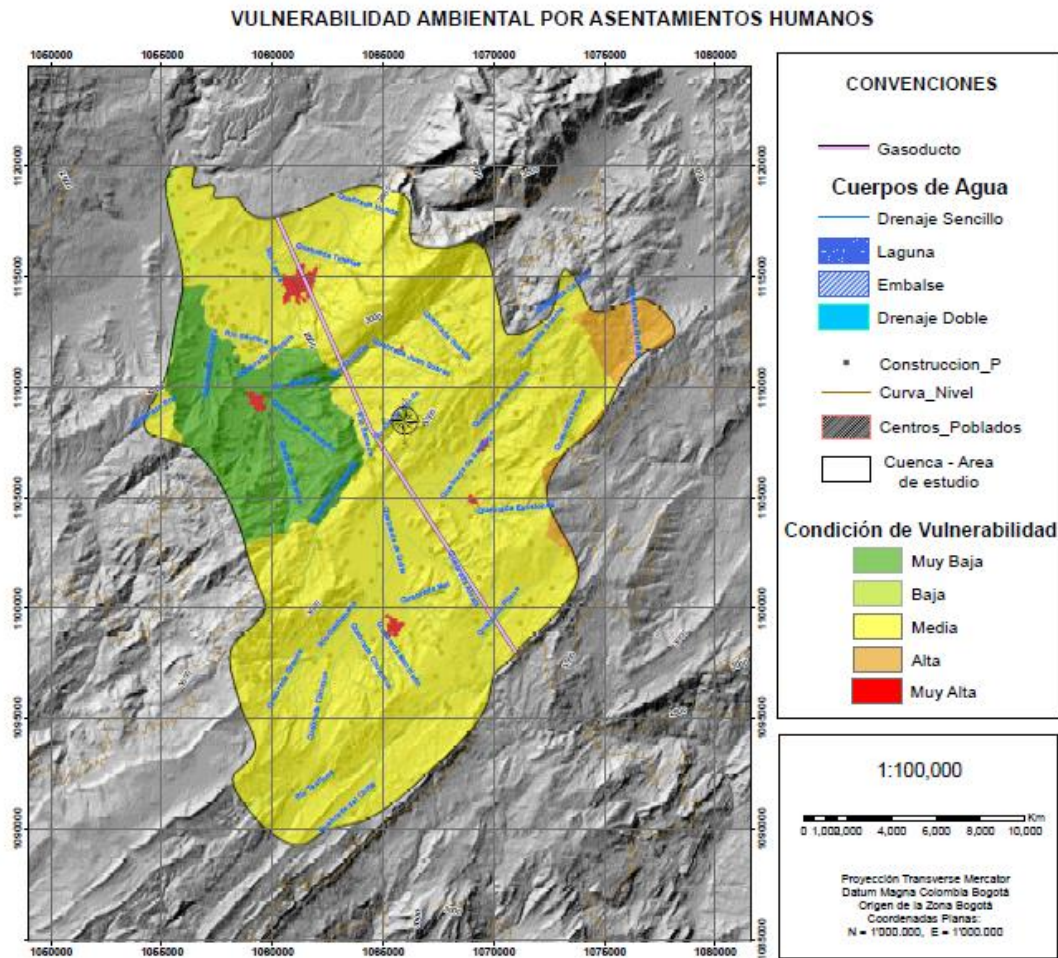
Para el componente sociocultural (población) se determinó que estas áreas tienen un grado de vulnerabilidad alta (Figura 20), debido a que el componente humano

tiene igual importancia independientemente del número de habitantes del área afectada (densidad poblacional)¹³⁹, aunque la proximidad del poliducto aumenta el grado de sensibilidad, ya que la exposición puede generar consecuencias que pueden deteriorar a una población. Por lo tanto, el paso del ducto en la zona provoca vulnerabilidad en todas las partes de influencia, principalmente genera una vulnerabilidad muy alta en los cascos urbanos de los municipios próximos a la tubería como lo es Villa de Leyva, Sáchica, Sora, Cucaita, y Chíquiza, esto debido que frente a un derrame afecta una los elementos ambientales, de los cuales se abastece una población, generando en ella migración, y en casos críticos si la afectación es directa e inmediata puede provocar pérdidas humanas¹⁴⁰.

¹³⁹<https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/571/4/3.%20LA%20IMPORTANCIA%20DE%20SER%20HUMANO%2C%20JORGE%20V.%20ARREGUI.pdf>. Consultada el 29 de octubre de 2019

¹⁴⁰<https://www.agenciasinc.es/Noticias/Como-afectan-los-vertidos-petroleros-a-la-salud-de-la-poblacion-residente> Consultada el 29 de octubre de 2019

Figura 20. Zonificación Vulnerabilidad Población



Fuente: Autor

En términos de zonificación ambiental las áreas en estudio presentan una vulnerabilidad ambiental categorizada de muy baja a muy alta, dada por las características fisiográficas de la zona.

CONCLUSIONES

La vulnerabilidad es analizada en el presente estudio, teniendo en cuenta el contexto de la industria de explotación de hidrocarburos, principalmente ante un posible derrame proveniente de un oleoducto o un poliducto. La vulnerabilidad ha sido usada como una herramienta que reduce la incertidumbre de los valores ponderados en el proceso de análisis jerárquico, ya que a través de la descripción de los componentes ambientales (Coberturas vegetales, vías, población, cuerpo de agua) utilizados en esta propuesta, nos da una aproximación de la vulnerabilidad ambiental, ya que la inclusión de valores matemáticos y la descripción cualitativa, convierte el método en una propuesta objetiva.

La aplicación de esta metodología, permite cuantificar la vulnerabilidad de los componentes ambientales que se encuentran dentro del área de influencia, en donde cada uno de los expertos, genera un juicio de valor que desde la experiencia en campo, determina la jerarquía frente al grado de sensibilidad que tiene el medio ambiente ante las consecuencias de un derrame de hidrocarburos, lo cual nos permite determinar las zonas más afectadas, y de esta manera poder proponer mecanismos para reducir los impactos generados en el medio ambiente.

Esta propuesta metodológica, permite levantar un modelo de zonificación ambiental, que puede ser utilizada como una herramienta de gestión, para analizar las condiciones del territorio, frente a la explotación de hidrocarburos en Colombia, donde los resultados obtenidos parten de las variables evaluadas de las condiciones en campo, generando la posibilidad de ajustar los valores frente a las características de las zonas de interés, ya que es una metodología que está diseñada para ser aplicada en cualquier parte del territorio, y su confiabilidad dependerá de la calidad de los datos de entrada, ya que estos deben tener un índice de consistencia menor al 10%.

Teniendo en cuenta el decreto 321 de 1999 el cual adopta un plan nacional de contingencia contra el derrame de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas, el Cenit plantea un plan de emergencia para el poliducto andino el cual pasa por Boyacá y para el caso en estudio la provincia central o plancha 191 según el IGAC, para lo cual esta propuesta metodológica puede aportar datos específicos de cada uno de los componentes involucrados, y ser un complemento para este plan ya que puede aportar una descripción detallada basada en la experiencia de cada uno de los expertos.

Teniendo en cuenta la ponderación realizada para el área de estudio también se determinó que la vulnerabilidad del medio ambiente está relacionada directamente con el estado de los factores que hacen parte de él, donde a través del proceso de análisis multicriterio (PAJ), se estableció, que los factores ambientales que presentan el mayor índice de vulnerabilidad ante un derrame de hidrocarburos, son los cuerpos de agua y las coberturas vegetales, ya que las superficies deslizantes, generan un desequilibrio ambiental, debido a las sinergias que se presentan en el ecosistema.

Determinando la vulnerabilidad ambiental general por cada uno de los factores, ante un eventual derrame de un oleoducto o poliducto, se evidencio que las fuentes hídricas de los municipios de Samacá y Ventaquemada, presentaron un grado de vulnerabilidad alta, debido a que la escorrentía de la cuenca hidrográfica que hace parte de este estudio, está influenciada por una pendiente que en caso de un accidente en el ducto dirigirá el agente contaminante directamente al rio Teatinos, siendo este el más alterado, llevando consigo la contaminación de los elementos asociados a este cuerpo de agua.

La influencia del Ducto Andino en la zona geográfica descrita por el IGAC como plancha 191, genera una relación de contacto, lo que nos permitió evidenciar con el desarrollo de esta propuesta metodológica, que en cada punto por donde pasa este poliducto genera un grado de vulnerabilidad frente a los factores evaluados, convirtiéndose en una amenaza latente, ya que frente a un eventual derrame, ocasionaría impactos críticos en cada uno de los elementos ambientales que hacen parte de la zona de estudio.

Una vez determinada la vulnerabilidad en las vías, se evidencias que sin tener en cuenta el tipo de vía (primaria, secundaria, terciaria), frente a un posible derrame del poliducto Andino, estas estructuras serán muy vulnerables, ya que se vería afectada, en una gran parte debido a la comunicación que hay entre ellas, ya que la red vial de esta zona, presenta varios sitios de relación con el ducto, y frente a un daño en la tubería la comunicación de la zona se vería restringida afectando la dinámica de transporte que hace parte de las actividades socioeconómicas de la región.

Por otra parte, el uso de sistemas de información geográfica (SIG), nos permitió analizar los datos del área de estudio, los cuales nos aproximan a tener un referente

de cuales pueden llegar a ser las áreas más vulnerables de forma gráfica, brindándonos una herramienta de análisis y de toma de decisiones frente al manejo de los recursos naturales y a la planificación del territorio en la ejecución de una actividad socioeconómica.

El modelo generado para determinar la vulnerabilidad ambiental de la zona plancha 191 del departamento de Boyacá, frente a un posible derrame del poliducto Andino, se presenta, en un mapa de procesos, que mediante la adición de unos insumos de entrada, podemos obtener los mapas de vulnerabilidad, pero la metodología no solo se limita al procesamiento por parte de las herramientas, que nos brinda el programa (Arcgis versión 10.3), ya que requerimos de la parte humana para interpretar la información espacial, y mediante la modificación de atributos de los datos de entrada, podemos obtener los resultados planteados que para este caso es el de determinar la vulnerabilidad ambiental ante un derrame de un oleoducto o poliducto.

RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de esta metodología en trabajos relacionados, se recomienda realizar una comparación de variables, donde se estimen y se discriminen criterios (componentes ambientales) según sea el caso, ya que las variables bióticas, abióticas y socioeconómicas son diversas a lo largo del ecosistema y el comportamiento de los factores ambientales frente a la intervención difieren frente a la generación de impactos

Por otra parte, se recomienda estimar datos, como la dirección de las corrientes hídricas, para determinar cuáles pueden llegar a ser los componentes ambientales impactados a lo largo del curso del agua, esto debido a que el movimiento de las aguas puede propagar los hidrocarburos a lo largo de la cuenca generando sinergias e impactos a lo largo del tiempo.

En el desarrollo de la metodología, se recomienda analizar los datos especiales, en donde se establezcan datos mínimos, antes de desarrollar el proceso de análisis jerárquico, ya que para realizar la categorización la información utilizada debe contener las mismas características de ponderación para asegurar la consistencia de los datos

BIBLIOGRAFÍA

Adger WN. Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam. *World Dev* 1999;27:249–69.

Adger WN. Vulnerability. *Glob Environ Chang* 2006;16:268–81.

Almeida, A. Fases e impactos de la actividad petrolera. En: *Manuales de Monitoreo Ambiental Comunitario. Acción Ecológica. Quito.3.* Jackson A et al. 2011. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER – Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *J Animal Ecol.* 2006. 80:595–602

Ananthanarayanan K and Varghese K , Vectorization of Contours From Scanned Topographical Map, *GIS Development. Asia Pacific Edition. Vol. 10, 2006.*

Anderson, David R., D. J. Sweeney y T. A. Williams, *An Introduction to Management Science: Quantitative Approaches to Decision Making*, West Publishing Company, Minneapolis, 1994, pp. 390-392. Citado por Vidal Carlos Julio en *Material de clase Sistemas de Transporte y Redes de Abastecimiento. Módulo Selección del modo de transporte y transportista. Universidad del Valle. 2004.*

Andrade, G. I., Franco, L., & Delgado, J. Socio-ecological barriers to adaptive management of Lake Fúquene, Colombia. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics.* 2012. 7(3) 251-260.

Andrade-C., M. G. Estado del conocimiento de la biodiversidad en Colombia y sus amenazas. Consideraciones para fortalecer la interacción ambiente-política. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2011a. 35 (137): 491-507, ISSN 0370-3908.

ANH. Indicadores de gestión y estadísticas de la industria a febrero 28 de 2011.

Arévalo, P. 2006. Plan de emergencias para derrames de hidrocarburos Provenientes de las estaciones de servicio en las redes de Alcantarillado de la zona 2 del acueducto de Bogotá. Universidad de la Salle Facultad de ingeniería ambiental y sanitaria. BOGOTÁ D.C. 2006.

Asma M. A. Bahurmoz. The Analytic Hierarchy Process at Dar Al-Hekma, Saudi Arabia. *Interfaces*, Vol. 33, No. 4, July–August 2003, pp. 70–78.

ASME B31.4, "Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids. 2002.

Atlas, R.M. y Bartha, R.. *Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental*. Pearson Educación, S.A. Madrid. 2002.

Bascetin A. An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine. Technical note. *Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. Vol 113, No 3. Septiembre 2004 pp. 192 – 199.

Becker H. Social impact assessment. *Eur J Oper Res* 2001;128:311–21.

Belacel, N. Multicriteria assignment method PROAFTN: Methodology and medical application. *European Journal of Operational Research*. 2000. 125(1), 175–183.

Benavides, L., Quintero, G., Guevara, A.L., Jaimes, A., Gutiérrez, S.M. & García, J. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *NOVA Publicación científica*. 2006. Vol.4 No. 5.

Berry PR, Rounsevell, Harrison P, Audsley E. Assessing the vulnerability of agricultural land use and species to climate change and the role of policy in facilitating adaptation. *Env Sci Policy* 2006;9:189–204.

Bryson N. and Mobolurin A. An approach to using The analytic Hierarchy for solving multiple criteria decision making problems. *European Journal of Operational Research*. 1994.

Burdge R, Fricke P, Finsterbusch K, Freudenburg W, Gramling R, Holden A, Llewellyn L, Petterson J, Thomson J, Williams G. Guidelines and principles for social impact assessment. *Environ Impact Assess Rev* 1995;15:11–43.

Cardozo, R. y Quintero, Q. 2000. Zonificación agrícola como herramienta básica para el ordenamiento ambiental de un territorio (caso: Toluviejo-Sucre). Universidad Nacional de Colombia.

Cardozo, R. y Quintero, Q. Zonificación agrícola como herramienta básica para el ordenamiento ambiental de un territorio (caso: Toluviejo-Sucre). Universidad Nacional de Colombia. 2000.

Cenit. Planes de emergencia sistemas de transporte de hidrocarburos departamento O&M. Poliducto Miraflores. 2018.

Cenit. 2018. Planes de emergencia sistemas de transporte de hidrocarburos Departamento O&M Casanare. 2018.

CEV. Lineamientos para la elaboración de EIA Corredor 5, Transversales Cusiana-Carare-Boyacá. Tramo Tunja-Sogamoso. Capítulo 3. 2015.

COLOMBIA. IDEAM, IGAG y CORMAGDALENA. 2008. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena –Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena. Bogotá, D.C., 200p. + 164 hojas cartográficas.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto 2245. “Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas. Bogotá D.C. Diciembre. 2017.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Ley 1228. Por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión, para las carreteras del sistema vial nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras y se dictan otras disposiciones. Art 1. 2008.

Conceptodefinicion.de, Redacción. (Última edición:25 de julio del 2019). Definición de Hidrocarburos. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/hidrocarburos/>. Consultado el 22 de septiembre del 2019.

Conceptodefinicion.de, Redacción. (Última edición:30 de julio del 2019). Definición de Páramo. Recuperado de: <https://conceptodefinicion.de/paramo/>. Consultado el 21 de septiembre del 2019.

CORTOLIMA. Proyecto piloto ajuste parcial a la zonificación ambiental Al plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica Del río Coello. 2018.

Cuatrecasas, J.. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Pérez-Arbelaezia, 2, 147-283. 1989.

Cutter S, Boruff B, Shirley W. Social vulnerability to environmental hazards. Soc Sci Quart 2003;84:242–61.

Cutter, S, “Vulnerability to environmental hazards”, Progress in Human Geography, 1996. vol. 20, no. 4, pp. 529-539.

De Conceptos.com Copyright © 2019. Privacidad

De Freitas, D. M. y P. R. A. Tagliani. The use of GIS for the integration of traditional and scientific knowledge in supporting artisanal fisheries management in southern Brazil. J. Environ. Manag. 2009. 90 (6): 2071-2080.

Departamento de Información Pública de las Naciones Unidas 32950—DPI/2378—Septiembre 2005—5M.

Di Toro, D.M. McGrath, J.A., Stubblefield, W.A. Predicting the Toxicity of Neat and Weathered Crude Oil: Toxic Potencial and the Toxicity of Saturated Mixtures. Environmenatl Toxicology and Chemistry. 2007. 26(1): 24 36.

Díaz-Martínez, E., Alarcón, A., Ferrera- Cerrato, R., Almaraz-Suarez, J. J. & García-Barradas, O. Crecimiento de Casuarina equisetifolia (Casuarinaceae) en suelo con diesel, y aplicación de bioestimulación y bioaumentación. Biol. Trop. 2013. Vol. 61 (3): 1039-1052.

División político administrativa. Conceptos básicos. DANE. Consultado el 26 de enero de 2011.

Douven, W. J. A. M., J. J. G. Buurman y W. Kiswara. Spatial information for coastal zone management: the example of the Banten Bay seagrass ecosystem, Indonesia. Ocean Coast. Manag. 2003. 46 (6-7): 615-634.

Downing T, Butterfield R, Cohen S, Huq S, Moss R, Rahman A. Climate change vulnerability: linking impacts and adaptation. Oxford: University of Oxford; 2001.

El Tributo. Explotó una cañería del gasoducto Norandino en el departamento Orán. Editorial. 2001.

Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Soracá. Acuerdo No 016 / 2003

Esquema de Ordenamiento Territorial. Municipio de Combita. Acuerdo No 018 / 2001.

Esquema de Ordenamiento Territorial. Municipio de Motavita. Acuerdo No 022 / 2000.

ESRI. What is GIS. [En línea]. [Citado, 01 de febrero de 2017]. Disponible en internet: <https://www.gis.com/whatisgis/index.html>.

Etter, A., C. McAlpine & H. Possingham. Historical Patterns and Drivers of Landscape Change in Colombia Since 1500: A Regionalized Spatial Approach. *Annals of the Association of American Geographers*. 2008.98(1): 2-23.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Evaluación ambiental comparativa de dos sitios considerados para la ubicación del nuevo aeropuerto internacional de la ciudad de México. Julio 2001.

Felicísimo, A. Ramirez, M. Posada, E. FORCLIM, Bosques y Cambio Global. Red Tematica CYTED 408RT0338. Volumen 2. Colombia-Ecuador. 2011

Fraume, N. Diccionario Ambiental. Ecoe Ediciones. ISBN 978-958-648-462-9. CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango. 2006

Forst, M. The convergence of integrated coastal zone management and the ecosystems approach. *Ocean Coast. Manag.* 2009.52: 294-306.

Franco, L., Useche, D. C., y Hernández, S. Biodiversidad y el cambio antrópico del clima: ejes temáticos que orientan la generación de conocimiento para la gestión frente al fenómeno. *Ambiente y Desarrollo*. 2013. 17(32), 79-96.

Frei F. Harker P. Measuring aggregate process performance using AHP. Working Paper. The Wharton School. University of Pennsylvania .1998.

Fulcrum Ingeniería Ltda. Proyectos y Asesorías con el Analitiy Hierarchy Process (AHP). Chile. 2000.

Füssel H. Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. Glob Environ Chang 2007;17:155–67.

Gallopin G. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. Global Environ Chang 2006;16:293–303.

Garmendia, A. Salvador, A. Crespo, C. Salvador, L. Evaluación de Impacto Ambiental. 1ª Edición. Prentice Hall: Pearson Education. ISBN: 84-205-4398-5. 2005.

GUÍA PARA LA PREVENCIÓN DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS CORPONARIÑO – Cultura para la Prevención de Desastres.2005.

Hernández, Alexander Ed. Ciencias sociales, geografía. Nuevos territorios 6. Bogotá: Vincens Vives. 2005.

Holdridge, L.R. Determination of World Plant Formation from Simple Climate Data. Science. 1947.105, 367-368.

<https://www.agenciasinc.es/Noticias/Como-afectan-los-vertidos-petroleros-a-la-salud-de-la-poblacion-residente> Consultada el 29 de octubre de 2019

<https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/571/4/3.%20LA%20IMPORTANCIA%20DE%20SER%20HUMANO%2C%20JORGE%20V.%20ARREGUI.pdf>. Consultada el 29 de octubre de 2019

<https://ecosistemas.ovacen.com/bioma/paramo/> consultada el 27 de octubre de 2019

<http://www.oilwatchesudamerica.org/petroleo-en-sudamerica/colombia/4566-colombia-metase-el-petroleo-por-el-tubo-.html> consultada el 27 de octubre de 2019

<https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/> consultada el 27 de octubre de 2019

<https://blog.laminasyaceros.com/blog/c%C3%B3mo-detectar-da%C3%B1os-estructurales-en-una-edificaci%C3%B3n> consultada el 27 de octubre de 2019

<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-274005> consultada el 27 de octubre de 2019

Hubach. Informe del S.G.N 1212 pág. 49. 1957.

IDEAM. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p. 2010.

IGAC. Estudio de Clasificación de Suelos del Tolima. 1993.

INGEOMINAS & UNAL. Mapa Nacional de Amenaza Sísmica, periodo de retorno 475 años. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá. 2010.

INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Norma 3.1-I.C. Trazado. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras.2000.

IPIECA. Biological Impacts of oil pollution: rocky shores. IPIECA Reporte Series 7. London. 2000.

IPIECA-IOGP. Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la ecología marina. Directrices de buenas prácticas para el personal de manejo de impactos y respuesta a emergencias. Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas. Informe de IOGP N.º 525. 2015.

ITOPF. Efectos de la contaminación por hidrocarburos en el medio marino. Documento de información técnica. Olivers Yard, 55 City Road, London. 2011.

Jarvis A, Yeaman S, Guarino L and Tohme J. The role of geographic analysis in locating and using plant genetic diversity. Methods in enzymology. 2005. Vol. 395, pp. 279-298.

Jenks GF. The Data Model Concept in Statistical Mapping. International Yearbook of Cartography. 1967. Vol. 7, pp. 186-190.

Jiménez, D. L. (2006). Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre una zona estearina, aledaña al terminal de Ecopetrol en Tumaco. (tesis de pregrado). Ingeniería Ambiental Sanitaria. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.

Julián Pérez Porto y María Merino. Publicado: 2010. Actualizado: 2014.

Julián Pérez Porto y María Merino. Publicado: 2010. Actualizado: 2014.

Kelly P, Adger WN. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. Clim Chang 2000;47:325–52.

Kimerling, J. Crudo Amazónico. Ed. Abya Yala. Quito. 1993.

Kitsiou, D., H. Coccossis y M. Karydis. Multi-dimensional evaluation and ranking of coastal areas using GIS and multiple criteria choice methods. Sci. Total Environ. 2002. 284 (1-3): 1-17.

Korte G. The GIS Book (5th Ed. Rev.) Autodesk Press. 2001.

Ley general de asentamientos humanos. MEXICO 2014.

LINARES, PINZÓN & CORTÉS. Estudios en Líquenes y Briófitos en Enclaves Subxerofíticos de la Sabana de Bogotá. 2007.

Lopez, L. Molina, A. Villegas, G. Los sistemas de información geográfica (sig) en la planificación municipal. Revista EIA Escuela Ingeniería Antioquia no.4 Envigado July/Dec. 2005.

Lopez, L. Molina, A. Villegas, G. Los sistemas de información geográfica (sig) en la planificación municipal. Revista EIA Escuela Ingeniería Antioquia no.4 Envigado July/Dec. 2005.

Luers A, Lobella D, Sklard L, Addamsa L, Matsona P. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. Glob Environ Chang 2003;13:255–67.

M. Nunes de Lima, Image 2000 and CLC2000 Products and methods, Toscana: Joint Research Centre, 2005.

MacEachren A. Visualization in Geographical Information Systems. pp. 115-130. John Wiley. 1994.

MALCZEWSKI, Jacek. GIS-Based Multicriteria Decision Analysis: A Survey Of The Literature. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 20, N° 7. Agosto 2006, pág. 703 – 726.

Martínez Llario JC and Coll Aliaga E, "Análisis vectorial en PostGIS y Oracle Spatial: estado actual y evolución de la especificación Simple Features for SQL", In Jornadas Técnicas para la Infraestructura de Datos Espaciales de España. 2005.

Martínez ME. Las Infraestructuras de Datos Espaciales. Experiencias en su implantación. Boletín. Vol. Septiembre-Octubre 2001., pp. 38-50.

Martínez, A. Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. Fedesarrollo. 2012.

MEDINA, A. M., MONTAÑA, T. R., ROZO, L. F & RIVEROS, M. T. 2011. Cuenca Río Chicamocha. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Duitama
Mendelssohn, I. A., Andersen, G.L., Baltz, D., Caffey, R., Carman, K., Fleeger, J, Joye, S. B., Lin, Q., Maltby, E., Overton, E. B. & Rozas, L. Oil Impacts on Coastal Wetlands: Implications for the Mississippi River Delta Ecosystem after the Deepwater Horizon Oil Spill. 2012. 62, 562-574.

MetzgerM, RounsevellM, Acosta-Michlik L, Leemans R, Schröter D. The vulnerability of ecosystem services to land use change. Agric Ecosyst Environ 2006;114: 69–85.

Moreno, José M. El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. Universidad de Zaragoza. 2000.

NOAA / API / USCG / EPA, 2001. Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments. Dept Comercio de los EEUU, NOAA, American Petroleum Institute, US Coast Guard, US Environ. Protection Agency, 77pp.

NOAA. ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills). NOAA's oil weathering model—an oil spill response tool that models how different types of oil weather (undergo physical and chemical changes) in the marine environment. Website of the NOAA Office of Response and Restoration, US Department of Commerce. 2015.

Olguín E, EM Hernández, G Sánchez. Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 2007 23(3), 139-154.

Ortiz-Lozano, L., A. Granados-Barba y I. Espejel. Ecosystemic zonification as a management tool for marine protected areas in the coastal zone: applications for the system arrecifal Veracruzano National Park, Mexico. *Ocean Coast. Manag.* 2009. 52: 317-323.

Ortiz-Lozano, L., A. Granados-Barba y I. Espejel. Ecosystemic zonification as a management tool for marine protected areas in the coastal zone: applications for the system arrecifal Veracruzano National Park, Mexico. *Ocean Coast. Manag.* 2009. 52: 317-323.

Patin, S. Factors of the offshore oil and gas industry's impact on the marine environment and fishing. En. *Environmental Impact of the Offshore Oil and Gas Industry.* EcoMonitor Publishing. NY. 1999.

Plan de Ordenamiento Territorial. Municipio de Tunja. Acuerdo No 0014 / 2001.

Parrot, F., Sommer, I., Oropeza, O., Ortiz Pérez, M. A., Sánchez Salazar, T., Casado Izquierdo, J. M., . . . Quintero Pérez, J. A. Modelación del comportamiento ambiental de derrames de hidrocarburos en sitios. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. (2009).

Portman, M. Zoning design for cross-border marine protected areas: The Red Sea Marine Peace Park case study. *Ocean Coast. Manag.* 2007. 50: 499-522.

Rahman, A. Heading for a repeat of the Magurghara disaster. Gas fires and living forests just don't mix. 2004. The Daily Star. <http://www.thedailystar.net/2004/12/27/d41227020422.htm>

Rahman, A. Heading for a repeat of the Magurchhara disaster. Gas fires and living forests just don't mix. The Daily Star. 2004. <http://www.thedailystar.net/2004/12/27/d41227020422.htm>

Ramírez, o. Zonificación Geotécnica de Tunja. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1990.

Renzoni, G. Geología del cuadrángulo J-12 Tunja. Informe No. 1546. Bogotá. 1967. Rincón-Romero, M. Jarvis, A. y Mulligan, M. Cobertura vegetal en Colombia. Renata. 2012. 6 (4), 12-26.

Rodríguez, A., Lozano, Pilar, Sierra, Paula. 2012. Criterios de zonificación ambiental usando técnicas participativas y de información: estudio de caso zona costera del departamento del atlántico. Bol. Invest. Mar. Cost. 41 (1) ISSN 0122-9761 Santa Marta, Colombia.

Ruiz Correa, J. "Crímenes ecológicos de EXXON siguen impunes por retardo del sistema judicial de EEUU que pretende quebrar a PDVSA", "Revista del Sur", 2004. Edición marzo-abril, N°149.

SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. Int J. Services Sciences. Vol 1 No .1, University of Pittsburgh, USA 2008.

Saaty, Thomas. How to make a decision: the analytic hierarchy process. University of Pittsburgh. 1994 12.

Salvador, Luis. Pretince Hall: Pearson Education. ISBN: 84-205-4398-5.

Salzwedel, H., N. Zapata, M. Eilbrecht y M. Arzola. Zoning the coast-methodological guidelines for the municipal level: the experience of the Region of Bio Bio. Chilean-German Technical Cooperation Project Spatial Planning of the Coastal Zone of the Region of Bio Bio. Concepción, Chile. 2003. 61 p.

Shalaby, A. y R. Tateishi. Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. Ap. Geogr. 2007. 27 (1): 28-41.

Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Env Chang* 2006;16:282–92.

Smith B, Pilifosova O. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Clim Chang* 2002;45:223–51.

Smith E, McKinnis P, Tran L, O'Neill R. The effects of uncertainty on estimating the relative environmental quality of watersheds across a region. *Landscape Ecol* 2008a;21:225–31.

Smith W, Zollner P. Sustainable management of wildlife habitat and risk of extinction. *Biol Conserv* 2005;125:287–95.

Smith, Q.R., Mesa, S.O., Dyner, R.I., Jaramillo, A.P., Poveda, J. G. y Valencia, R.D. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbres. Medellín, Colombia: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 2000.

Steede-Terry K. Integrating GIS and the Global Positioning System. ESRI Press. 2000.

Subramaniam,V. Lee K. Dynamic selection of dispatching rules for job shop scheduling. *Production Planning and control*. 2000. Vol 11, No 1, pp. 73-81.

Taboada Barreto, Luis COBERTURA VEGETAL. PRACTICAS AGRO-CULTURALES DE CONSERVACION DESUELOS Boletín N° 04. 2011.

Tejada, E. y Afanador, F. Evaluación del riesgo debido a derrame de hidrocarburos en la bahía de Tumaco. División de Zona Costera, Centro Control Contaminación del Pacífico –CCCP Vía El Morro, Capitanía de Puerto, San Andrés de Tumaco, Nariño, Colombia. 2003.

Toledo, A. El agua en México y el Mundo. *Gaceta Ecológica-Instituto*. 2002.

Tomlin, C. Geographic information systems and cartographic modelling. Prentice Hall. 1990.

Tomlinson,R., 2003. Thinking about GIS. *Geographical Information System Planning for Managers*, ESRI Press, 283 pp. WADSWORTH99:

Toro J. Constructive analysis of the process of Environmental Impact Assessment in Colombia. Proposals for improvement (in Spanish). PhD Dissertation. Granada (Spain): University of Granada, 2009.

Tran L, O'Neill R, Smith E. Spatial pattern of environmental vulnerability assessment in the Mid-Atlantic Region, USA. *Appl Geogr* 2010;30:191–202.

TRIANANTAPHYLLOU, E. Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. Kluwer Academic Publishers. Louisiana State University. Louisiana, U. S. A. 2000.

Turner II B, Matson P, McCarthy J, Corell R, Christensen L, Eckley N, Hovelsrud-Broda G, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc Natl Acad Sci* 2003;100:8074-9.

Turner II B. Vulnerability and resilience: coalescing or paralleling approaches for sustainability science? *Glob Environ Chang* 2010;20:570–6.

V. Perdigão, and A. Annoni, Technical and methodological guide for updating CORINE Land Cover database., Luxembourg: Joint Research Centre (JRC) and European Environment Agency (EEA), 1997.

Varghesea, K., L. S. Ganeshb, M. Manic, P. P. Anilkumar, R. Murthy y B. R. Subramaniam. Identifying critical variables for coastal profiling in ICZM planning - A systems approach. *Ocean Coast. Manag.* 2008. 51: 73-94.

Wei Y, Fan Y, Lu C, Tsai H. The assessment of vulnerability to natural disasters in China by using the DEA method. *Enviro Impact Assess Rev* 2004;24:427–39.

Wernersson, A.S. Aquatic ecotoxicity due to oil pollution in the Ecuadorian Amazon. *Aquatic Ecosystem Health & Management.* 7(1): 127136. 2004.

Williams-Linera, G. El bosque de niebla del centro de Veracruz: Ecología, Historia y destinos en tiempos de fragmentación y cambio climático. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad y el Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, México. 2007

www.ecologiaverde.com/matorrales-que-son-tipos-y-fauna-2103.html