

# Metodología para estimar el riesgo en los sistemas de abastecimiento de agua potable en Colombia

por

**Dirceu Enrique Vargas Pedroza**

Trabajo de grado presentado  
como requisito para optar al título de  
Magister en Hidrosistemas



Pontificia Universidad Javeriana

Maestría en Hidrosistemas

Bogotá D.C., Colombia

21 de enero de 2015

**REGLAMENTO DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.**

Artículo 23. "La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y por que las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia".

Resolución No. 13 de julio de 1946.

*Aprobado por*

**Dr Ing. Alfonso Mariano Ramos**

Director

Subdirector Instituto Geofísico  
Profesor, Departamento de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia  
E-mail: [a-ramos@javeriana.edu.co](mailto:a-ramos@javeriana.edu.co)  
Teléfono: 320 8320 Ext. 6545

**Jurados**

**Dr. Gerardo Galvis**

Coordinador de programa  
Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental  
Organización Panamericana de la Salud  
Oficina de Nicaragua (OPS)  
E-mail: [galvisg@nic.ops-oms.org](mailto:galvisg@nic.ops-oms.org)  
Teléfono: +505-2 289-4200

**PhD. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda**

Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería  
Departamento de ingeniería civil  
Facultad de Ingeniería  
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia  
E:mail: [crodriguezpjaveriana.edu.co](mailto:crodriguezpjaveriana.edu.co)  
Teléfono: 3208320

**Anibal Pérez Garcia**

Profesor Asistente

Director del Grupo GRESIA - Head of Research Group Ecology, Water Resources and  
Environmental Engineering  
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil  
Universidad Antonio Narino  
Móvil: +57-3015679613

Aprobada en Bogotá, el día 19 de enero de 2015

## **Agradecimientos**

El primer agradecimiento es para mí Director de tesis, el Ing. Alfonso Mariano Ramos, quien con su compromiso, orientación, dedicación y apoyo, trabajó intensamente para tener un resultado como esta investigación. Muchas Gracias Alfonso.

El segundo agradecimiento es para el Ing. Nelson Obregón Neira, por haber motivado en mí el interés de continuar con mis estudios de maestría. Así como en las sugerencias y consejos para adelantar esta obra investigativa.

Agradezco al Ing. Luis Alberto Jaramillo, por los diferentes aportes y sugerencias durante el desarrollo de esta, pero más allá sobre el conocimiento que generó durante mi vida académica.

De manera especial al P. Wilson Mejía Naranjo por ofrecer un espacio físico para llevar a cabo esta investigación, además por brindarme siempre un consejo adecuado en los momentos indicados. Un abrazo.

Un agradecimiento profundo a mis padres, mis modelos de superación.

Por último y no menos importante a mi Esposa. A ti Angélica Olivia dedico mi investigación. Gracias por tu incondicionalidad, comprensión y compañerismo. Gracias por estar en el justo momento. Por la genuina muestra de amor. TE AMO.

*“Dios contigo está la Sabiduría, que conoce tus obras y que estaba presente cuando tú hacías el mundo; ella sabe lo que es agradable a tus ojos y lo que es conforme a tus mandamientos. Envíala desde los santos cielos, mándala desde tu trono glorioso, para que ella trabaje a mi lado y yo conozca lo que es de tu agrado: así ella, que lo sabe y lo comprende todo, me guiará atinadamente en mis empresas y me protegerá con su gloria.”* Sabiduría 9:9-11

**Dirceu Enrique**

## **Prefacio**

La elaboración de esta tesis de maestría ha sido llevada a cabo con el propósito de dar un aporte a la comunidad científica relacionada con la investigación en la gestión de riesgos, así como brindar de amplios conocimientos a las diferentes instituciones oficiales y privadas que realizan la operación, vigilancia, control y asistencia técnica a los sistemas de abastecimiento de agua potable en Colombia.

Esta tesis surge de ver la necesidad de contribuir en el conocimiento de los factores que inciden de manera directa en la prestación del servicio de acueducto y que han conllevado a pensar si realmente el país se encuentra preparado para enfrentar situaciones de riesgos.

La investigación que se adelantó tuvo entre otras características, la de tener un panorama holístico a una escala nacional sobre el riesgo a los cuales se someten las empresas de servicios públicos. Por lo que su resultado tardó mucho más tiempo del planeado en un principio, ya que sobre esta investigación influyeron diferentes aspectos como la dificultad en la información para identificar la configuración de los diferentes componentes estructurales de los sistemas de acueductos, el acceso a las diferentes instituciones oficiales generadoras de la información de las amenazas, que posterior tuvo que homogenizarla para agruparla y categorizarla a una escala municipal.

Como conclusión la gestión del riesgo es un campo muy joven, en donde realizar un aporte resulta por enriquecer y potencializar el área de conocimiento en la materia. Más aún cuando estudios de amenazas, vulnerabilidad y riesgo se han realizado bastantes. Estudios de riesgos en SAAP se han realizado suficientes. Estudios de riesgos en SAAP empleando un modelo jerárquico AHP bajo una concepción holística, “hasta ahora el primero”.

Por lo que lejos más allá de generar egos, simplemente quiero dar un aporte.

*Dirceu Enrique*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Problema . . . . .	4
1.2. Objetivos . . . . .	7
1.3. Alcance . . . . .	8
1.4. Marco conceptual . . . . .	9
<b>2. Descripción de los sistemas de abastecimiento de agua potable -[SAAP] en Colombia</b>	<b>17</b>
2.1. Sistemas de abastecimiento de agua potable - SAAP . . . . .	17
2.2. Registro de la información relacionada con los sistemas de abastecimiento de agua potable -SAAP en Colombia . . . . .	20
2.2.1. Descripción de la información . . . . .	21
2.3. Análisis de la información . . . . .	45
2.3.1. Análisis de redundancia en los SAAP . . . . .	49
<b>3. Análisis multicriterio - Proceso analítico jerárquico (AHP)</b>	<b>52</b>
3.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP) . . . . .	53
3.2. Gestión del conocimiento - opinión o juicio estructurado de experto . . . . .	56
3.3. Matriz de comparaciones pareadas . . . . .	58
<b>4. Descripción de las Amenazas</b>	<b>60</b>
4.1. Amenaza por movimientos en masa . . . . .	61
4.1.1. Metodología del Servicio Geológico Colombiano para determinar la amenaza por movimientos en masa . . . . .	62
4.1.2. Zonificación de la amenaza . . . . .	69
4.2. Amenaza Sísmica . . . . .	74
4.2.1. Evaluación amenaza sísmica . . . . .	76
4.3. Amenaza por vulcanismo . . . . .	82
4.3.1. Amenaza Volcán Galeras . . . . .	82

4.4. Amenaza por Inundación . . . . .	85
4.4.1. Delimitación zonas inundables a escala 1:25.000 . . . . .	88
4.4.2. Delimitación zonas inundables a escala 1:5.000 . . . . .	92
<b>5. Tratamiento de las amenazas</b>	<b>93</b>
5.1. Geoprocesamiento . . . . .	93
5.2. Procesamiento de las amenazas . . . . .	95
5.2.1. Amenaza sísmica . . . . .	95
5.2.2. Amenaza movimiento en masa . . . . .	96
5.2.3. Amenaza por vulcanismo . . . . .	96
5.2.4. Amenaza por inundación . . . . .	97
5.3. Caminos de representación de la amenaza . . . . .	97
5.4. Determinación amenaza total . . . . .	100
5.5. Modelo AHP para la amenaza . . . . .	101
5.5.1. Combinación diferentes opiniones de expertos . . . . .	103
5.5.2. Modelo jerárquico para la amenaza . . . . .	103
5.5.3. Establecimiento de las prioridades - AHP . . . . .	106
5.5.4. Matriz principal amenaza . . . . .	107
5.6. Selección representación lineal o no lineal de los diferentes tipos de amenaza y producto con el peso del experto . . . . .	109
5.6.1. Amenaza sísmica . . . . .	109
5.6.2. Amenaza por movimiento en masa . . . . .	114
5.6.3. Amenaza por vulcanismo . . . . .	118
5.6.4. Amenaza por inundación . . . . .	123
5.7. Amenaza total . . . . .	127
5.7.1. Determinación de la amenaza total . . . . .	128
<b>6. Vulnerabilidad</b>	<b>135</b>
6.1. Vulnerabilidad natural . . . . .	140
6.2. Vulnerabilidad socio-cultural . . . . .	145
6.3. Vulnerabilidad económica-productiva . . . . .	151
6.4. Vulnerabilidad político-institucional . . . . .	154
6.5. Vulnerabilidad urbano-regional . . . . .	157
<b>7. Tratamiento de la vulnerabilidad</b>	<b>162</b>
7.1. Procesamiento de la vulnerabilidad . . . . .	162
7.1.1. Estandarización . . . . .	162
7.2. Caminos de representación de la vulnerabilidad . . . . .	163
7.3. Determinación vulnerabilidad total . . . . .	166

7.4.	Modelo AHP para la vulnerabilidad . . . . .	166
7.4.1.	Combinación diferentes opiniones de expertos . . . . .	168
7.4.2.	Modelo jerárquico para la vulnerabilidad . . . . .	169
7.4.3.	Jerarquía anidada en relación con el tipo de vulnerabilidad . . . . .	173
7.4.4.	Matriz principal vulnerabilidad . . . . .	189
7.4.5.	Matriz secundaria vulnerabilidad - Variables de primer nivel . . . . .	190
7.5.	Selección escenarios de representación de los diferentes tipos de vulnerabilidad	193
7.5.1.	Vulnerabilidad natural . . . . .	194
7.5.2.	Vulnerabilidad socio-cultural . . . . .	195
7.5.3.	Vulnerabilidad económica-productiva . . . . .	196
7.5.4.	Vulnerabilidad político-institucional . . . . .	198
7.5.5.	Vulnerabilidad urbano-regional . . . . .	200
7.6.	Vulnerabilidad total . . . . .	208
7.6.1.	Determinación de la vulnerabilidad total . . . . .	208
<b>8.</b>	<b>Resultados - Aspectos metodológicos para estimar el riesgo en los SAAP</b>	<b>212</b>
8.1.	Metodología para la determinación de la amenaza . . . . .	212
8.2.	Metodología para la determinación de la vulnerabilidad . . . . .	214
8.3.	Metodología para la determinación del riesgo . . . . .	216
8.4.	Matriz de riesgo . . . . .	217
<b>9.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>220</b>
9.1.	Amenazas . . . . .	220
9.2.	Vulnerabilidad . . . . .	221
9.3.	Riesgo . . . . .	222
9.3.1.	Acople de la matriz de riesgo . . . . .	222
9.3.2.	Determinación del riesgo . . . . .	222
9.3.3.	Relaciones entre el nivel de riesgo y los SAAP . . . . .	229
9.3.4.	Zonas geográficas homogéneas en el nivel de riesgo . . . . .	233
<b>10.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>237</b>
<b>11.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>240</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>241</b>



# Índice de figuras

1.1. Metodologías de evaluación del riesgo . . . . .	3
1.2. Comparación factores de vulnerabilidad con dimensiones del territorio. . . . .	7
2.1. Sistemas de abastecimiento . . . . .	18
2.2. Configuración de un SAAP . . . . .	19
2.3. Número de empresas del servicio público de acueducto a nivel municipal . . . . .	23
2.4. Fuentes de abastecimiento de los SAAP . . . . .	25
2.5. Tipo de fuentes abastecedoras . . . . .	26
2.6. Descripción del tipo de captaciones . . . . .	28
2.7. Relación entre el número de empresas y el rango de caudales captados . . . . .	29
2.8. Rango de caudales medios captados (l/s) . . . . .	30
2.9. Tipos de aducciones de agua . . . . .	32
2.10. Rangos de longitud líneas de aducción de agua . . . . .	33
2.11. Sistemas para el tratamiento de agua . . . . .	36
2.12. Capacidad de utilización de los sistemas de tratamiento de agua . . . . .	37
2.13. Tipos de conducción de agua . . . . .	39
2.14. Materiales empleados en las líneas de conducción . . . . .	42
2.15. Rango de longitudes líneas de conducción . . . . .	43
2.16. Rango de longitudes redes de distribución . . . . .	44
2.17. Número de municipios que han reportado información relacionada con los elementos que componen los SAAP . . . . .	46
2.18. Municipios con número de componentes reportados . . . . .	47
2.19. Relación entre dos componentes de un sistema en serie . . . . .	49
2.20. Redundancia de un SAAP . . . . .	50
3.1. Esquema modelo jerárquico . . . . .	54
3.2. Matriz de Comparaciones . . . . .	59
3.3. Matriz de normalización . . . . .	59
3.4. Vector de prioridad . . . . .	59

4.1. Diagrama metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa . . . . .	64
4.2. Jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad . . . . .	65
4.3. Mapa de susceptibilidad de movimiento en masa . . . . .	68
4.4. Mapa final de mapas climáticos . . . . .	71
4.5. Aceleración máxima horizontal a nivel de roca-PGA calificada con base en su contribución a la generación de movimientos en masa. . . . .	73
4.6. Ecuaciones de atenuación . . . . .	80
4.7. Zona de amenaza sísmica . . . . .	81
4.8. Mapa de valores de aceleración pico efectiva para diseño Aa . . . . .	81
4.9. Columna estratigráfica generalizada Volcán Galeras . . . . .	83
4.10. Mapa Amenaza Volcán Galeras . . . . .	86
4.11. Tipificación de las inundaciones . . . . .	89
4.12. Zonas susceptibles a inundaciones . . . . .	90
5.1. Ilustración intersección . . . . .	94
5.2. Escenarios de representación de la amenaza sísmica . . . . .	99
5.3. Estructura del modelo jerárquico para la amenaza . . . . .	105
5.4. Representación amenaza sísmica trayectoria cóncava . . . . .	110
5.5. Mapa representación de la amenaza sísmica bajo un escenario de no linealidad . . . . .	112
5.6. Concentración de municipios con amenaza sísmica en nivel superior a 0.40 . . . . .	113
5.7. Concentración de municipios con amenaza sísmica en nivel medio 0.18 a 0.27 . . . . .	114
5.8. Mapa representación de la amenaza por movimiento en masa bajo un escenario de no linealidad cóncavo . . . . .	116
5.9. Concentración de municipios con amenaza por movimiento en masa en nivel superior a 0.40 . . . . .	117
5.10. Concentración de municipios con amenaza por movimiento en masa en nivel medio 0.01 a 0.30 . . . . .	118
5.11. Representación amenaza por vulcanismo trayectoria convexa . . . . .	120
5.12. Mapa representación de la amenaza por vulcanismo bajo un escenario de no linealidad convexo . . . . .	121
5.13. Concentración de municipios con amenaza por vulcanismo en nivel superior a 0.40 . . . . .	122
5.14. Concentración de municipios con amenaza por vulcanismo en nivel medio 0.01 a 0.30 . . . . .	123
5.15. Representación amenaza por inundación trayectoria convexa . . . . .	124
5.16. Mapa representación de la amenaza por inundación bajo un escenario de no linealidad convexo . . . . .	125

5.17. Concentración de municipios con amenaza por inundación en nivel superior a 0.40 . . . . .	127
5.18. Concentración de municipios con amenaza por inundación en nivel medio 0.01 a 0.30 . . . . .	128
5.19. Mapa de representación de la amenaza total . . . . .	129
5.20. Mapa superposición entre los componentes de los SAAP y la amenaza total	133
5.21. Información del número de elementos de los SAAP en relación con la amenaza total . . . . .	134
6.1. Comparación entre los diferentes tipos de vulnerabilidad y las dimensiones del territorio . . . . .	137
6.2. Estructura del conjunto de variables . . . . .	139
7.1. Comportamiento del índice diferencial del factor de vulnerabilidad . . . . .	165
7.2. Estructura del modelo jerárquico del tipo de vulnerabilidad . . . . .	170
7.3. Estructura del modelo jerárquico del tipo de vulnerabilidad . . . . .	171
7.4. Esquemas de jerarquías anidadas por tipos vulnerabilidad . . . . .	180
7.5. Mapas tipo de vulnerabilidad . . . . .	207
7.6. Mapa vde representación de la vulnerabilidad total . . . . .	209
7.7. Información del número de elementos de los SAAP en relación con la vulnerabilidad total . . . . .	211
8.1. Diagrama de flujo de la metodología para la amenaza . . . . .	213
8.2. Diagrama de flujo de la metodología para la vulnerabilidad . . . . .	215
8.3. Diagrama de flujo de la metodología para determinar riesgo . . . . .	217
8.4. Matriz de Riesgo . . . . .	218
9.1. Concentración de los valores de nivel de riesgo . . . . .	223
9.2. Mapa de determinación del nivel de riesgo . . . . .	224
9.3. Comportamiento variables de entrada Riesgo . . . . .	225
9.4. Diagrama de caja de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo para las cinco zonas geográficas . . . . .	227
9.5. Comportamiento de los departamentos en relación con el nivel de riesgo . . . . .	229
9.6. Matriz de datos relacionada con zonas de similitud en el nivel de riesgo . . . . .	233
9.7. Comportamiento . . . . .	234

# Índice de tablas

2.1. Relación longitud de aducción y número de municipios . . . . .	34
2.2. Relación materiales líneas de aducción con el número de municipios . . . . .	35
2.3. Relación entre el número de municipios y capacidad de uso . . . . .	38
2.4. Frecuencias del tipo de conducción más empleado . . . . .	40
2.5. Número de líneas de conducción por empresa . . . . .	40
2.6. Material líneas de conducción . . . . .	41
2.7. Tipo de sección redes de distribución . . . . .	44
2.8. Resumen del reporte de información por componente . . . . .	45
2.9. Número de municipios con información consistente de la secuencia del sistema	48
2.10. Número de elementos por municipios . . . . .	51
3.1. Escala de importancia relativa . . . . .	55
4.1. Índices de aleatoriedad . . . . .	67
4.2. Resumen de las diferentes ecuaciones para la generación de los mapas de susceptibilidad para una escala 1:100.000 . . . . .	67
4.3. Calificación del detonante sismo . . . . .	72
4.4. Ecuaciones de atenuación . . . . .	79
4.5. Porcentaje de frecuencia . . . . .	84
4.6. Calificación Severidad . . . . .	84
4.7. Valoración de la severidad para cada tipo de depósito . . . . .	85
4.8. Severidad Ponderada inicial SPi . . . . .	85
4.9. Severidad Ponderada . . . . .	85
4.10. Grado de Amenazas Volcán Galeras . . . . .	86
4.11. Unidades superficies de agua . . . . .	88
4.12. Áreas húmedas . . . . .	88
4.13. Bosques y Áreas seminaturales . . . . .	89
5.1. Clasificación cuantitativa amenaza por movimiento en masa . . . . .	96
5.2. Clasificación cuantitativa amenaza por vulcanismo . . . . .	97

5.3. Clasificación cuantitativa amenaza por inundación . . . . .	97
5.4. Combinación lineal opinión de expertos. Matriz de alternativas amenaza . .	104
5.5. Matriz criterios amenazas . . . . .	107
5.6. Matriz de alternativas amenazas . . . . .	108
5.7. Pesos para los criterios matriz principal amenaza . . . . .	108
5.8. Pesos para las alternativas matriz principal amenaza . . . . .	109
5.9. Número de municipios en nivel de amenaza . . . . .	113
5.10. Número de municipios en nivel de amenaza por movimiento en masa . . . .	117
5.11. Número de municipios en nivel de amenaza por vulcanismo . . . . .	122
5.12. Número de municipios en nivel de amenaza por inundación . . . . .	126
5.13. Número de municipios en nivel de amenaza total . . . . .	130
5.14. Número de empresas relacionadas con el nivel de amenaza total . . . . .	130
5.15. Principales ciudades y su nivel de amenaza total . . . . .	131
7.1. Criterios Matriz principal . . . . .	172
7.2. Alternativas jerarquía principal . . . . .	173
7.3. matriz criterios vulnerabilidad urbano - regional . . . . .	181
7.4. Matriz alternativas vulnerabilidad urbano-regional . . . . .	182
7.5. Matriz criterios vulnerabilidad económico - productivo . . . . .	183
7.6. Matriz de alternativas económico - productivo . . . . .	184
7.7. Matriz de alternativas vulnerabilidad natural . . . . .	184
7.8. Matriz de criterios vulnerabilidad natural . . . . .	185
7.9. Matriz de criterios vulnerabilidad socio-cultural . . . . .	186
7.10. Matriz de alternativas vulnerabilidad socio-cultural . . . . .	187
7.11. Matriz criterios vulnerabilidad político - institucional . . . . .	188
7.12. Matriz de alternativas vulnerabilidad político - institucional . . . . .	189
7.13. Pesos para los criterios matriz principal vulnerabilidad . . . . .	190
7.14. Pesos para las alternativas matriz principal vulnerabilidad . . . . .	190
7.15. Pesos para los criterios matriz secundaria vulnerabilidad natural . . . . .	190
7.16. Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad natural . . . .	191
7.17. Pesos para los criterios matriz secundaria vulnerabilidad económico-productivo	191
7.18. Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad económico-productivo	192
7.19. Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad socio-cultural .	192
7.20. Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad socio-cultural .	192
7.21. Pesos para los criterios matriz secundaria vulnerabilidad urbano-regional . .	193
7.22. Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad urbano-regional	193
7.23. Selección de trayectorias - variables elementos geográficos o ecosistémicos determinates . . . . .	194

7.24. Selección de trayectorias - variables función ambiental del municipio . . . . .	194
7.25. Selección de trayectorias - variables dinámica ambiental dominante . . . . .	195
7.26. Selección de trayectorias - variables capital social . . . . .	195
7.27. Selección de trayectorias - variables capital humano . . . . .	196
7.30. Selección de trayectorias - variables capital cultural . . . . .	196
7.28. Selección de trayectorias - variables capital financiero . . . . .	196
7.29. Selección de trayectorias - variables capital físico . . . . .	197
7.31. Selección de trayectorias - variables Producto interno bruto . . . . .	197
7.32. Selección de trayectorias - variables condiciones de mercado . . . . .	198
7.33. Selección de trayectorias - variables factores de producción . . . . .	198
7.35. Selección de trayectorias - variables capital social . . . . .	198
7.34. Selección de trayectorias - variables accesos a bienes y servicios . . . . .	199
7.36. Selección de trayectorias - variables responsabilidad . . . . .	199
7.37. Selección de trayectorias - variables capacidad existente sistema institucional	200
7.38. Selección de trayectorias - variables Características físicas de los sistemas de infraestructura . . . . .	200
7.39. Selección de trayectorias - variables estructura del territorio . . . . .	201
7.40. Selección de trayectorias - variables estructura económica . . . . .	201
7.41. Selección de trayectorias - variables estructura económica . . . . .	202
7.42. Selección de trayectorias - variables convergencia regional . . . . .	202
7.43. Número de municipios en nivel de vulnerabilidad total . . . . .	208
7.44. Número de empresas en nivel de vulnerabilidad total . . . . .	210
9.1. Identificación del nivel de riesgo . . . . .	222
9.2. Análisis estadísticos básicos para la amenaza, vulnerabilidad y riesgo . . . . .	226
9.3. Número de municipios en nivel de riesgo . . . . .	228
9.4. Número de empresas en nivel de riesgo . . . . .	229
9.5. Nivel de riesgo de cada componente de los SAAP . . . . .	230
9.6. Ranking de municipios según resultados del nivel de riesgo y que adicional- mente hayan registrado todos los elementos de los SAAP . . . . .	231
9.7. Ranking de municipios según resultados del nivel de riesgo y que adicional- mente no han registrado elementos de los SAAP . . . . .	232
9.8. Características unificadoras área homogénea 1 . . . . .	235
9.9. Características unificadoras área homogénea 2 . . . . .	235
9.10. Características unificadoras área homogénea 3 . . . . .	235

Definición del estilo fancy

# Capítulo 1

## Introducción

El agua es la esencia de la vida. El agua potable y el saneamiento son indispensables para la vida y la salud y fundamentales para la dignidad de toda persona.

El agua potable se considera como un derecho fundamental y se define de acuerdo con lo establecido por la Naciones Unidas en 2011 como "*el derecho de todos de disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal o doméstico*". El agua se erige como una necesidad básica al ser un elemento indisoluble para la existencia del ser humano (Naciones Unidas, 2011).

El agua en el ordenamiento jurídico Colombiano tiene una doble connotación pues se erige como un derecho fundamental y como un servicio público. En materia de prestación de servicios públicos domiciliarios, el esquema normativo Colombiano en el artículo 365 de la Constitución Política Colombiana [CPC] señala que: "*Los servicios públicos son inherentes a la finalidad social del Estado. Es deber del Estado asegurar su prestación eficiente a todos los habitantes del territorio nacional...*", así mismo este artículo plantea de manera general quienes pueden participar en la prestación de los servicios "*...podrán ser prestados por el Estado, directa o indirectamente, por comunidades organizadas, o por particulares. En todo caso, el Estado mantendrá la regulación, el control y la vigilancia de dichos servicios*". La ley 142 de 1994 (régimen de los servicios públicos domiciliarios) en el artículo 15 desarrolla y especifica el tipo de organizaciones que pueden participar en la prestación de los servicios (e.g., personas naturales o jurídicas, municipios directamente, entidades descentralizadas, comunidades organizadas constituidas como personas jurídicas sin ánimo de lucro, empresas mixtas, empresas asociativas entre otros). Adicionalmente, la mencionada ley permite que en un municipio se encuentre la participación de una o varias empresas prestadoras de los servicios públicos de acueducto y que la prestación del servicio de agua potable sea desarrollada en uno o varios municipios y que las empresas no tengan solo la exclusividad en el servicio público de acueducto (e.g., servicio acueducto y alcantarillado o servicio de

acueducto y aseo).

La ley 142 de 1994, también señala que una de las obligaciones de las empresas prestadoras de los servicios públicos es “*La prestación continua de un servicio de buena calidad*” y el incumplimiento de la empresa en la prestación continua del servicio para efectos de la ley se denomina “*falla en la prestación del servicio*” situación que puede acarrear la intervención del estado en dicha prestación (artículo N° 2).

La aplicación de la evaluación de los riesgos en un sistema de abastecimiento de agua potable, ayuda a identificar las amenazas, el nivel de exposición y la predisposición a daños y pérdidas desde la cuenca hídrica hasta la red de distribución considerando elementos sociales, económicos, físicos, naturales, institucionales, productivos, culturales y territoriales. Esta actividad proporciona elementos y medidas de prevención y/o mitigación de los posibles efectos que ocasionen la interrupción en la operación regular de los SAAP así como fallas en la calidad del servicio.

En la literatura existen diferentes metodologías de evaluación del riesgo (Figura 1.1)(Vargas, 2011). Su estructura varía de acuerdo con los objetivos, profundidad y tipo de análisis (cualitativo o cuantitativo). Considerando que para abarcar la estimación del riesgo Cardona señaló que “*se debe realizar de forma integral con una aproximación holística, con fines de desagregación posterior. Por lo cual es necesario proponer un modelo holístico de estimación y gestión del riesgo con miras a su mitigación preventiva. Dicho modelo incorporará información tanto técnica como social y política*” (Cardona, 2001). Por tanto, la evaluación holística del riesgo implica un proceso de desagregación y de integración entre la amenaza y la vulnerabilidad.

La propuesta conceptual de la vulnerabilidad y el riesgo desde una perspectiva holística en esta investigación, se desarrolla a través de las cinco dimensiones del territorio propuestos por el Departamento Nacional de Planeación [DNP] en el año 2011. Las dimensiones posibilitan una aproximación a la comprensión del carácter dinámico y holístico de los sistemas territoriales, a su vez que facilitan las sinergias o relaciones entre los sistemas de abastecimiento de agua potable y los componentes de un territorio (social, económico, natural entre otros). Con lo cual se pretende mediante el uso de las dimensiones reducir las dificultades en la evaluación del riesgo. Pues como se muestra en la Figura 1.1, las metodologías allí descritas resultan ser las más aplicadas y estas no incluyen en su análisis la totalidad de las dimensiones del territorio, lo que evidencia una visión restringida del problema, así como desconocimiento para abarcar la estimación del riesgo de forma integral.



Metodología para estimar el riesgo	RIESGO	FACTORES DE VULNERABILIDAD				
		Económico-productivo	Socio-cultural	Político-institucional	Natural	Urbano -Regional
1. PNUD-UNDRO (UN, 1979)	El riesgo se evalúa desde un enfoque físico de los sistemas de acueducto y alcantarillado. Por lo que el Riesgo es el resultado del impacto del servicio dada cada una de las amenazas evaluadas en los componentes de los sistemas.		Parcialmente			
2. Environmental Protection Agency (EPA, 1996)	La evaluación del riesgo toma en consideración la información histórica disponible sobre eventos ocurridos y los efectos que estos tuvieron sobre la población infraestructura y servicios. La evaluación del riesgo tiene como finalidad organizar a personas, recursos y los esfuerzos públicos, privados y comunitarios ante posibles emergencias.		Parcialmente		Parcialmente	
3. Organización Panamericana de la Salud - Cepal (Cepal, 1998)	Evaluación del riesgo se define como las pérdidas causadas por las amenazas, en términos de la probabilidad de los efectos y la población total afectada, lo cual puede variar de un lugar a otro y frente a diferentes escenarios.					Parcialmente
4. UNGRD -Dirección de Gestión del Riesgo DGR (UNGRD, 2010)	El riesgo es estimado como una función de la exposición; por lo que los diferentes niveles de exposición experimentados por la población bajo análisis, determinan el rango y nivel del riesgo estimado.	Parcialmente	Parcialmente	Parcialmente		Parcialmente
5. Tesis - Metodología de análisis y proyección del riesgo en sistemas de abastecimiento de agua potable. (Arevalo et al., 2011)	Se propone una metodología para cuantificar los diferentes niveles de riesgo, considerando la oferta hídrica por factor principal para la estimación del riesgo. También incorpora variables de demandada del recurso.				Parcialmente	
6. Superintendencia de servicios públicos (SSPD,2011)	No se estima					Parcialmente
7. Consultoría Fonade - MVDT (Fonade, 2012)	El riesgo toma en consideración un enfoque social, a pesar de hacer aproximaciones holísticas.	Parcialmente	Parcialmente			Parcialmente

Figura 1.1: Metodologías de evaluación del riesgo

Por tanto, para evaluar el riesgo en los SAAP, es necesario contar con instrumentos metodológicos con una visión integral y holística que permitan prevenir, mitigar o reducir los riesgos existentes en la provisión del servicio de agua potable, considerando que son estructuras fundamentales para el desarrollo de un país.

De manera que esta investigación propone una metodología para evaluar el riesgo en los SAAP, de forma integral y holística mediante dos componentes principales: las amenazas de origen naturales y vulnerabilidad (bajo las cinco dimensiones del territorio) a través de un modelo multicriterio (AHP).

## 1.1. Problema

Los desastres naturales causan muchos daños a las vidas y las propiedades todos los años. Considerando que cada año se presentan mayor cantidad de desastres, los impactos que generan cada vez son más fuertes.

El Banco Mundial en 2012 señaló que: "*Colombia enfrenta grandes retos que amenazan seriamente su desarrollo*", resalta que los retos más influyentes son la degradación ambiental y el cambio acelerado del uso del suelo. Estos factores aunados a la propensión que presenta el país a la ocurrencia de fenómenos naturales y las condiciones variantes del clima, confirman un proceso continuo de construcción y acumulación de riesgos (Banco Mundial, 2012).

Con base en la información de DesInventar, el Banco Mundial (Banco Mundial, 2012) adelantó un análisis en los daños por fenómenos naturales en los sistemas de acueducto y alcantarillado. En este estudio, se indica que desde 1950 ha habido un incremento permanente de los impactos de los desastres en la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado en el país. En la década de 1980 se reportaron en promedio 20 registros por año con afectaciones por desastres, cifra que se duplicó en la década de 1990. En los últimos diez años, existe un crecimiento promedio de 4,5 registros anuales, asociados a una mayor infraestructura expuesta. Las amenazas por fenómenos naturales se encuentran entre un amplio espectro de factores que principalmente han ocasionado los colapsos en las infraestructuras.

Un ejemplo claro, fueron las temporadas invernales que ha soportado Colombia en los últimos dos años (2010 - 2011) que dejaron al descubierto la debilidad y vulnerabilidad de la infraestructura de los servicios públicos domiciliarios. En este sentido, la SSPD señaló que "*los sistemas de abastecimiento de agua potable (SAAP) se encuentran expuestos en mayor grado a las amenazas debido a que cuentan con redes únicas y no presentan alternativas de redundancia ni capacidad remanente para enfrentar alguna situación adversa*"(Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2011), por lo que las principales causas del riesgo en los SAAP se relaciona con la debilidad de la infraestructura que condiciona la vulnerabilidad del sistema.

Adicionalmente los costos incurridos por las empresas de servicios públicos para la atención de las emergencias presentadas en los últimos años (2010 - 2011) ascendieron a \$54.000 millones de pesos, los cuales fueron destinados a la recuperación y rehabilitación de los diferentes componentes estructurales de los SAAP. Este valor incurrido representa el 10% de las inversiones que se realizan anualmente en los servicios de acueducto y alcantarillado

(Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2011).

En un informe sobre la información para la gestión de riesgo de desastres - Estudio de caso en Colombia adelantado por la CEPAL en 2007, señaló que *“de la revisión de la información existente en relación con la evaluación de amenazas, vulnerabilidades y riesgos se puede afirmar que: En Colombia existen pocos estudios de riesgo y los que existen son muy recientes. En general existen estudios de amenaza, muchos a los cuales se les ha denominado estudios de riesgo en forma equivocada, pues sólo hacen referencia al fenómeno y no tienen en cuenta la vulnerabilidad. La mayoría de los mapas o estudios de amenaza han sido realizados sin tener en cuenta el nivel de resolución y alcance compatible con la fase de estimación y cuantificación de la vulnerabilidad. De hecho no existen prácticamente estudios de riesgo en el país y pocas veces se han realizado estimaciones de vulnerabilidad”* además indica que *“en el país se ha hecho muy pocos estudios de vulnerabilidad física, social y ambiental”* y *“en general existe una deficiencia notable en el país en relación con la evaluación de riesgos, debido a la falta de un marco instrumental metodológico adecuado para cada nivel; nacional, regional y local”*(Cardona and Yamín, 2007a).

El informe del Banco mundial concluye diciendo que *“(...) la falta de capacidad institucional de los prestadores de servicio y la poca preparación para enfrentar las emergencias son factores críticos para el sector(...), (...)*Claramente, la mayoría de estos agentes no son especializados y no cuentan con la capacidad técnica, administrativa y financiera requerida para brindar los servicios con calidad, cobertura y continuidad a la población en condiciones normales y mucho menos enfrentar situaciones de emergencia (...).”

En tal sentido, el Instituto Nicaraguense de Acueducto y Alcantarillados señala que los sistemas de abastecimiento de agua potable (SAAP) deben adelantar un análisis de riesgos, en el cual se debe incorporar criterios adecuados para identificar las amenazas, afrontar y reducir la vulnerabilidad, con el fin de asegurar las condiciones de salud y la calidad de vida de las poblaciones (Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados, 2011)[INNA].

En Mayo de 2012, a través un convenio interadministrativo celebrado entre el Ministerio de Vivienda, Ciudad y territorio y Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo [FONADE], se realizó la contratación de la *Consultoría para la realización del título k. Manual de prácticas de buena ingeniería, sobre gestión del riesgo en sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, conforme al reglamento técnico de agua y saneamiento RAS*, la cual tuvo como alcance la obtención del título K (Fonade. and Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2012).

En el documento final de consultoría, se evidencia que si bien se quiere dar una con-

cepción holística sobre la evaluación del riesgo, en este se encuentran varios aspectos que hacen pensar en que su valoración aún del todo no cumple su carácter integrador. Algunas de las consideraciones encontradas se describen a continuación:

- Adopta en su gran mayoría las definiciones señaladas en la ley 1523 de 2012 (e.g., amenaza, vulnerabilidad, gestión del riesgo, entre otras), las cuales no reflejan o establecen un criterio para su determinación.
- En cuanto a los tipos de amenazas, se encuentra que la clasificación realizada difiere de la guía propuesta por la Dirección de Gestión del Riesgo [DGR] en el 2010.
- Según la Guía municipal para la gestión del riesgo elaborada por Dirección de Gestión del riesgo [DGR] en 2010, se establecen cuatro factores de vulnerabilidad (Físico, ambiental, económico, social), los cuales hacen referencia a los propuestos por Gustavo Wilches Chaux en 1988. Adicionalmente a estos cuatro factores el documento final incorporó el factor institucional.

La Figura 1.2 compara los factores propuestos con las cinco dimensiones del territorio. En esta se puede evidenciar que en algunos casos los cinco factores de vulnerabilidad propuestos dan cuenta o responde a las dimensiones del territorio de forma parcial, en otros toma elementos de varias dimensiones sin que se evidencien las diferencias. Según Cardona (2001) en su tesis doctoral señala que *‘Una concepción holística del riesgo, consistente y coherente, fundamentada en los planteamientos teóricos, que tenga en cuenta no sólo variables geológicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas, culturales o de otro tipo, podría facilitar y orientar la toma de decisiones en un área geográfica.’*, por lo que un enfoque de este tipo contribuye a mejorar la efectividad en la prevención, mitigación para la reducción del riesgo (Cardona, 2001). Razón por la cual bajo la metodología propuesta por el FONADE y el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, es una buena aproximación a la evaluación holística, más sin embargo no proporciona los suficientes elementos acerca de la efectividad en el análisis de riesgo.

No obstante lo anterior, aportes técnicos importantes se han realizado con fines de evaluación del riesgo en los SAAP, sin embargo cada uno de ellos ha carecido de elementos que den cuenta de todas los factores que en el entorno de la prestación de un servicio fundamental como el de agua potable, son de importante relevancia (e.g., las consecuencias sobre la población y productividad, resiliencia, epidemias entre otros). Por cuanto el conocimiento de los escenarios reales y el grado de incertidumbre en las evaluaciones de riesgo de las líneas vitales o infraestructura de servicios públicos de acueducto puede reducirse si se consideran todas las aristas relacionadas con la amenaza y la vulnerabilidad.

Tipo de vulnerabilidad	Variables de cálculo	Dimensión territorial				
		Económico productivo	Socio-cultural	Político-institucional	Natural	Urbano - Regional
Factor físico	Resistencia	-	-	-	-	Parcialmente
Factor Social	Índice de pobreza multidimensional (IPM), propuesto por el Oxford Proverty & Human Development Initiative (OPHI),	Parcialmente	Parcialmente	-	-	-
Factor Institucional	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Aspectos técnicos: relacionados con la disponibilidad de personal capacitado en temas sectoriales asociados a la gestión del riesgo.</li> <li>•Aspectos administrativos: existencia o no de una estructura especializada para prestar los servicios públicos domiciliarios aún en situaciones de emergencia.</li> <li>•Aspectos financieros: capacidad financiera del prestador de servicios para su auto sostenibilidad y definición de fuentes de recursos claros y diferenciados para operar tanto en situaciones de normalidad como de emergencia.</li> <li>•Aspectos legales: conocimiento y aplicación del prestador de servicios públicos domiciliarios de las normas que le exigen una prestación de servicios con indicadores de calidad y continuidad en situaciones de normalidad y de emergencia. Y de los aspectos legales a los cuales lo obliga las normas establecidas para la prevención y atención de desastres.</li> </ul>	Parcialmente	Parcialmente	Parcialmente	-	-
Factor económico	Pobreza desempleo, insuficiencia de ingresos, dificultad e imposibilidad de acceso a los servicios	-	Parcialmente	-	-	Parcialmente
Factor ambiental	Huella ecológica	-	-	-	Parcialmente	Parcialmente

Figura 1.2: Comparación factores de vulnerabilidad con dimensiones del territorio.

Esta investigación propone, no solo integrar algunas variables descritas con anterioridad sino que además ofrece un marco conceptual más detallado y específico para evaluar el riesgo bajo la concepción holística apoyándose con los sistemas de información geográfica (SIG), herramienta que le permita al tomador de decisiones, autoridades políticas y la misma comunidad, tener los suficientes insumos y elementos para la estimación del riesgo considerando aspectos de planificación estratégica del territorio, desarrollo sostenible, gestión de los recursos naturales y ayudas humanitarias.

## 1.2. Objetivos

Desarrollar una metodología para estimar el riesgo en los sistemas de abastecimiento de agua potable (SAAP) considerando una perspectiva holística.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar los tipos de vulnerabilidad que se relacionan con las dimensiones del territorio.
- Estimar la vulnerabilidad de las dimensiones del territorio ante la ocurrencia de un evento amenazante.
- Incorporar la valoración de amenazas naturales en la estimación holística del riesgo en los SAAP
- Determinar el riesgo considerando las relaciones que existe entre las amenazas naturales y vulnerabilidades

### **1.3. Alcance**

La metodología que se propone es una herramienta para estimar el riesgo en los SAAP. La cual es el resultado de un análisis de decisión multicriterio, que proporciona un carácter holístico en la comprensión de los riesgos asociados a la prestación del servicio de acueducto. En este sentido, los alcances a la metodología propuesta son los siguientes:

- Ser un documento de referencia para adelantar la identificación de los riesgos en los SAAP
- La determinación del riesgo tiene como escala el nivel municipal, cuyos resultados se presentan como un indicador del riesgo en un municipio en el cual se encuentra asociado un SAAP
- La metodología que se propone es un indicador como un único valor del nivel de riesgo en un determinado municipio. Su aplicación permite que sea un insumo en la construcción de procesos territoriales relacionados con la identificación de los riesgos.
- El desarrollo metodológico propuesto permite que a escala municipal el tomador de decisiones pueda identificar como único valor el nivel de riesgo y a partir de allí y con base en otros estudios ajustar las políticas públicas en esta materia bajo una perspectiva de corto a largo plazo. Sin embargo, la metodología que se propone no invalida estudios más específicos bajo el carácter holístico a escala municipal al cual se esta asociados un SAAP. Un ejemplo de esto son: Los planes de seguridad del agua (Bartram et al., 2009), los mapas de riesgo de la calidad de agua para consumo humano (MPS. and MVDT., 2010), planes de ordenamiento de cuencas, planes de ordenamiento territorial (POT) entre otros.

- La propuesta metodológica que se adelantó y la suma de otros estudios más específicos bajo el carácter holístico pueden fortalecer y mejorar las condiciones de riesgo en un municipio.

## 1.4. Marco conceptual

Considerando que experiencias anteriores incorporan en sus desarrollo metodológicos conceptos que no dan respuesta a una evaluación de riesgo con el carácter holístico y que el lenguaje usado en muchos de los casos difieren entre ellas, a continuación se emplean definiciones que aportan al conocimiento de la gestión del riesgo y ayudan a comprender el desarrollo conceptual de esta investigación.

**Adaptabilidad:** es el ajuste del sistema en respuesta a estímulos generados por las amenazas o eventos climáticos actuales o previstos, o a sus efectos, a fin de atenuar el daño o explotar oportunidades favorables.

**Aducción:** sistema de tuberías o canales para el transporte de agua cruda, hasta la planta de potabilización (Gómez (2006); Uribe (2009)).

**Agua cruda:** agua natural que no ha sido sometida a un proceso de tratamiento para su potabilización.

**Agua potable o agua para consumo humano:** es aquella agua que por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas, en las condiciones señaladas en las normas vigentes que la reglamenten, es apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal.

**Amenaza:** hace referencia a un evento natural o antrópico que puede causar algún tipo de daño/perdida sea material, ambiental, de vidas humanas (Lavell, 1994). Sanchez-Silva (2005) señala que una amenaza puede expresarse como la probabilidad de excedencia de cierto parámetro del fenómeno bajo consideración en un periodo de tiempo determinado :

$$H(\vec{a}, t) = P(A > a \mid t_1 < t < t_2) \quad (1.1)$$

En donde,

$\vec{a}$  = es el vector de parámetros utilizado para describir la amenaza

$(t_1, t_2)$  = es el periodo de tiempo para el cual se hace el análisis

**Amenaza geológica:** proceso geológico que durante un sismo u otro evento de la naturaleza puede afectar adversamente las obras de ingeniería. Dentro de las amenazas geológicas se cuentan los deslizamientos, licuación del suelo, aparición de grietas y fallas locales (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996).

**Amenaza por movimiento en masa:** el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)

señala que la amenaza es un evento, fenómeno o actividad humana que puede causar daño, pérdida de vidas, daños a la propiedad, interrupción de las actividades sociales y económicas o degradación ambiental (EIRD citado por el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)). La descripción de amenaza por movimientos en masa debería incluir la localización, volumen (área), clasificación y velocidad del movimiento, posibles materiales desprendidos de la masa fallada y la probabilidad de su ocurrencia dentro de un periodo de tiempo dado. (Fell, et al citado por el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)).

**Amenaza relativa:** hace referencia a una expresión cualitativa de la amenaza. Hartlen y Viberg citados por el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011), la definen como la probabilidad de que ocurran deslizamientos en diferentes áreas sin dar valores exactos.

**Amenaza sísmica:** fenómeno físico asociado a un sismo, tal como el movimiento fuerte del terreno o falla del mismo, que tiene el potencial de producir una pérdida (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996).

**Área de servicio exclusivo:** es el área geográfica correspondiente a los municipios y otras áreas urbanas sobre las cuales se otorga exclusividad para la prestación de un servicio público domiciliario. Esta se establece mediante licitación pública, en la cual ninguna otra persona prestadora puede ofrecer los servicios y actividades objeto del contrato, durante un tiempo determinada y cuya finalidad es asegurar la extensión de la cobertura del servicio a los usuarios de menores ingresos (Ramírez Gómez, 2011).

**Capacidad hidráulica:** caudal máximo que puede manejar un componente o una estructura hidráulica conservando sus condiciones normales de operación (Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de agua potable y saneamiento básico, 2000).

**Capacidad de recuperación:** cuando dentro de la dinámica o procesos de interacción ocurren cambios, la capacidad de recuperación dentro del marco de la vulnerabilidad resulta ser el restablecimiento de las condiciones previas del daño.

**Capacidad de uso:** permite establecer las exigencias a las cuales debe someterse un elemento del sistema de abastecimiento. Así mismo permite conocer la capacidad del mismo ante un eventual incremento de la demanda por razones operativas, contingencias o períodos de altos consumos en la población (Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de agua potable y saneamiento básico, 2000). La obtención del porcentaje de uso se define como:

$$\%Capacidad_{uso} = (Q_{Op}/Q_{Di}) * 100 \quad (1.2)$$

En donde,

$Q_{Op}$  = Capacidad operativa del elemento

$Q_{Di}$  = Capacidad de diseño del elemento



**Captación:** estructura mediante la cual se deriva y se toma el agua de una fuente de abastecimiento sea superficial o subterránea (Gómez, 2006),(Uribe, 2009).

**Conducción de agua potable o tratada:** conjunto de tuberías mediante la cual se realiza el transporte de agua potable o tratada hacia el sistema de distribución (Lavell, 1994).

**Confiabilidad de sistemas:** se entiende por confiabilidad a la probabilidad de que el sistema deje de prestar el servicio para el cual fue diseñado (Nyman, 1984), (Centre of Advanced Engineering, 1991),(Lumsden et al., 1992) (Oficina Sanitaria Panamericana, 1997). La evaluación de la confiabilidad de un sistema depende de un gran número de factores entre los que se encuentran:

- La contribución de cada componente a la ocurrencia de la falla del sistema
- La redundancia del sistema
- La identificación de mecanismos de falla
- La respuesta y cambios del sistema ante la falla de un elemento
- El proceso de ocurrencia de falla

Por tanto, la confiabilidad del sistema puede obtenerse mediante dos alternativas: 1) El método de identificación de modos de fallas, tiene que ver con la identificación de los modos fundamentales bajo los que un sistema puede fallar, los cuales coinciden con el modo de falla del elemento. Para cada modo de falla existe una función de estado límite. 2) Identificación del comportamiento crítico del sistema. En esta se identifica de manera sistemática las secuencias de eventos consecutivos que puedan conducir a la ocurrencia de una falla (Sanchez-Silva, 2005).

Para su determinación se utilizan métodos estadísticos o modelos matemáticos de confiabilidad basados en conceptos de probabilidad y modelado de sistemas.

**Corregimiento departamental (CD):** es una división del departamento, al tenor del Decreto 2274 del 4 de octubre de 1991, la cual incluye un núcleo de población. Según esta misma disposición, los ahora corregimientos departamentales no forman parte de un determinado municipio (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2012).

**Degradación de suelos y tierras:** la degradación de las tierras es entendida como “la reducción en su capacidad para proporcionar bienes y servicios del ecosistema y garantizar sus funciones durante un período de tiempo para sus beneficiarios” (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2012).

**Deslizamientos:** hace referencia a desplazamientos de terreno y no incluye los procesos erosivos denudacionales (Sánchez, 2002).

**Desarenador:**son estructuras hidráulicas que tienen como función remover las partículas de cierto tamaño que la captación de una fuente superficial permite pasar.

**Dimensión del territorio:** se entiende como un proceso de cambio estructural emprendido por una sociedad organizada territorialmente, sustentado en la potenciación de los capitales y recursos (materiales e inmateriales) existentes localmente y el aprovechamiento de las oportunidades externas, con el fin de dinamizar la economía y de mejorar la calidad de vida de la población. Las dimensiones del desarrollo territorial permiten realizar una comprensión integral del desarrollo y la organización territorial (Departamento Nacional de Planeación, 2011).

Según el Departamento Nacional de Planeación (2011), los componentes territoriales pueden ser integrados y examinados de manera interrelacionada a través de cinco dimensiones. A continuación se plantea parte de las características de cada una de ellas:

- **Económico-productivo.** Es concebida desde la competitividad territorial con el fin promover el crecimiento económico y el desarrollo local. Busca la construcción de sistemas productivos que van desde lo sectorial hacia la formación de vínculos competitivos a nivel territorial.

Plantea relaciones con: los factores productivos, condiciones de la demanda, estructura y rivalidad de las empresas, asociatividad, formación de redes y encadenamiento empresarial con el entorno territorial.

- **Político-institucional.** Su principal propósito es la gobernanza territorial. Concentra su trabajo en la articulación y coordinación del desarrollo sustentable, genera condiciones favorables para poder desarrollar acciones territoriales conjuntas gobierno y sociedad civil requeridos para conseguir la cohesión territorial sostenible.

El reto fundamental es la acción coordinada entre las instancias gubernamentales, privadas y sociales alrededor de: la eficacia en la autogestión, interacción de acciones de interés común para el desarrollo territorial, transparencia en el manejo de los recursos públicos y generación de sinergias socioeconómicas.

- **Natural.** Considera los aspectos básicos del ecosistema su interrelación con el territorio y su interconexión con regiones biogeográficas. Identifica la capacidad de los ecosistemas ante las influencias antrópicas, la protección de los recursos naturales, su explotación y ocupación.

- **Urbano-regional.** Corresponde al análisis del entorno territorial, como medio innovador para el desarrollo. Se examinará el panorama sobre el escenario actual de los asentamientos urbanos y los desequilibrios en la disponibilidad y acceso a las funciones urbanas promoviendo una mayor aproximación y accesibilidad entre los lugares avanzados y rezagados. Busca principalmente el crecimiento económico y desarrollo socioeconómico.

Se caracteriza por la articulación e integración del sistema de asentamientos, a través

de los cuales se propicia la generación de economías de aglomeración y de economías externas.

- **Socio-cultural.** Entendida como el conjunto de procesos sociales, culturales y económicos que promueven en un territorio el dinamismo productivo y el mejoramiento continuo de la calidad de vida de la población. Plantea la identificación de los factores críticos para el desarrollo social territorial no solo desde la perspectiva interna del área social, sino considerando también los componentes de crecimiento económico, desarrollo institucional y sostenibilidad ambiental.

La dimensión social pretende la activación y canalización de fuerzas sociales, la mejoría en la capacidad asociativa, promueve el ejercicio de la iniciativa y potencializa la inventiva. Por lo tanto, se trata de un proceso social y cultural y solo subsiguiente el económico.

**Elemento:** representación de algún fenómeno natural, físico o social que se describe por medio de un sustantivo o una frase. Cada elemento está caracterizado por una serie de atributos y funciones (Sanchez-Silva, 2005).

**Estaciones de bombeo:** son estructuras destinadas a elevar un fluido desde un nivel energético inicial a un nivel energético mayor (Gómez, 2006),(Uribe, 2009). Dentro de una estación se incluyen tanto las bombas como los equipos auxiliares de las mismas. En consecuencia, las características de diseño de las estaciones de bombeo varían con la capacidad y el método constructivo a emplear (Metcalf and Eddy, 1995).

**Frecuencia:** es el número de eventos amenazantes presentados en un periodo de tiempo determinado.

**Funcionamiento:** comportamiento funcional (utilización de manera ideal) de un elemento físico, social, económico y organizacional.

**Fuente de abastecimiento:** recurso hídrico de donde se captará el agua necesaria para abastecer a una población (Gómez, 2006),(Uribe, 2009).

**Identificación de modos de falla:** tiene que ver con las identificación de los modos fundamentales bajo los cuales el sistema puede fallar (Sanchez-Silva, 2005). Para lo cual se emplean metodologías como los árboles de falla.

**Identificación del comportamiento crítico del sistema:** se encuentra asociada a los árboles de eventos, en los que se identifica de manera sistemática las secuencias de eventos consecutivos que pueden concluir a la ocurrencia de una falla (Sanchez-Silva, 2005).

**Inundación:** evento natural y recurrente que se produce en las corrientes de agua, como resultado de lluvias intensas o continuas que, al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y de los cauces, desbordan e inundan llanuras de inundación, en general, aquellos terrenos aledaños a los cursos de agua. Las inundaciones se pueden dividir de acuerdo con el régimen de los cauces en: lenta o de tipo aluvial, súbita o de tipo torrencial y encharca-

miento.

**Inundación de tipo aluvial (inundación lenta):** se produce cuando hay lluvias persistentes y generalizadas dentro de una gran cuenca, generando un incremento paulatino de los caudales de los grandes ríos hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento; se produce entonces el desbordamiento y la inundación de las áreas planas aledañas al cauce principal. Las crecientes así producidas son inicialmente lentas y tienen una gran duración. En Colombia, se dan en las partes bajas de las cuencas de los ríos Magdalena, Cauca, Sinú, San Jorge y en la Orinoquía y Amazonía.

**Creciente o Inundación de tipo torrencial (inundación súbita):** producida en ríos de montaña y originada por lluvias intensas. El área de la cuenca aportante es reducida y tiene fuertes pendientes. El aumento de los caudales se produce cuando la cuenca recibe la acción de las tormentas durante determinadas épocas del año, por lo que las crecientes suelen ser repentinas y de corta duración. Estas inundaciones son generalmente las que causan los mayores estragos en la población por ser intempestivas. En Colombia se presentan con regularidad en las cuencas de la región Andina.

**Magnitud:** es una propiedad de la amenaza la cual está relacionada con la cantidad de energía liberada durante el desarrollo específico de un fenómeno.

**Movimiento en masa:** Sánchez (2002) lo define como todo desplazamiento hacia abajo (vertical o inclinado en dirección del pie de una ladera) de un volumen de material litológico (roca, formación superficial o suelo) importante, en el cual el principal agente es la gravedad y que puede o no incluir el efecto del agua. Cruden citado por el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011) lo define como movimiento ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras.

**Pérdida directa:** están relacionadas con el daño físico. Expresado en el daño de la infraestructura de servicios públicos.

**Pérdida indirecta:** para esta investigación se encuentran asociadas a los efectos que pueden tener aspectos tales como sociales, económicos, institucionales, entre otros (e.g., el corte de los servicios básicos puede acarrear serias consecuencias, por ejemplo la interrupción de las telecomunicaciones o la falta de agua potable la pérdida de productividad).

**Red de distribución:** conjunto de tuberías que permiten el transporte y acceso de agua a todos los usuarios-viviendas que conforman la comunidad servida. Su principal función es permitir que llegue agua a los usuarios en calidad, cantidad y presiones adecuadas (Gómez, 2006),(Uribe, 2009).

**Relaciones:** todos los elementos están conectados con otros elementos del sistema por medio de relaciones (Sanchez-Silva, 2005). Sanchez-Silva (2005) cita como ejemplo: dos elementos A y B están conectados si un cambio en uno de ellos implica un cambio en el otro. Las relaciones permite transferir información, energía, materiales, etc. A su vez las relaciones están caracterizadas por una serie de parámetros y funciones.

**Resistencia:** capacidad de un sistema para mantener su integridad ante condiciones externas desfavorables y de reaccionar apropiadamente en un momento de crisis que no ha sido anticipado (Sanchez-Silva, 2005).

**Severidad:** Se define como la capacidad que posee un determinado tipo de evento (i.e., volcánico) de causar daño a elementos bajo riesgo (Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química, 1997).

**Sistemas:** proviene del griego "*sutema*" que significa un todo organizado (Sanchez-Silva, 2005). Wilson (1984) señala que un sistema se caracteriza por un conjunto de elementos u objetos estructurados por medio de relaciones. Por lo tanto, cuando se habla de sistema se debe considerar tres aspectos: 1) los elementos que lo componen, 2) las relaciones entre los elementos y 3) los límites del sistema (Sanchez-Silva, 2005).

**Sistema abierto:** permite, simultáneamente, intercambio de información constante con el entorno y el desarrollo de procesos internos. Los cuales no necesariamente estaban definidos con antelación (Sanchez-Silva, 2005).

**Sistemas de abastecimiento de agua potable:** son el conjunto de obras, equipos y servicios destinados al suministro de agua potable para consumo doméstico, industrial, institucional, entre otros usos (Gómez, 2006).

**Sistema cerrado:** el sistema produce un valor como respuesta a una demanda (Sanchez-Silva, 2005). A esta clase de sistema ningún elemento de afuera entra y ninguno sale fuera del sistema.

**Sistemas de potabilización:** conjunto de estructuras que mediante diferentes métodos de tratamiento permiten obtener un agua potable o de buena calidad para el consumo humano (Gómez, 2006), (Uribe, 2009).

**Sistemas en serie:** son una sucesión de elementos organizados en forma de cadena, de tal manera que la falla de un elemento ocasiona la falla de todo el sistema (Sanchez-Silva, 2005). Desde el punto de vista de confiabilidad, un sistema en serie es definido como aquel sistema en donde todos sus componentes deben operar para que el sistema en su totalidad opere (Melo González et al., 2009). Hernández (2007) señala que un sistema serie representa un sistema no redundante.

**Sistema en paralelo:** un sistema que funciona si al menos uno de sus componentes está funcionando se dice que tiene una estructura en paralelo (Melo González et al., 2009). Desde el punto de vista de confiabilidad, la falla solo se presenta cuando todos los elementos fallan (Sanchez-Silva, 2005).

**Sistema de bombeo:** consiste en un conjunto de elementos que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos, de forma que se cumplan las especificaciones de caudal y presión necesarias en los diferentes sistemas y procesos (Mari-gorta et al., 1994).

**Sistema de rebombeo:** conforme con las características topográficas y técnicas del sis-

tema de abastecimiento el sistema de rebombeo consiste en un conjunto de elementos que permiten el transporte a través de tuberías y el almacenamiento temporal de los fluidos igual a un sistema de bombeo pero este sistema tendrá dos puntos de impulsión (e.g., el primero que llevará el agua hasta el tanque y el siguiente transportará el agua hasta las casas)(Marigorta et al., 1994) (Brito and Perez, 2011).

**Susceptibilidad de deslizamiento:** evaluación cuantitativa o cualitativa de una región en la que existen o pueden existir deslizamientos. Esta evaluación considera la clasificación, volumen (o área) y distribución espacial de los movimientos en masa; también puede incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos potenciales o existentes (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011).

**Tanque desarenador:** estructura que reduce algunas impurezas que contiene el agua de la fuente, mediante un proceso de sedimentación o precipitación de partículas de material con determinada densidad y tamaño, en un tiempo relativamente corto(Gómez, 2006),(Uribe, 2009).

**Tanque de almacenamiento y compensación:** su principal función es la de regular las variaciones de la demanda y garantizar una cabeza de presión adecuada en toda la red de distribución (Gómez, 2006),(Uribe, 2009).

**Ubicación geográfica:** es la localización de un sitio con base en sus características geográficas.

**Vulnerabilidad:** se define como los efectos que tienen los aspectos como natural, socio cultural, urbano regional, socio cultural y político institucional sobres los elementos que pueden ser embestidos por su influjo. Para efectos de cálculo, la vulnerabilidad se expresa como el cociente entre el grado de exposición y la resistencia de los elementos sujetos al evento natural dañino. Esta se expresa:

$$Vulnerabilidad = \frac{E}{S} \tag{1.3}$$

En donde,

V : Vulnerabilidad

E : Exposición

R : Resistencia

**Zonificación:** Varnes citado por el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011) define zonificación como la división de la superficie del terreno en áreas y la clasificación de acuerdo con el grado actual o potencial de amenaza por deslizamientos u otros movimientos en masa en las laderas.

## Capítulo 2

# Descripción de los sistemas de abastecimiento de agua potable -[SAAP] en Colombia

### 2.1. Sistemas de abastecimiento de agua potable - SAAP

Bajo una acepción amplia, la teoría general de sistemas se presenta como una forma sistemática y científica de aproximar y representar la realidad; al mismo tiempo, juega un papel muy importante para orientar los análisis desde una perspectiva holística e integradora, en donde lo importante es identificar las relaciones y el comportamiento de los sistemas que a partir de ella emergen (Jimenez and Hernandez, 2002).

Los sistemas de abastecimiento de agua potable SAAP o también llamado servicio público domiciliario de agua potable, son todos aquellos elementos que buscan el suministro de agua a una vivienda, institución o industria garantizando criterios de calidad, presión, cantidad y continuidad (Uribe, 2009).

Al utilizar la teoría general de sistemas para explicar el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento de agua potable, se pretende identificar las relaciones que existen entre sus elementos, además de desarrollar un marco de referencia para la toma de decisiones en el proceso de identificación de los riesgos asociados a cada elemento.

Para explicar el funcionamiento de los sistemas de agua potable empezaremos por conocer uno de los aspectos de un sistema. El *Elemento*. Cada elemento se caracteriza por poseer atributos y funciones que lo identifican; para lo cual Gómez (2006); Uribe (2009) señalan que los sistemas de abastecimiento de agua potable SAAP contienen elementos

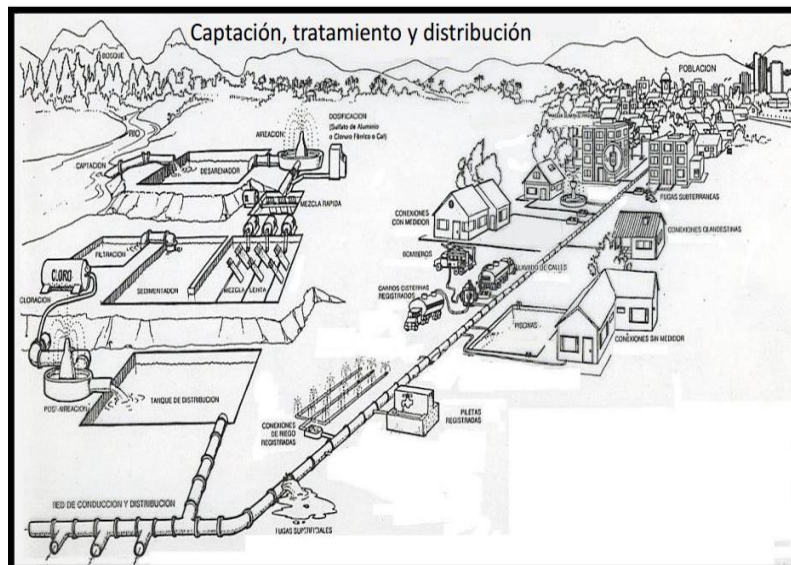


Figura 2.1: Sistemas de abastecimiento  
Fuente: (Uribe, 2009)

estructurales principales (Figura 2.1) tales como: Fuentes de abastecimiento, estructuras de captación, líneas de aducción de agua cruda, sistemas de potabilización, líneas de conducción de agua tratada o potable, sistema de redes de distribución y en algunos casos se contemplan elementos complementarios tales como: las estaciones de bombeo (que pueden estar ubicadas en algún o algunos de los componentes principales), tanques desarenadores y tanques de almacenamiento o tanques de compensación, estos tanques permiten mejorar la calidad del agua cruda y garantizar la continuidad. Considerando la configuración de los sistemas de abastecimiento de agua potable se puede observar que cada elemento cumple una única función (e.g., línea de aducción se encarga de transportar agua cruda), más sin embargo estos comparten algunos atributos (e.g, Caudales de operación).

Bertalanffy (citado en Jimenez and Hernandez, 2002) señala que un "*sistema es un conjunto de elementos recíprocamente relacionados para alcanzar un fin*", por consiguiente, otro aspecto importante dentro de los sistemas son las *Relaciones*; como la principal función de los SAAP es la de llevar agua desde su lugar de existencia (fuente) hasta un lugar de destino (e.g., vivienda o institución o industria) previamente pasando por un tratamiento, la relación que existe entre sus elementos se realiza a través de la transferencia de flujos de agua o flujos de energía, etc., flujos que pasan por cada elemento y al estar concatenados permiten identificar la comunicación entre los elementos mediante la caracterización de una serie de parámetros y funciones (Figura 2.2).



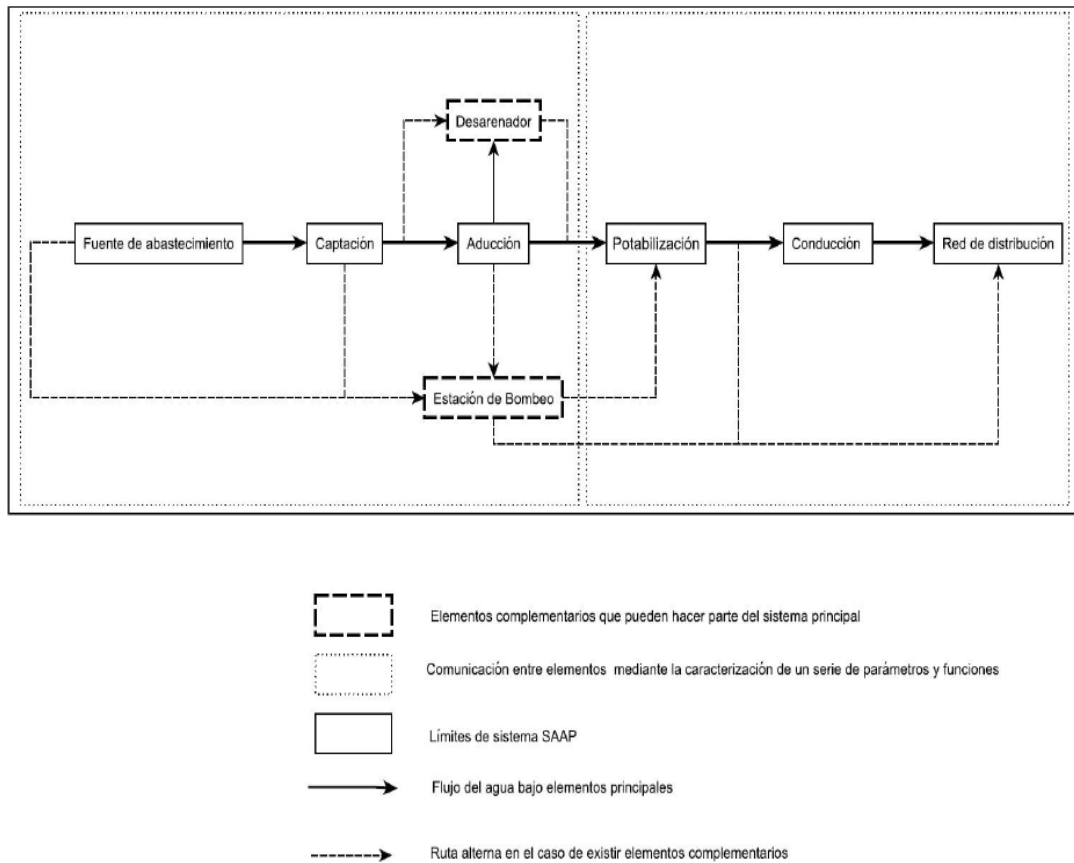


Figura 2.2: Configuración de un SAAP  
Fuente: El autor

Otro aspecto relevante dentro de las características de un sistemas es el *Límite del sistema*, este define el alcance (qué incluye y qué no incluye) en la Figura 2.2, se observa el límite de los SAAP, también se muestra que elementos del sistema se incluyen (elementos principales) y cuales no (elementos complementarios) ya que dependen de la configuración del mismo.

La Figura 2.2 permite evidenciar características o atributos esenciales de los elementos que componen los SAAP, dichos atributos se conocen como variables de estado del sistema (Sanchez-Silva, 2005), (e.g., Caudal de diseño (l/s), Caudal de operación (l/s), material de la infraestructura, longitud (m)). Vale la pena mencionar que el análisis de dichas características estarán sujetas a la información que se encuentra disponible en el sistema único de información [SUI].

## 2.2. Registro de la información relacionada con los sistemas de abastecimiento de agua potable -SAAP en Colombia

La Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [SSPD] dentro de sus funciones tiene entre otras la de inscribir y llevar el registro de las personas prestadoras de los servicios públicos domiciliarios en Colombia. Para lo cual se solicitó a esta entidad la información relacionada con el número de empresas que adelantan la prestación del servicio público de acueducto, su localización y área de prestación.

Así mismo la SSPD tiene la responsabilidad de establecer, administrar, mantener y operar el sistema único de información [SUI] para los servicios públicos. El SUI es un sistema suprainstitucional que busca eliminar asimetrías de información y la duplicidad de esfuerzos de las entidades del orden nacional. El SUI es de libre acceso a través del portal [www.sui.gov.co](http://www.sui.gov.co).

El SUI cuenta con reportes estructurados para siete servicios, uno especial para alcaldías, gobernaciones y Corporaciones Regionales Autónomas y al interior de ellos se encuentran cuatro tópicos (administrativo, comercial, financiero y técnico-operativo), estos permiten consultas genéricas de la información que ya ha sido certificada por cada prestador, según su ubicación, período, área de prestación del servicio y nombre de la empresa.

La estructura para el reporte de la información técnico-operativa del SUI se dispone mediante la Resolución SSPD N° 20101300048765 de 2010, en ésta se establece el diligenciamiento de 54 formularios y 8 formatos a las empresas del servicio de acueducto. Cada uno de los formularios y formatos captura un tipo de información particular (e.g., formulario registro de fuente, este formulario permite el registro de fuentes superficiales y subterráneas de uso en abastecimiento, formato muestreo calidad del agua fuentes superficiales, solicita información de la calidad química y microbiológica de las fuentes de abastecimiento).

La captura de información en los formularios y formatos no permite el registro de información parcial o que no tenga la empresa de acueducto, el diligenciamiento de cada variable solicitada es obligatoria. Dada la robustez del SUI al no contar con alguna información este no permite su registro (e.g., Formulario de fuentes superficiales solicita 9 variables entre ellas: fecha y hora del aforo de la fuente para condiciones tanto en épocas de lluvia como en secas). Adicionalmente esta robustez del SUI hace que se puedan presentar errores ya que maneja diferentes métricas en un mismo formulario o formato (e.g., Caudal medio diario en la fuente (l/s) y Agua captada ( $m^3$ )).

### 2.2.1. Descripción de la información

Antes de definir las características de los SAAP, se realizó una consulta al SUI acerca del registro del número de empresas de acueducto. Como resultado 6050 empresas se encuentran registrada ante la SSPD. De las 6050 empresas 2750 presentan una ubicación geográfica específica en 1123 municipios, las restantes (3300) no señalan el área de prestación del servicio.

La cobertura territorial de las 2750 empresas es de 1086 municipios de un total de 1123 Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2005). Cundinamarca presenta 4 municipios sin información (El Peñón, Granada, Nilo y Viani), con 2 municipios los departamentos de Antioquía, Bolívar, Choco y Nariño y con 1 municipio los departamentos de La Guajira, Magdalena, Putumayo y Santander (Figura 2.3).

En los registros de proyecciones de población municipales por área del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2005) se identifican 20 Corregimientos Departamentales [CD] ubicados principalmente en los departamentos de Amazonas (8), Guainía (9) y Vaupés (3) para estos corregimientos no se encuentra información en la SSPD relacionada con el registro de empresas que adelantan la prestación del servicio de acueducto, en la Figura 2.3 se representa en una tonalidad clara.

La Figura 2.3 representa la distribución espacial a nivel municipal de las empresas que se encuentran registradas ante la SSPD. De los 1123 municipios 520 presentan un solo prestador del servicio de agua potable, en 254 municipios 2, en 122 municipios 3 empresas, esta tendencia continua hasta encontrar que en los municipios de Dosquebradas -Risaralda y Amaga -Antioquía tienen el mayor registro de empresas 29 y 27 respectivamente. La ciudades de Pereira -Risaralda, Cali -Valle del Cauca e Ibagué -Tolima le siguen con 25, 24 y 22 empresas respectivamente.

En la práctica esta situación es permitida considerando que bajo el concepto de la libre competencia establecida en la ley 142 de 1994 por el cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios, en el artículo 23 señala que: "*Las empresas de servicios públicos pueden operar en igualdad de condiciones en cualquier parte del país*", adicionalmente en el artículo 22 se indica que: "*para poder operar deberán obtener de las autoridades competentes, según sea el caso, las concesiones, permisos y licencias*". No obstante lo anterior, el artículo 26 señala que: "*en cada municipio, quienes prestan servicios públicos estarán sujetos a las normas generales sobre la planeación urbana, la circulación y el tránsito, el uso del espacio público, y la seguridad y tranquilidad ciudadanas; y las autoridades pueden exigirles garantías adecuadas a los riesgos que creen*". Vale la pena aclarar que las comuni-

dades organizadas (Juntas Administradoras) pueden prestar el servicio en cualquier parte del territorio nacional, tal como señaló la Corte Constitucional en Sentencia C-741 de 2003. Así las cosas, una persona prestadora puede entrar libremente a prestar el servicio, excepto que en el municipio exista un área de servicio exclusivo.

La Figura 2.3 también permite observar la existencia de una pluralidad de empresas que prestan el servicio de acueducto en un determinado territorio, pero esta pluralidad no siempre garantiza la calidad del servicio bajo los estándares técnicos, económicos, financieros señalados por la normatividad Colombiana. Un ejemplo de esto es el Diagnóstico de la calidad del agua suministrada por las empresas prestadoras del servicio de acueducto en Colombia 2009-2010 adelantado por la Superintendencia de Servicios Públicos (2011). En este informe se señala que *"En Colombia durante el año 2010, el 40.8 % de la población recibió de los prestadores del servicio de acueducto agua con Índice de Riesgo IRCA menor a 5 % es decir apta para consumo humano. Esto corresponde a 18.549.300 habitantes ubicados en 428 municipios del país. El 28.9 % de la población consumió agua con un nivel de riesgo superior a 5.1 %, es decir agua no apta para el consumo humano, lo que impactó a 13.161.600 de habitantes ubicados en 575 municipios del país. El 30,6 % restante de la población ubicada en 119 municipios no se cuenta con información ya que las autoridades de salud no reportaron al Sistema de Vigilancia de la Calidad del Agua Potable [SIVICAP] los resultados de la vigilancia al agua suministrada."*

#### **2.2.1.1. Análisis de la infraestructura del servicio de acueducto**

Se realizó una consulta al Sistema Único de Información SUI relacionado con la información técnico-operativa, con el propósito de identificar los atributos y características funcionales de cada uno de los elementos principales y complementarios de los SAAP.

La consulta se realizó a partir del año 2006 a 2012, esta selección obedeció a que antes del año 2009 el SUI se regía por una serie de circulares y resoluciones las cuales solicitaban el reporte de información parcial de los elementos de los SAAP y en otras ocasiones se presentaba un doble reporte de la misma información lo que generaba una duplicidad en la información y como consecuencia una baja confiabilidad en los valores reportados ya que carecían de consistencia (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2011).

A partir del año 2009 se expidió por parte de la SSPD la resolución compilatoria la cual unificó en un solo acto administrativo la información financiera, tarifaria, administrativa, técnica y operativa e incorporó nuevos elementos de vigilancia y control para prestadores

## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

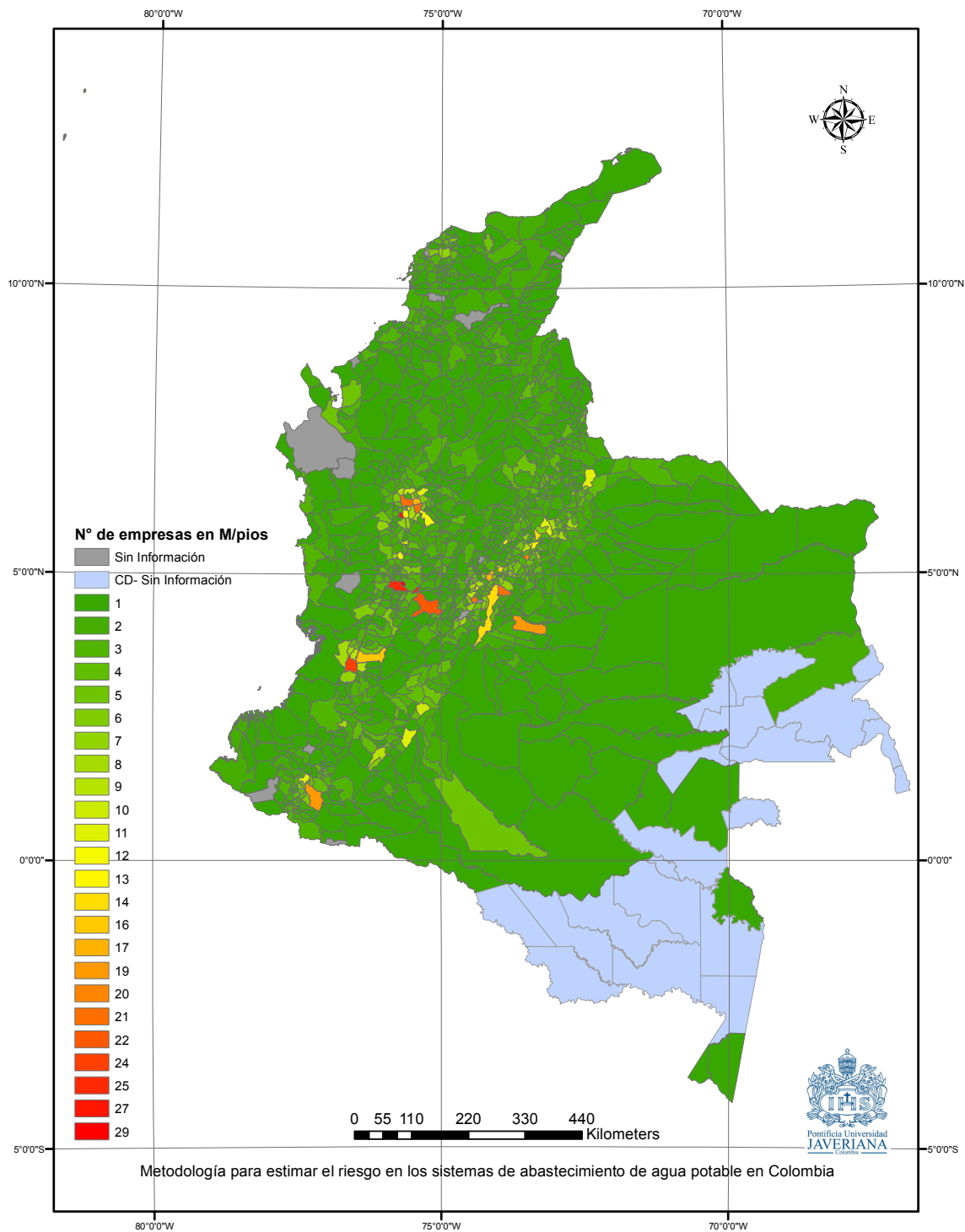


Figura 2.3: Número de empresas del servicio público de acueducto a nivel municipal

de servicios públicos y entes del sector (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2011), pero esto a su vez condujo a la robustez del sistema como ya se mencionó con anterioridad.

Ya con la información, esta fue consolidada y se realizó una revisión de la información para cada uno de los años con el propósito de identificar la carencia de algún valor para el atributo evaluado en el elemento del sistema (e.g., caudal de diseño (l/s), caudal operativo (l/s) para la línea de aducción), así mismo se verificó la consistencia de los valores reportados año a año y aquí se obtuvo cuatro consideraciones:

1. Si la información está reportada para todos los años y si existe consistencia se asumió como valor de análisis el reportado en el año 2012.
2. Si la información es consistente pero no se tienen información para todos los años se asumió como valor de análisis el último valor reportado al SUI.
3. Si entre los valores reportados no existe consistencia y la información no está disponible para todos los años se verificaba el elemento anterior y posterior para comprobar si entre estos existía consistencia y en caso de tenerla se asumió el valor del elemento anterior. En caso de que los valores de los elementos anterior y posterior no tuvieran consistencia, a partir de la estimación de la demanda de agua requerida, se realizaba una comparación con los valores de los elementos de análisis, al contrastarlos se podía concluir que la falta de simetría consistía a errores en el reporte de la unidad de medida (e.g., el caudal de operación se solicita en l/s y se reportaba en  $m^3$ ) por lo que se ajustaba el valor a la unidad de medida de análisis y se consideraba el último valor reportado.
4. En caso de no reportar valor del atributo del elemento se consideró que se debía asumir la inexistencia del valor, por lo que se dejó vacío y se clasificó como sin información.

Considerando los anteriores criterios, a continuación se desarrolla la descripción de los elementos que componen los SAAP, así mismo se aclara que la información relacionada con los tanques desarenadores no es reportada al SUI.

**Fuentes hídricas de uso en los sistemas de acueducto:** En cuanto a la información que se almacena en el formulario del SUI sobre el registro de las fuentes de uso en el abastecimiento se obtuvo que de las 2750 empresas inscritas 593 empresas (22 %) reportaron información del tipo de fuente que se emplea en los sistemas de acueducto. Estas 593 empresas se encuentran ubicadas en 597 municipios. Para el departamento del Amazonas

## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

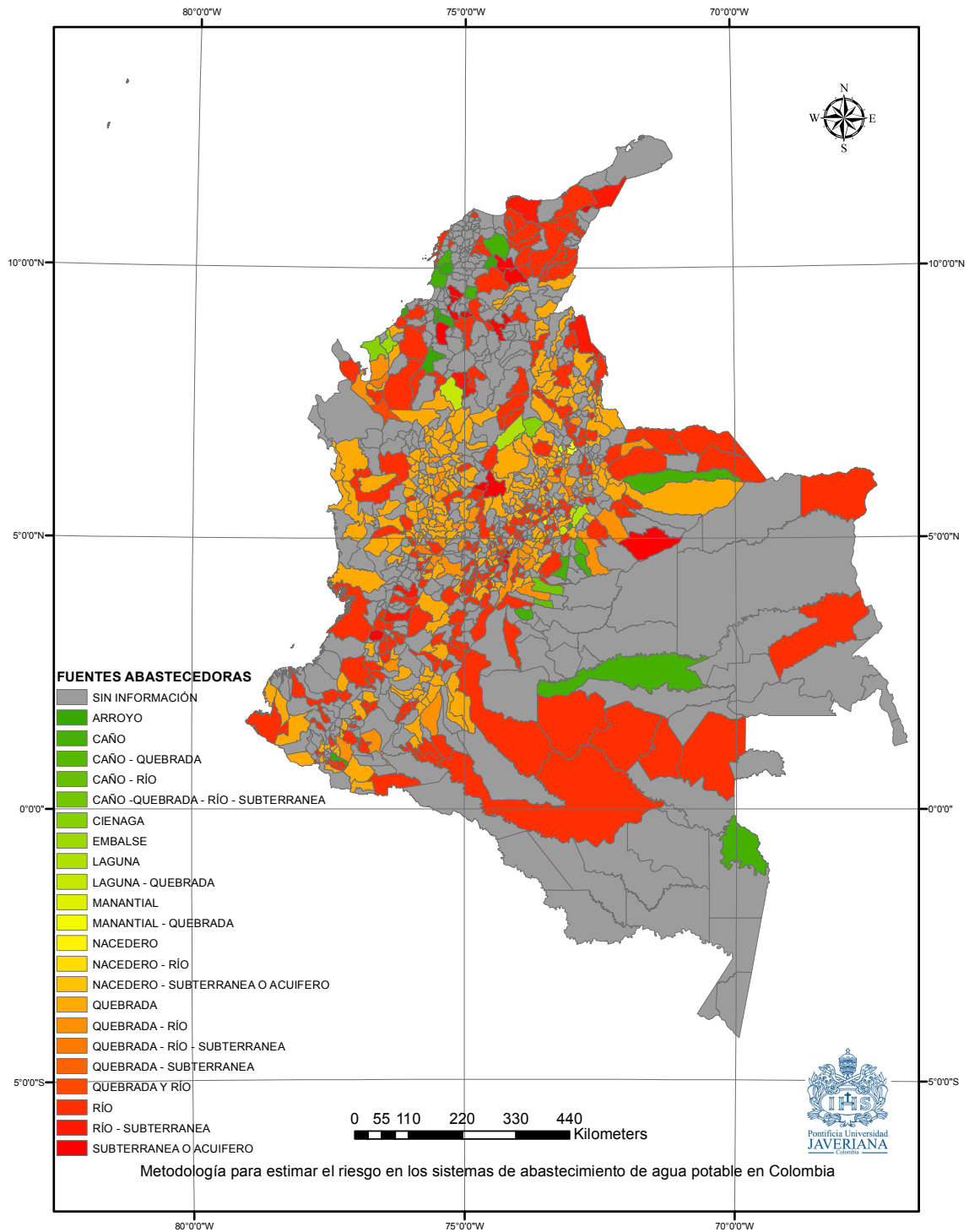


Figura 2.4: Fuentes de abastecimiento de los SAAP

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

---

no se evidenció algún registro de las fuentes empleadas.

Se aprecia la concentración de los registros en los departamentos Antioquía (185), Cundinamarca (132), Boyacá (116) y Santander (86) y con menores registros son los departamentos de Atlántico (4), Guaviare y Vaupés (3), Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (2) y Guainía y Vichada (1) Figura 2.4.

Los registros muestran que existen principalmente dos tipos de fuentes que son de uso para el abastecimiento. El 94 % corresponde a fuentes superficiales y el 6 % restante fuentes subterráneas Figura 2.5A.

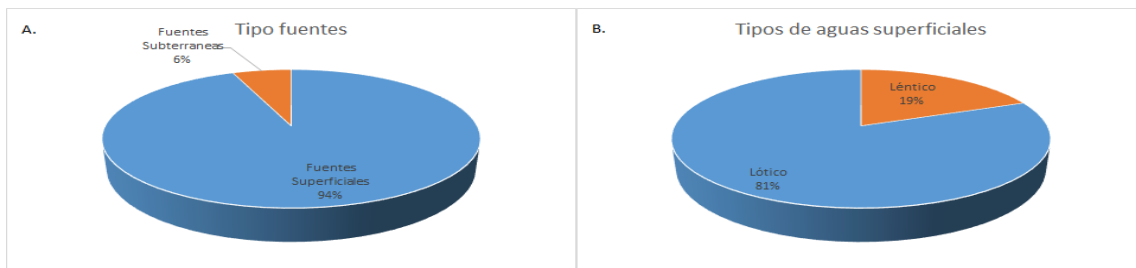


Figura 2.5: Tipo de fuentes abastecedoras

En las fuentes superficiales se distinguen dos tipos de cuerpos de agua Figura 2.5B, principalmente el 81 % de la información corresponde a los cuerpos lóticos o corrientes como son: arroyos, quebradas, manantiales, caño, nacedero y ríos y el 19 % restante a los cuerpos lénticos como son las ciénagas, los embalses y lagunas.

De los cuerpos lóticos son las quebradas y ríos los que concentran el 87.5 % de los registros. El 11 % restante corresponde a caños, manantiales, nacederos y a la combinación entre los cuerpos de agua (lénticos y lóticos). Para los cuerpos lénticos las lagunas concentran el 1 % y entre ciénagas y embalses aportan el 0.5 %.

**Captaciones de agua:** Con base en la consulta realizada a la información reportada en el SUI en el formulario de “registro de captaciones”, se evidenció que de las 2750 empresas inscritas 361 empresas (13 %) reportaron información acerca del tipo de infraestructura empleada para captar el agua cruda. Estas 361 empresas se encuentran ubicadas en 393 municipios. No se evidenció información de las empresas del departamento del Amazonas.

La concentración de los mayores registros se aprecia en los departamentos de Caldas



## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

---

(243), Antioquía (234), Boyacá (174), Cundinamarca (171) y Santander (153) y con menores registros son Vaupés (4), Sucre (3), Atlántico (2), Guainía y Vichada (1) Figura 2.6.

Se analizó la variable de caudal medio diario captado expresado en litros/segundo (l/s), encontrando que para cada uno de los diferentes tipos de captación existen diferentes valores. De manera que para homogenizar dichos valores se agrupó por municipio los diferentes tipos de componentes de captación y luego los valores de caudal fueron categorizados en 12 rangos. Esta categorización obedeció a la diversidad de valores ya que estos van desde 0.1 hasta los 15.932,21 l/s. Para ver con detalle la concentración de los caudales captados, estos son los rangos establecidos: 0-5, 5.1-10, 10.1-20, 20.1-30, 30.1-40, 40.1-50, 50.1-100, 100.1-500, 500.1-1000, 1000.1-5000, 5000.1-10000, y >10000 l/s.

Así mismo, se adelantó el análisis entre el caudal captado y el número de prestadores que se encuentran en los diferentes rangos, el resultado se puede evidenciar en la Figura 2.7. En esta se observa que la mayor concentración de empresas se encuentra en los rangos 0-5, 100.1-500, 50.1-100, 20.1-30 con 278 empresas lo que representa el 70 %, de la 361. Principalmente se encuentran ubicadas en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Antioquía y Valle del Cauca.

Para el rango de caudal captado entre 1000.1-5000 l/s se encuentran ciudades intermedias como: Ibagué, Manizales, Cúcuta, Cartagena, Valledupar. Entre el rango de 5000.1-10000 l/s se ubican las principales ciudades del país: Barranquilla, Medellín, Santiago de Cali y Pereira. Para el caso de Bogotá se registra un valor superior a 10000 l/s el cual representa el 0.3 %.

Con base en lo anterior, se observa una relación proporcional entre el tamaño de la población de cada municipio y los valores de los caudales medios diarios captados, ya que entre mayor es el número de habitantes de un municipio mayor será el caudal que requiere ser captado y si menor es la población en un municipio será menor el agua captada (e.g., el municipio de Bituima Cundinamarca para el 2013 su población es de 2554 habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2005) el caudal medio diario que capta es de 4.93 l/s y para el caso de la ciudad de Bogotá su población es de 7674366 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2005) y registra un valor mayor a los 10000 l/s captados).

También se evidenció que algunos datos de caudal requerían una revisión detallada. A manera de ejemplo, el municipio de Restrepo ubicado en el departamento del Meta registró un caudal medio captado mayor a 10000 l/s, comparativamente mayor a ciudades como

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

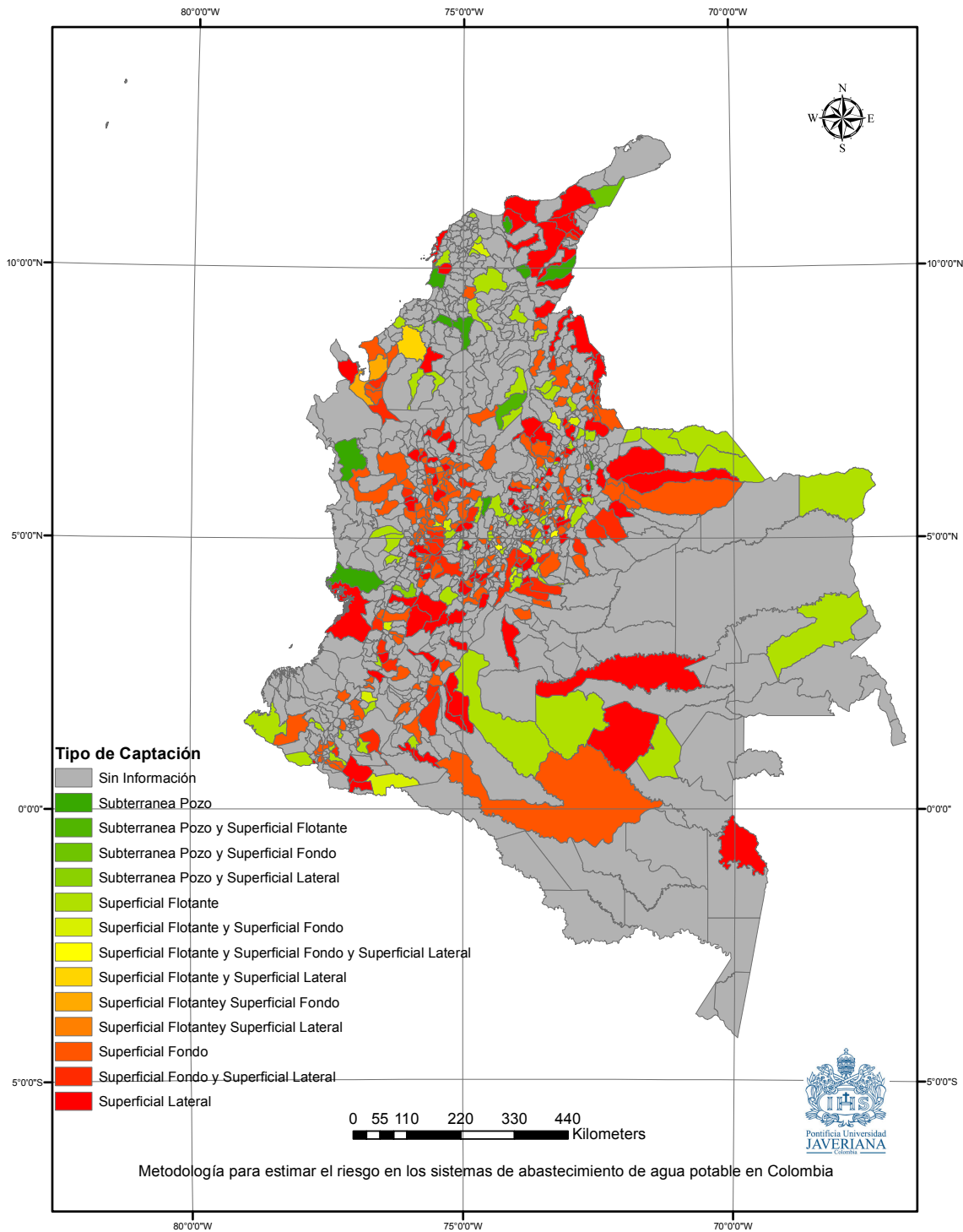


Figura 2.6: Descripción del tipo de captaciones

## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

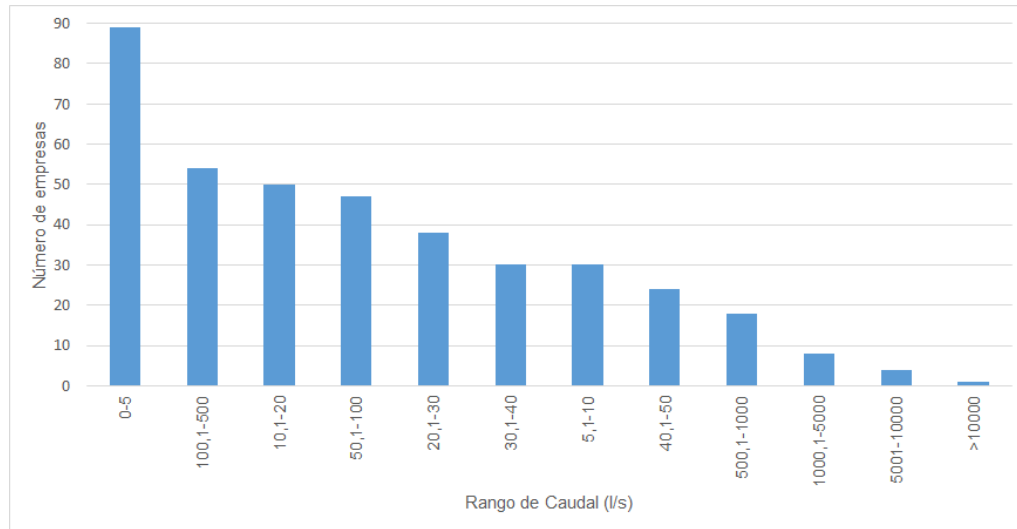


Figura 2.7: Relación entre el número de empresas y el rango de caudales captados

Barranquilla y Medellín. Este valor llama la atención ya que en el municipio se estima para 2013 una población total de 7294 habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2005), por lo que se verificó los reportes de años anteriores en el SUI encontrando que solo tiene reportada la información del caudal captada para el año 2006 y el valor que registró fue de 67.47 l/s, valor que es mucho más consistente al reportado para el año 2012. Por tanto, tal y como se mencionó en el numeral 2.2.1.1 fue asumido como caudal medio captado 67.47 l/s, considerando que este valor es más confiable en relación con el tamaño de la población del municipio.

Al igual que el ejemplo anterior la ciudad de Bucaramanga registró para el año 2012 el caudal medio captado de 834 l/s, verificando años anteriores para el año 2008 se reportó un caudal medio captado correspondiente a 2298 l/s, por lo que se consideró este último valor para el análisis ya que dicha cifra se acerca a los cálculos reales relacionados con la dotación promedio.

Es importante resaltar que los registros del formulario de captaciones de agua disponibles en el SUI, en muchos de los casos no siguen una trazabilidad (i.e., no siempre se cuenta con reporte de información año tras año por las empresas), lo que hace que no existan datos para una serie de años, en otros casos solo se cuenta con la información del registro del componente o en algunas oportunidades se desconozcan ambos valores.

**Aducciones de agua:** En esta sección es importante mencionar que los conductos de aducción pueden tener diferentes características técnicas, las cuales dependen principal-

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

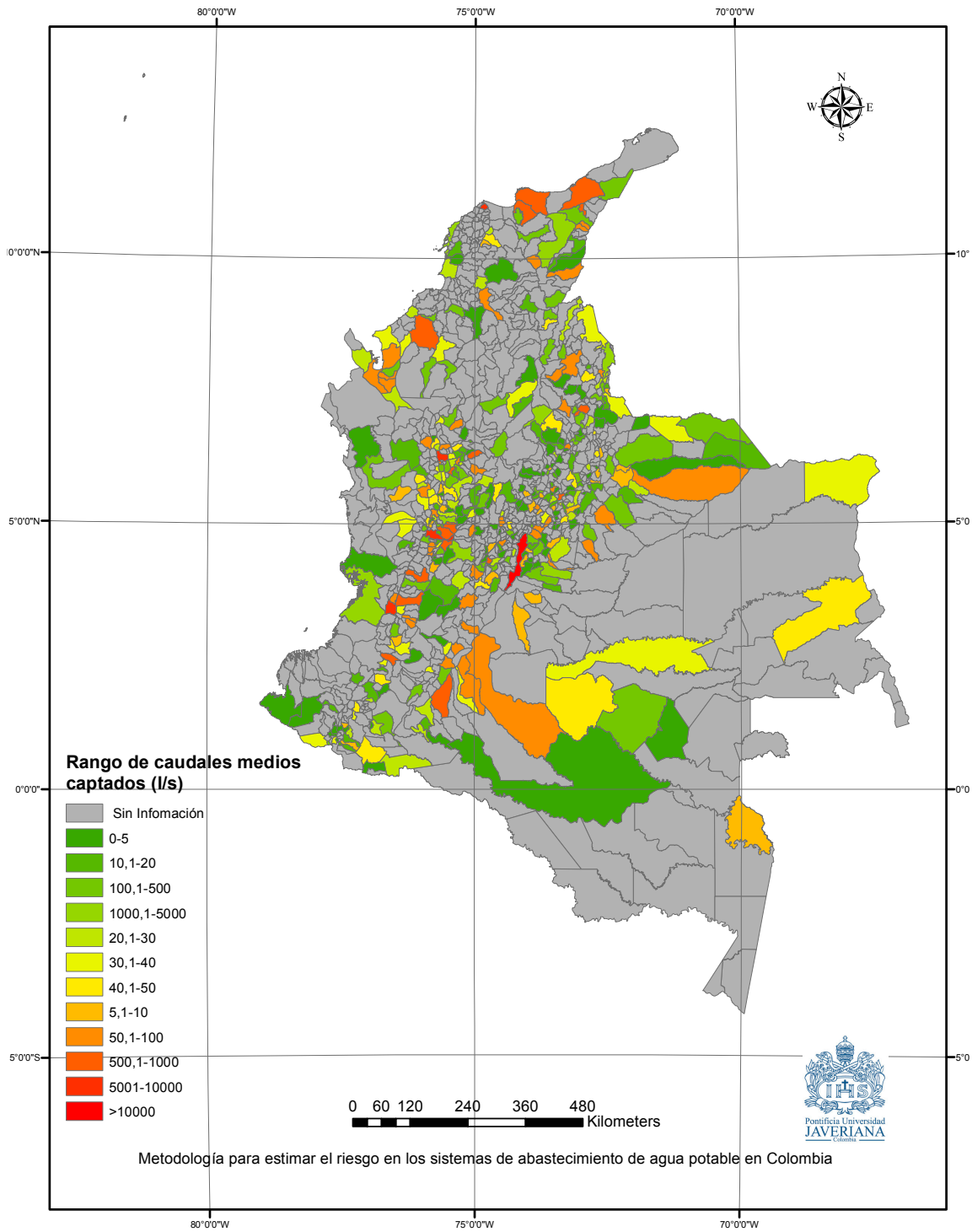


Figura 2.8: Rango de caudales medios captados (l/s)

## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

---

mente de:

- Clase de ducto. Cuyas características pueden ser abierto (canal) o cerrado (tubería) previamente realizado en análisis hidráulico.
- Longitud. Considerando las características de la fuente y la ubicación del sistema de potabilización dependerá su longitud.
- Naturaleza de la fuente abastecedora. Dependiendo del tipo de fuente si esta es superficial o subterránea se define su presencia.
- Topografía del terreno. Determina si el transporte de agua cruda se realiza por gravedad o requiere equipos de impulsión.

Cada uno de estos atributos se precisan en los diseños de los sistemas de acueducto, a partir de estos también se determina el número de líneas de aducción las cuales va a obedecer con el número de habitantes, nivel de complejidad, número de fuentes, consumos históricos, entre otros.

Con respecto al análisis de los conductos de aducción, 432 empresas reportaron en el SUI el formulario “Registro de aducciones de agua”. Este número representa el 16 % del total de la empresas registradas (2750). Este formulario identifica con un número único las diferentes aducciones con las que cuentan las empresas. Con base en las consulta se encontró que se reportan 971 elementos estructurales diferentes, un ejemplo de ello son: la Empresa de Obras Sanitarias de Caldas S.A. E.S.P reportó 39 líneas de aducción, Empresas Públicas de Medellín E.S.P. reportó con 20 líneas y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.S.P con 10 líneas de aducción, este número de conductos puede obedecer a varias consideraciones: no dependen de una única fuente de abastecimiento o que su actividad es desarrollada en varios municipios.

En cuanto a las características físicas de los conductos de aducción, el tipo de componente con mayor número de registros es la tubería con 916. De estos los conductos a flujo libre registran una mayor frecuencia: tubería por gravedad con 667 registros, seguido del canal abierto (21) y canal cerrado por gravedad (26) y en menor proporción se encuentran los conductos de flujo a presión: tubería por bombeo con 243 y la tubería por rebombeo (6).

Los departamentos de Antioquía, Cundinamarca y Boyacá concentran los mayores registros 146, 114 y 103, respectivamente. La Figura 2.9 muestra la distribución de los diferentes tipos de conductos de aducción a nivel municipal. Llama la atención que 656 municipios no registran datos relacionados con el tipo de elemento estructural empleado para el transporte

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

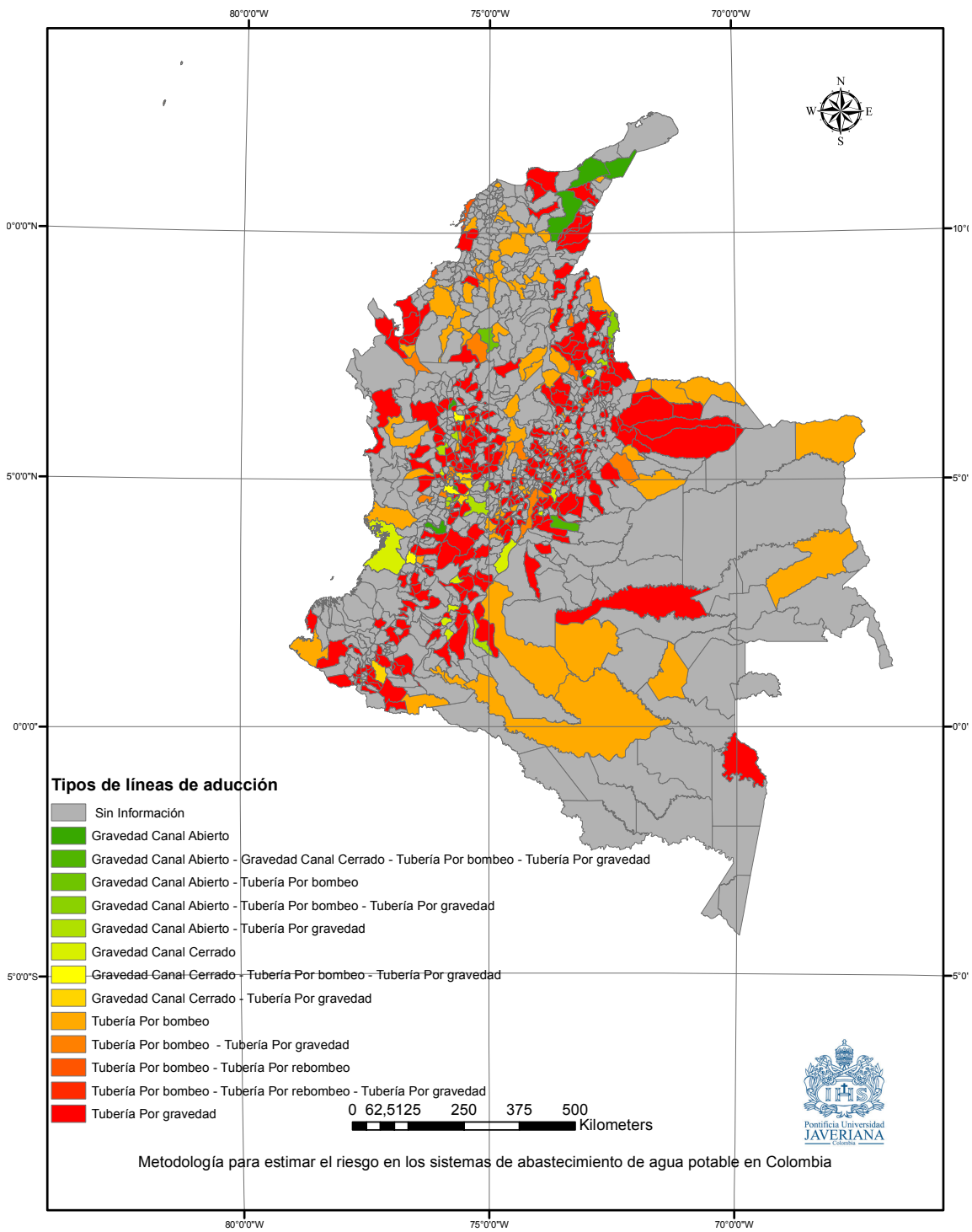


Figura 2.9: Tipos de aducciones de agua

## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

de agua cruda.

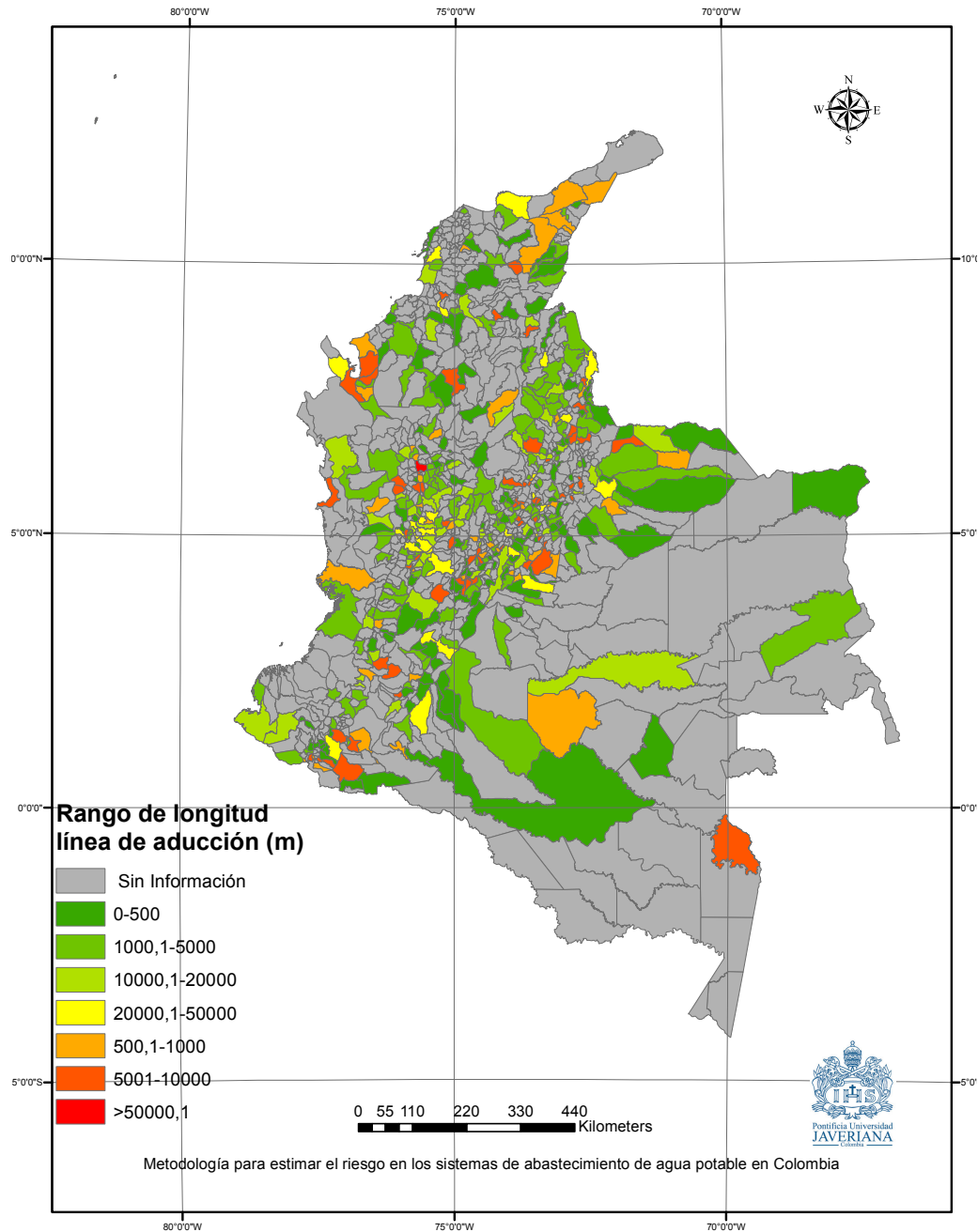


Figura 2.10: Rangos de longitud líneas de aducción de agua

Se analizó la variable longitud de la línea de aducción expresada en metros (m). Se encontró que existen 963 valores diferentes. Considerando esta diferencia de valores se realizó una clasificación y fueron agrupados en 7 rangos los cuales comprenden las siguientes lon-

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

---

gitudes (m): 0-500, 500.1-1000, 1000.1-5000, 5001-10000, 10000.1-20000, 20000.1-50000 y >50000. La Figura 2.10 representa su ubicación.

La Tabla 2.1 se muestra que la mayor concentración está en los rangos: 1000,1-5000 y 0-500 con 149 y 121 municipios, respectivamente. Para el caso de la longitud >50000 metros solo se identificó a la ciudad de Medellín.

Rango de longitud (m)	Número de municipios
1000,1-5000	149
0-500	121
5001-10000	64
10000,1-20000	50
500,1-1000	45
20000,1-50000	28
>50000	1

Tabla 2.1: Relación longitud de aducción y número de municipios

Otra variable que registra el formulario “Registro de aducciones de agua” y que permite conocer las características físicas de los conductos de aducción es el tipo de material. El SUI reconoce 11 tipos. Las empresas seleccionan que tipo de material tienen en sus líneas, Este formulario permite realizar diferentes combinaciones entre los distintos tipos (e.g., PVC y Asbesto cemento). Cada vez que se realiza el registro de un conducto, el formulario solicita su ubicación. La Tabla 2.2 muestran los principales materiales reportados y señalan el número de municipios que tienen este tipo de material. Entre ellos sobresalen: cloruro de polivinilo (PVC) y asbesto cemento (AC) con 235 y 57 registros respectivamente. Llama la atención que la combinación entre estos dos tipos de materiales ocupa el tercer lugar con 39 registros.

Adicionalmente a los valores mostrados en la Tabla 2.2 se presentan más de 45 combinaciones entre los diferentes materiales (e.g. combinación entre American pipe, Cloruro de polivinilo(PVC) y Polietileno(PE) o entre Acero(A), Asbesto cemento(AC), Cloruro de polivinilo (PVC), Concreto cilindro acero(CCP) y Hierro dúctil), estas combinaciones se ubican en 59 municipios y representan el 13 %.

**Plantas de potabilización:** A partir del formulario “Registro de plantas de potabilización” del SUI, se encontró un total de 536 registros relacionados con sistemas para el tratamiento de agua. Estos registros corresponden a 272 empresas, las cuales se encuentran ubicadas en 461 municipios Figura 2.11. Las 272 empresas representan el 10 % de las 2750



## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

---

Material	Número de municipio
Cloruro de polivinilo (PVC)	235
Asbesto cemento (AC)	57
Combinación entre AC y PVC	39
Hierro fundido (HF)	11
Hierro galvanizado (HG)	11
Concreto reforzado (CR)	9
Acero (A)	7
Combinación entre A y PVC	5
Combinación entre PVC y CR	5
Polietileno (PE)	5
Hierro dúctil	3
American pipe	2
Fibra de vidrio	2

Tabla 2.2: Relación materiales líneas de aducción con el número de municipios

empresas registradas en el SUI.

Para los restantes 640 municipios no se encuentran registros en el SUI del tipo de sistema que emplean para el tratamiento de agua, esto no necesariamente significaría la carencia de alguna infraestructura para la potabilización sino que entre unas de posibles carencias de información puede obedecer a la falta de información técnica de los sistemas para su reporte (e.g., caudales de diseño, fecha de construcción, número de horas de operación) que imposibilitaría el diligenciamiento, tal y como se mencionó en el capítulo 1.

La relación entre el número de sistemas de potabilización y el número de municipios para este caso no es 1 a 1, ya que existen para un municipio varios sistemas de potabilización (e.g., municipio de Andes - Antioquía registra dos sistemas de potabilización “PTAP La Palmera y PTAP Maria Auxiliadora”).

La Figura 2.11 muestra que gran parte de los municipios ubicados sobre las regiones Pacífica, Amazonía y Orinoquía no registran información relacionada con los sistemas de potabilización. Las principales ciudades como Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla, así como ciudades intermedias Cúcuta, Bucaramanga, Manizales, Ibagué, Pasto entre otras registran uno o varios sistemas de potabilización.

A partir de la capacidad hidráulica y los caudales de operación se analizó la capacidad de uso de los sistemas de potabilización. Para lo cual a través de 11 rangos se determinó la capacidad de uso de las plantas de potabilización así: 0-5, 5-10, 11-20, 20-30, 30-40, 40-50,

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

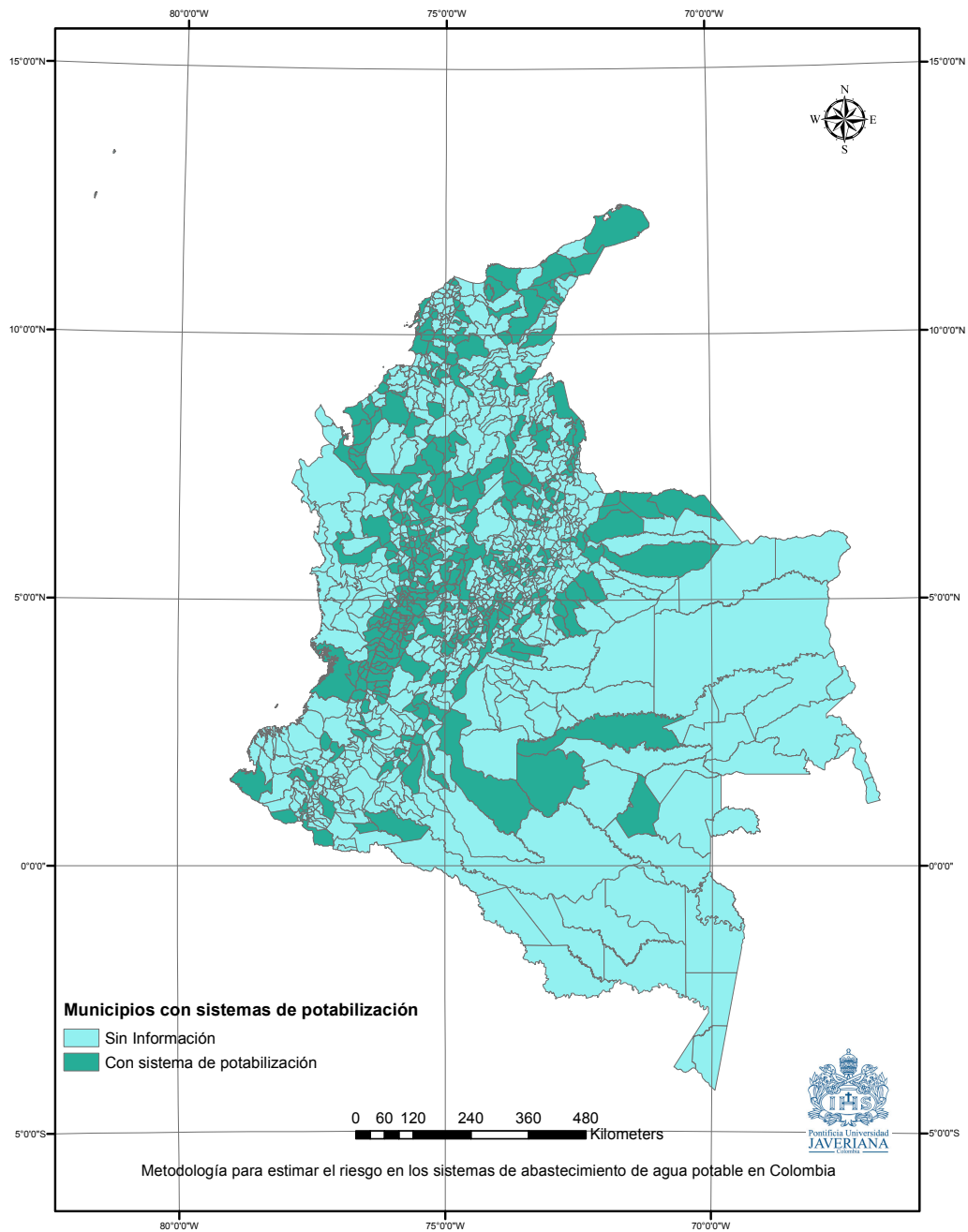


Figura 2.11: Sistemas para el tratamiento de agua

60-70, 70-80, 80-90, 90-100, mayor al 100 %.

En la Figura 2.12 se representa porcentualmente la capacidad de uso para los 461 municipios que registran sistema de potabilización.

Cuando la capacidad de uso de los sistemas de potabilización alcanza el 70 % se debe

## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

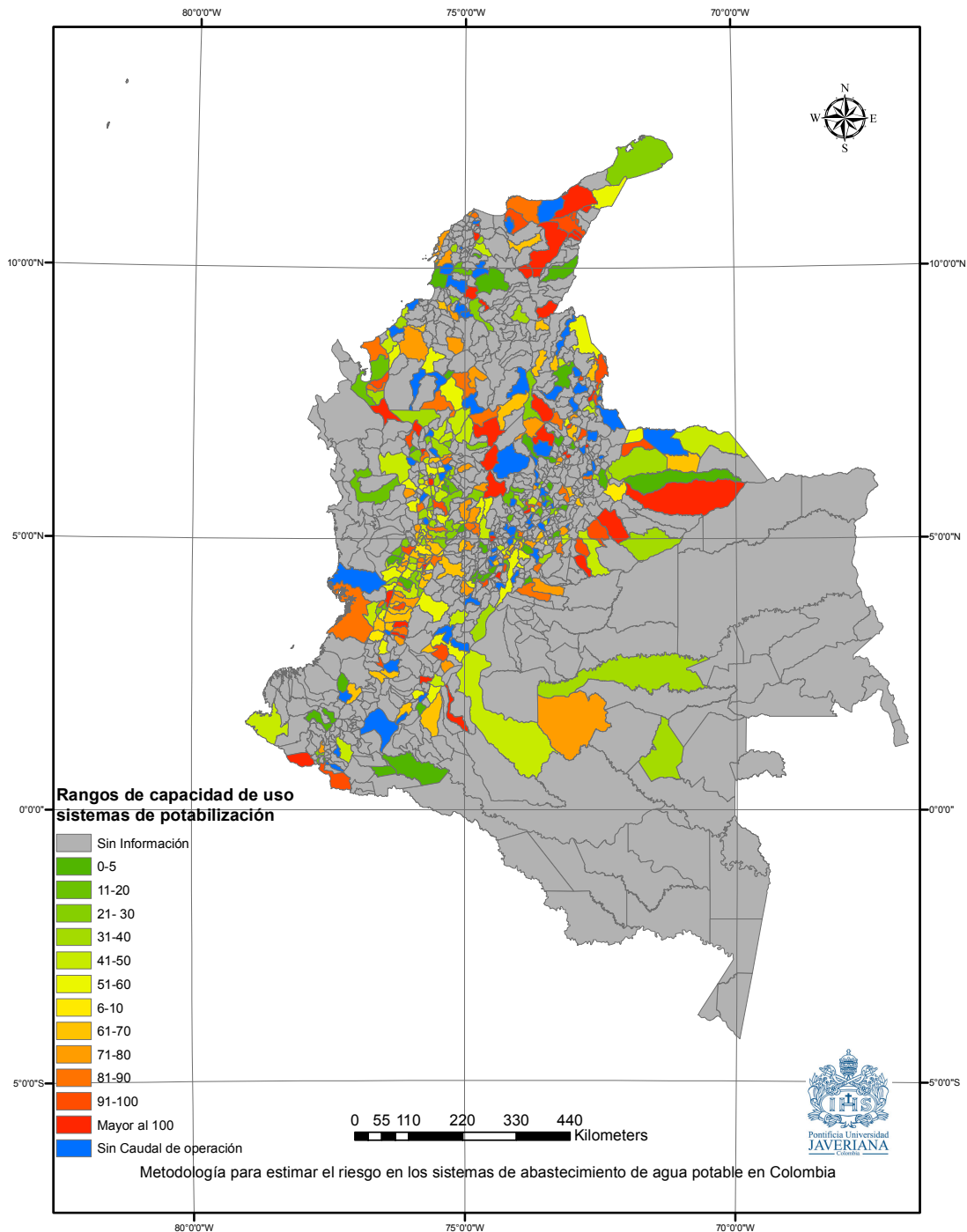


Figura 2.12: Capacidad de utilización de los sistemas de tratamiento de agua

considerar dentro del planeamiento técnico y financiero el desarrollo de diferentes alternativas para satisfacer una demanda futura (e.g., optimización, nuevos sistemas). Como se observa en la Figura 2.12 algunos municipios fue superada la capacidad de uso y en otros

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

---

Número de municipios	Capacidad de uso (%)	Participación (%)
40	Mayor a 100	9
24	91-100	5
28	81-90	6
37	71-80	8
46	61-70	10

Tabla 2.3: Relación entre el número de municipios y capacidad de uso

se encuentra cercana al horizonte de diseño. Desde esta perspectiva y bajo las actuales condiciones de operación la posibilidad de que un sistema falle se acrecienta, considerando que se pueden ir presentando cambios (e.g., reducción de los tiempos de retención hidráulica, se afecta la calidad de agua tratada) en su funcionamiento. Particularmente las fallas estarían asociadas a las demandas impuestas sobre el elemento toda vez que sobrepasan su capacidad.

La Tabla 2.3 identifica el número de municipios que han superado la capacidad de diseño.

**Conducción de agua tratada:** Conforme con el formulario “Registro conducciones de agua” el cual almacena la información acerca de los conductos empleados para el transporte de agua tratada o potable, se encontró que 321 empresas de las 2750 registradas han reportado la información referente a las características de este componente, esto representa el 12 %. Dichas empresas se encuentran ubicadas en 407 municipios de los 1123 existentes.

Este formulario permite a través de un número único identificar las diferentes líneas de conducción de agua que tienen las empresas. Captura información relacionada con los tipos de conducción (e.g., tubería por gravedad, por bombeo, rebombeo, canal abierto, canal cerrado), el tipo de material (e.g., asbesto cemento (AC), acero, -(CCP), concreto reforzado, fibra de vidrio) y admite combinaciones entre el tipo de conducción y material. Con base en la información reportada por las 321 empresas la Figura 2.13, muestra a escala municipal los tipos de elementos estructurales y sus diferentes combinaciones.

A partir del registro de los tipos de conducción y mediante un análisis de frecuencia, se obtuvo la Tabla 2.4. En ella se observa cual elemento estructural es el más empleado por las empresas para el transporte de agua.

La Tabla 2.5 identifica el número de líneas conducción con las que cuentan las empresas. En esta, el 45 % de las empresas cuentan con más de un elemento estructural para la conducción de agua.

## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

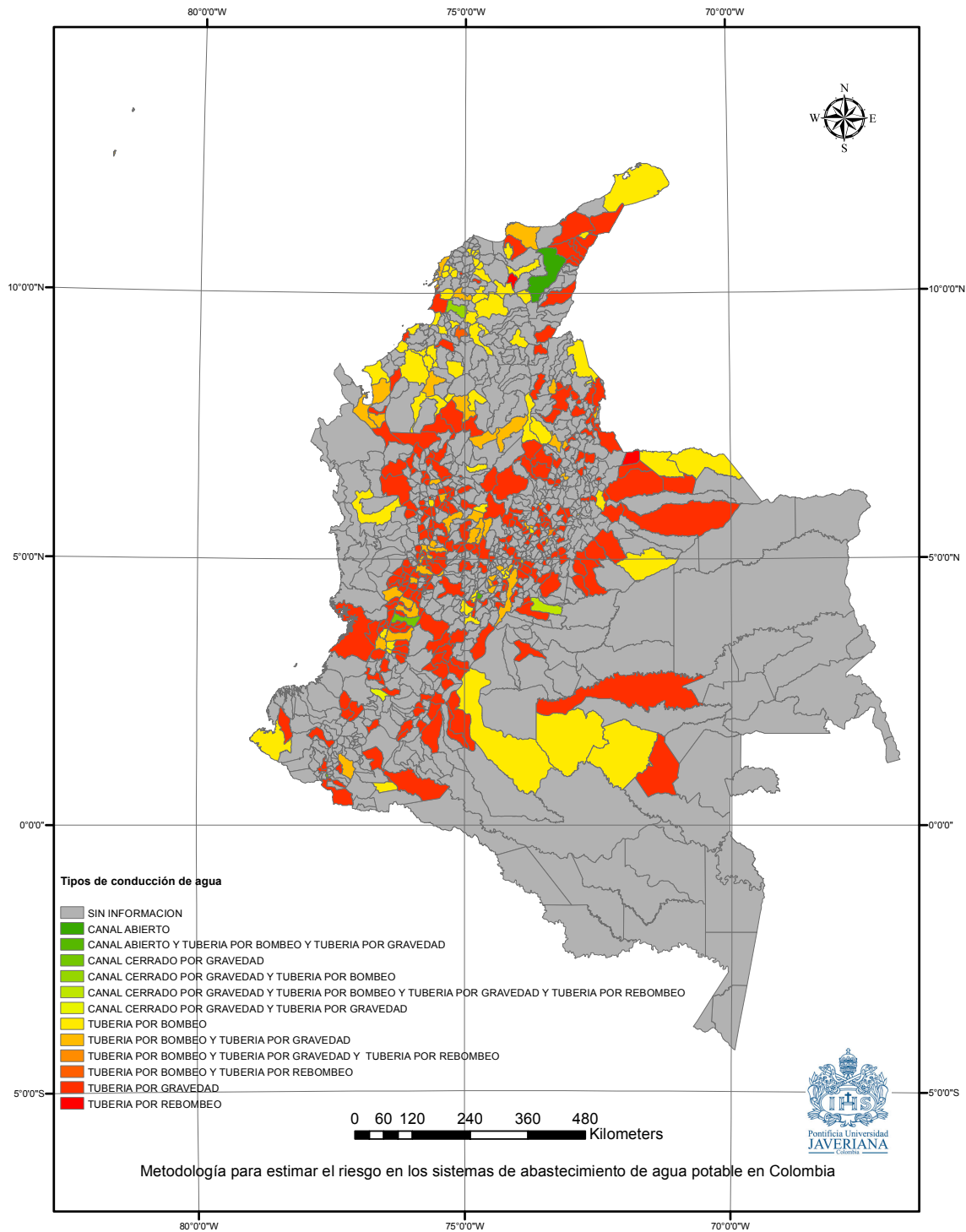


Figura 2.13: Tipos de conducción de agua

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

---

Tipo de infraestructura	N° de registros
Canal Abierto	2
Canal cerrado por gravedad	6
Tubería por bombeo	254
Tubería por gravedad	809
Tubería por Rebombeo	9
<b>TOTAL</b>	<b>1079</b>

Tabla 2.4: Frecuencias del tipo de conducción más empleado

Número de líneas de conducción	Número de empresas
1	17
2	47
3	33
4	15
5	13
6	8
7	5
8	4
9,13	3
10, 15	2
11, 19, 20,21, 24, 26, 35, 67, 130	1

Tabla 2.5: Número de líneas de conducción por empresa

Se puede observar que entre mayor número de la líneas de conducción, es menor el número de empresas que registran esa cantidad (e.g., Empresas Públicas de Medellín registra 130 líneas de conducción, esto obedece a que dicha empresa tiene en su área de prestación 10 municipios de Antioquía. Mientras que la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Campoalegre que desarrolla su actividad en el municipio Campoalegre - Huila registra solo una línea de conducción). Por consiguiente, entre más alto sea el nivel de complejidad de las empresas, mayores serán las infraestructuras utilizadas para el transporte de agua tratada.

El material de las líneas de conducción, se consideró como otra variable de análisis. A partir del registro de los tipos materiales se realizó un análisis de frecuencia el uso del material. La Tabla 2.6, muestra que los materiales predominantes con los que se encuentran construidas las líneas son el PVC y el Asbesto cemento (AC), los cuales concentran el 70 % de los registros. Con el 20 % se encuentran el Concreto cilindro acero (CCP), Acero (A) y Hierro dúctil (HD).

## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

---

Material	N° de Registros
Acero (A)	49
American pipe	18
Asbesto cemento (AC)	235
Cloruro de polivinilo (PVC)	512
Concreto cilindro acero (CCP)	99
Concreto reforzado (CCP)	11
Fibra de vidrio	10
Hierro dúctil (HD)	76
Hierro fundido (HF)	31
Hierro galvanizado (HG)	21
PAD	5
Polietileno (PE)	10
Sin información	2
<b>TOTAL</b>	<b>1079</b>

Tabla 2.6: Material líneas de conducción

Como se había mencionado existen diferentes combinaciones de las características físicas de las líneas de conducción en cuanto a sus materiales, de manera que, con base en la información reportada en esta variable por parte de las empresas y para distinguir un poco mejor la distribución de los tipos de materiales, la Figura 2.14 representa la agrupación de los tipos de materiales por municipio. En esta se detalla la existencia de municipios que solo cuentan con un material y otros con la combinación de varios materiales.

Otra característica de análisis es la longitud de las líneas de conducción. Conforme con el formulario de “registro de conducciones” se expresa en metros lineales (m). Esta variable se agrupó en 8 rangos de longitud: 0-100, 101-500, 501-1000, 1001-5000, 5001-10000, 10001-20000, 20001-30000 y mayor a 30000 metros y se representaron en la Figura 2.15.

El resultado del análisis indicó que 90 % de los 407 municipios cuentan con una longitud de las líneas de conducción entre 1-100 metros, el 3 % se encuentra entre 1001-5000 metros y con 2 % entre 500 y 1000 metros.

**Red de distribución:** A partir de la información reportada al SUI, se evidenció que 135 municipios reportaron información. Esto equivale a 140 empresas de 2750 lo que representa el 5%. El formulario de registro de redes de distribución captura lo referente a la longitud y tipo de infraestructura (tubería y área transversal). La Tabla 2.7 muestra la frecuencia de registros.

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

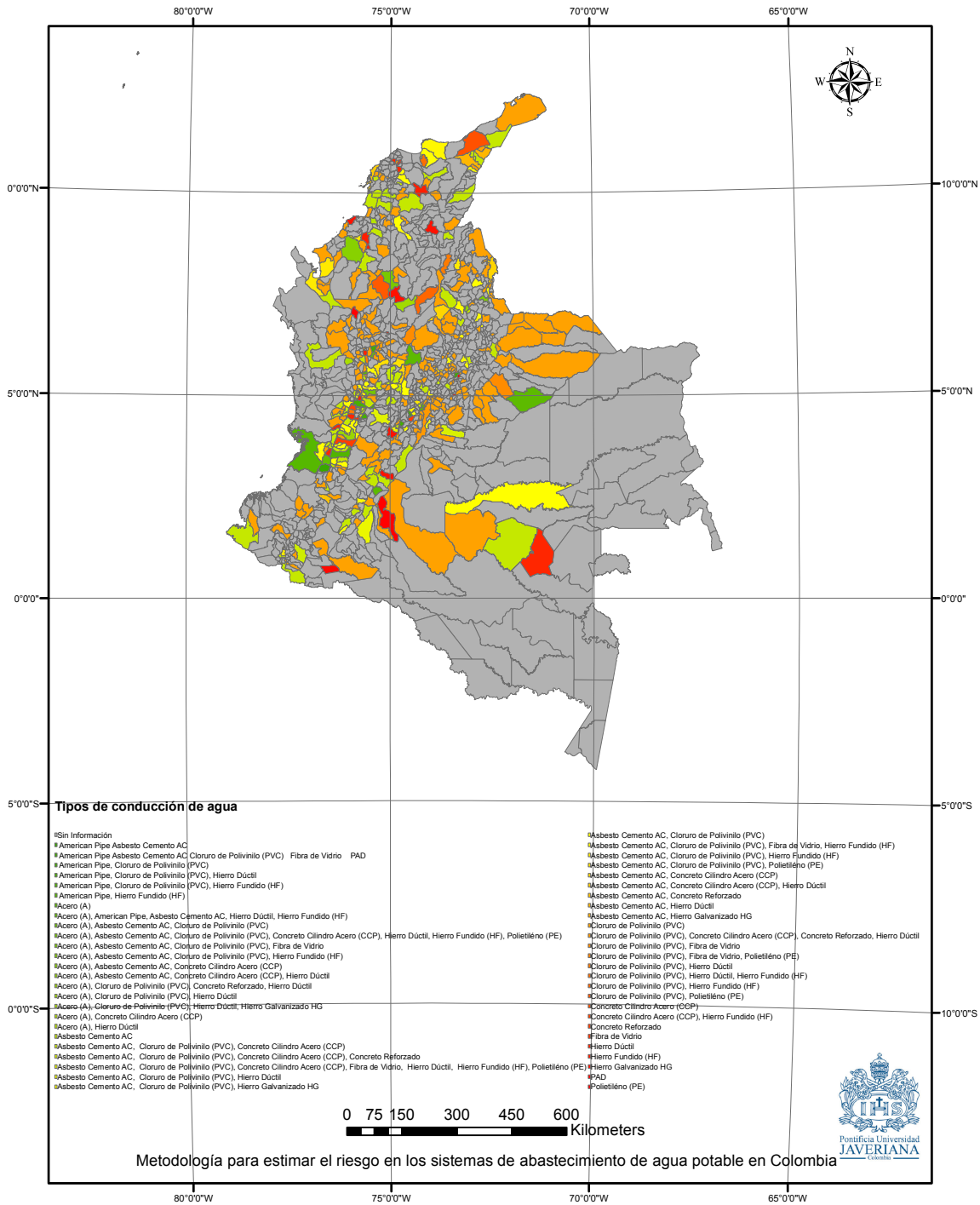


Figura 2.14: Materiales empleados en las líneas de conducción



## 2.2. REGISTRO DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -SAAP EN COLOMBIA

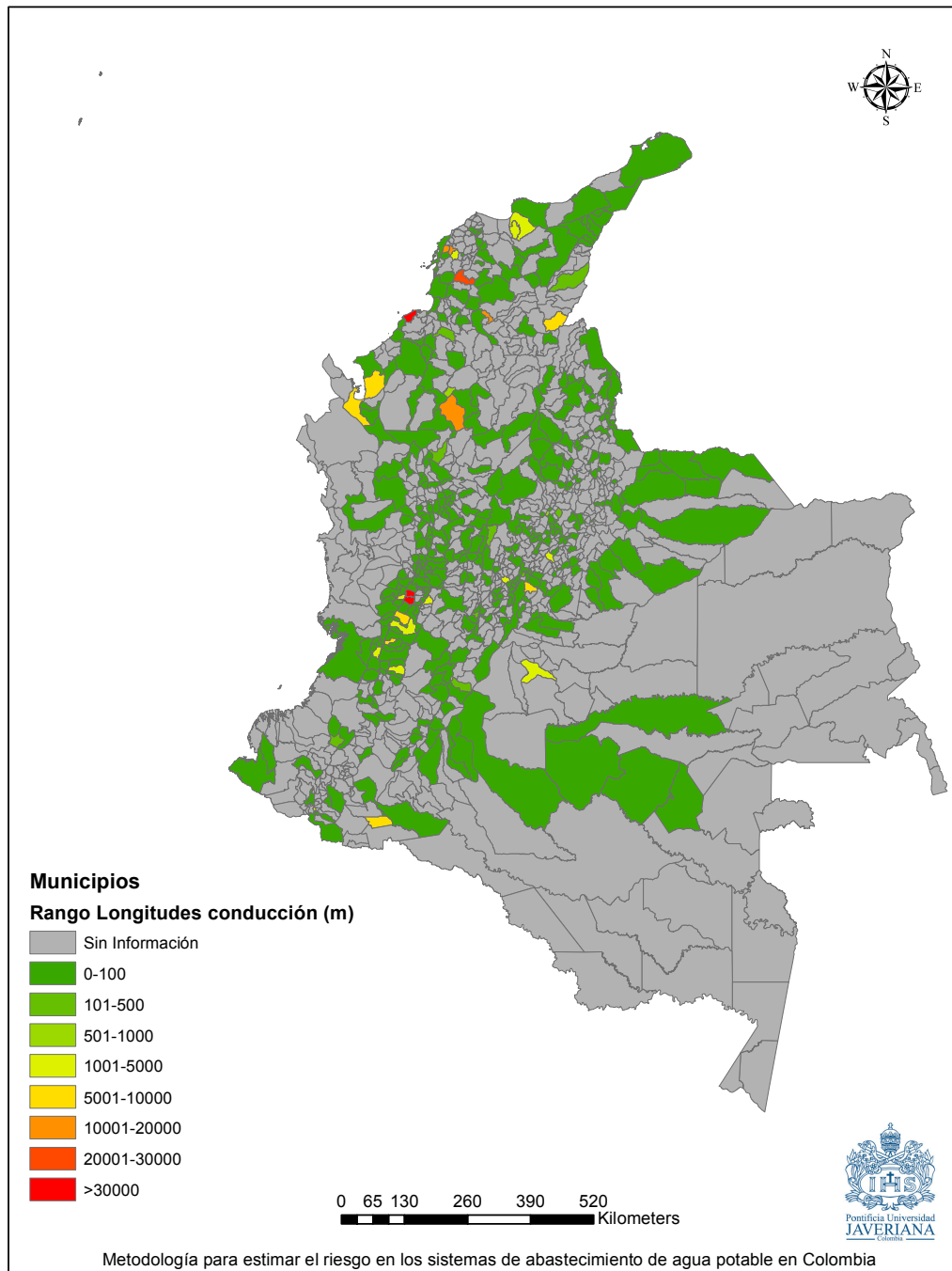


Figura 2.15: Rango de longitudes líneas de conducción

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

Sección transversal	N° de Registros
Área sección transversal	107
Diámetro nominal	413
<b>TOTAL</b>	<b>520</b>

Tabla 2.7: Tipo de sección redes de distribución

En cuanto a la longitud de las redes de distribución la Figura 2.16 muestra los diferentes rangos de longitud en metros lineales.

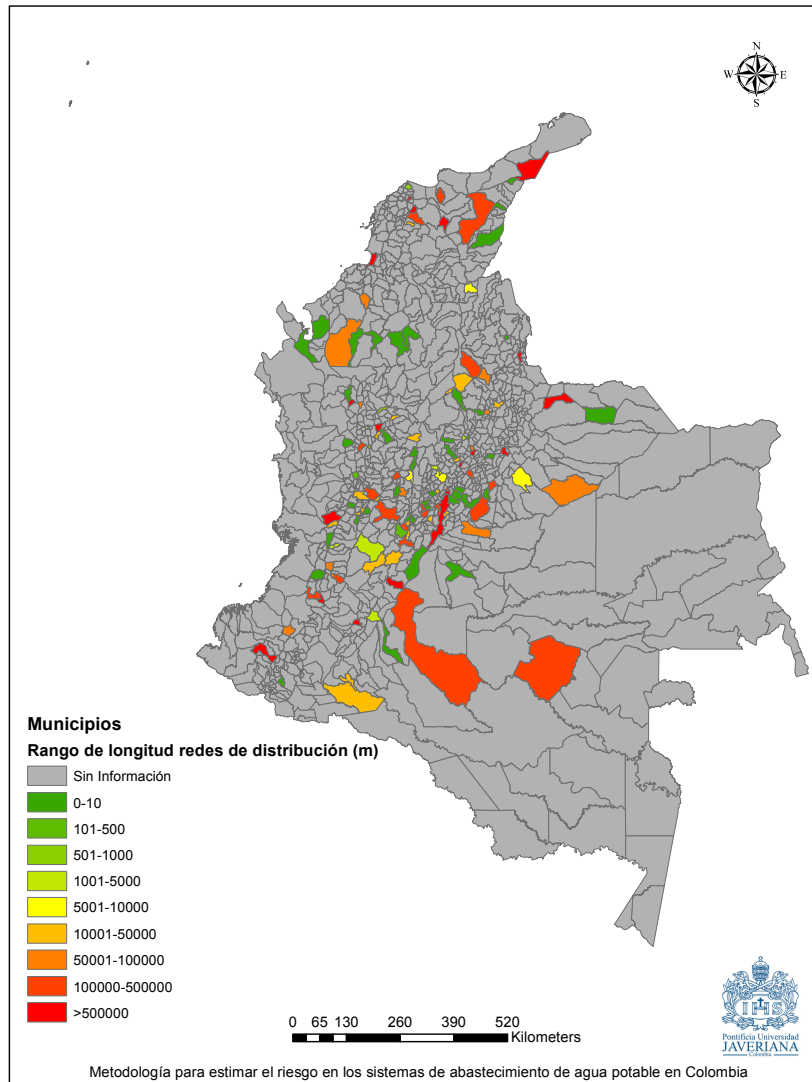


Figura 2.16: Rango de longitudes redes de distribución

### 2.3. Análisis de la información

En la sección anterior se adelantó la descripción de los atributos para cada uno de los elementos de los SAAP. En este apartado se pretende realizar un análisis del comportamiento en conjunto de los sistemas de abastecimiento, para lo cual se deben contemplar las siguientes consideraciones:

- La estructura de los SAAP, está definida por la relación y sucesión de elementos organizados que lo componen, dicha relación hace que el comportamiento de los sistemas de abastecimiento se asemeje a sistemas lineales o en serie. Según Sanchez-Silva (2005) los sistemas en serie se encuentran organizados en forma de cadena, así que la falla de un elemento ocasiona la falla del todo el sistema.
- Los SAAP se clasifican como sistemas abiertos, ya que los elementos estructurales de los SAAP permiten el intercambio de información con el exterior (su entorno) y a su vez desarrollan funciones internas (e.g., elemento de captación).

Bajo la anteriores consideraciones, la Tabla 2.8 muestra por cada componente de los sistemas de abastecimiento el número de municipios y empresas que han reportado la información al SUI. Adicionalmente se identifica la participación frente al total de municipios de Colombia (1123) y al número de empresas que registraron información (2750).

Componente	N° de Municipios	Participación	N° de Empresas	Participación
Fuentes de abastecimiento	597	54 %	593	13 %
Captaciones	393	36 %	361	13 %
Aducciones	452	41 %	432	16 %
Sistemas de potabilización	427	39 %	272	10 %
Red de distribución	132	11 %	140	5 %

Tabla 2.8: Resumen del reporte de información por componente

Adicionalmente la Tabla 2.8 muestra la participación en el reporte de la información técnica y operativa por parte de las empresas encargadas de realizar la prestación del servicio de acueducto. Esta contribución representa el 11 % de las 2750 empresas, porcentaje bajo considerando que no se tiene un panorama completo de la actual operación de los SAAP en Colombia. Además la falta de información de los sistemas de abastecimiento impide

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

---

el conocimiento y comportamiento del mismo tanto en situaciones regulares de operación como en situaciones contingentes.

La Figura 2.17 representa el número de municipios que han reportado información correspondiente a los elementos que componen los SAAP. En esta, se distinguen 405 municipios que no han realizado el registro de algún elemento estructural y 718 municipios cuentan con alguna información de por lo menos 1 elemento del sistema de abastecimiento.

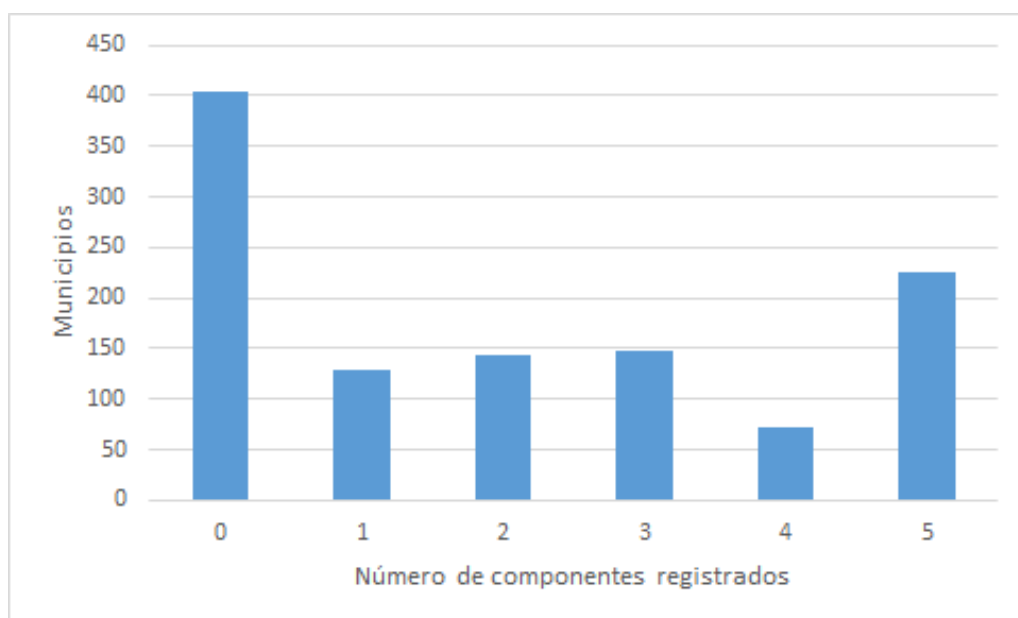


Figura 2.17: Número de municipios que han reportado información relacionada con los elementos que componen los SAAP

La Figura 2.18 identifica a escala municipal el número de elementos de los SAAP que han sido reportados en el SUI.

Una vez identificados los municipios que habían reportado información de los elementos estructurales de los SAAP y considerando las diferencias entre el número de municipios que han reportado información para cada elemento (e.g. fuentes de abastecimiento 597 municipios y captación 393. Columna 1 Tabla 2.8), se quiso verificar que los valores reportados a partir de la información de cada elemento fuera semejante y coherente considerando el número de habitante.

Este análisis, permitió identificar cuáles y el número de los municipios que habían registrado de forma consecutiva los elementos que componen los SAAP, como también verificar

### 2.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

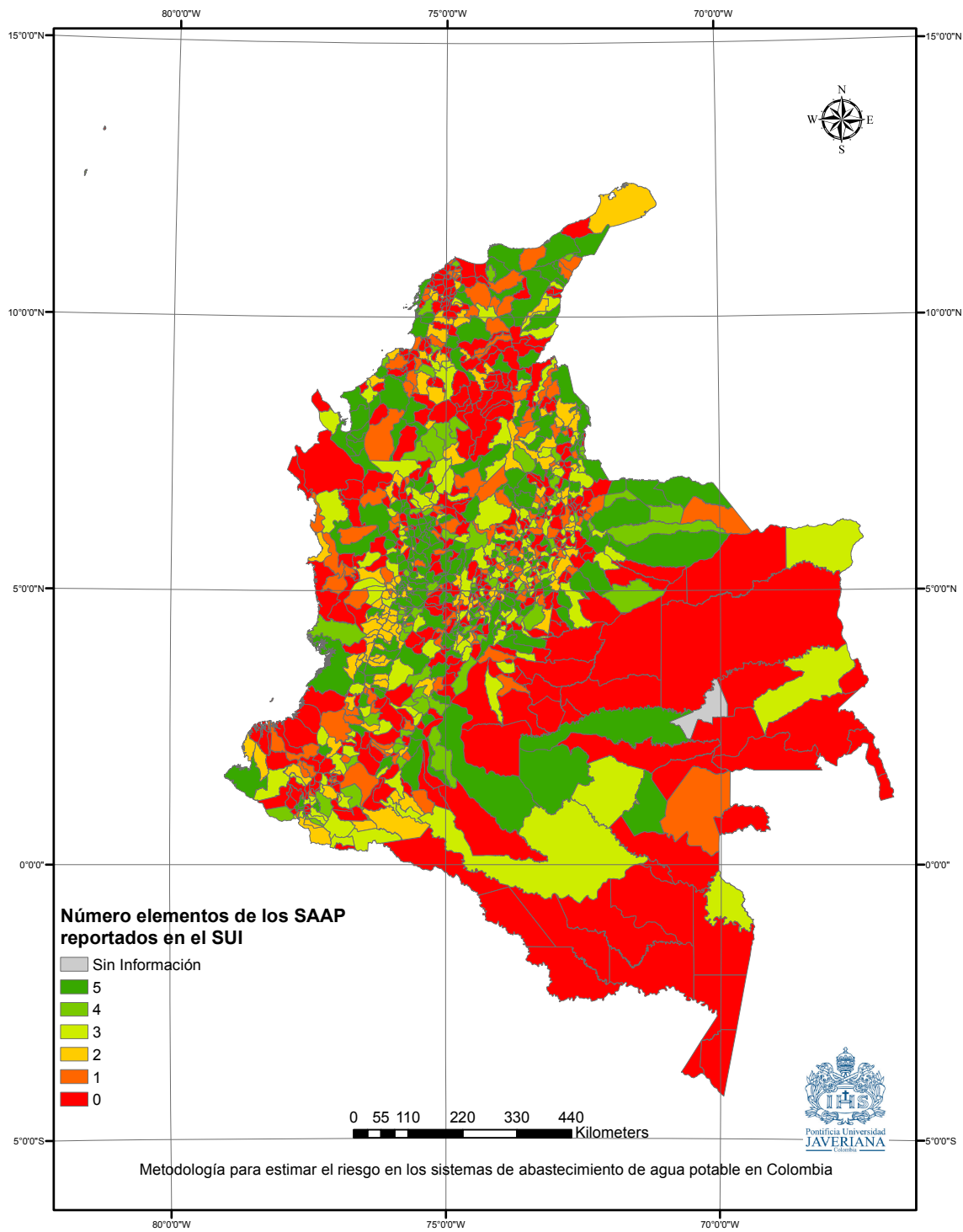


Figura 2.18: Municipios con número de componentes reportados

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

---

de este grupo, la semejanza entre los valores reportados por cada elemento (Ver Tabla 2.9).

Como complemento a lo anterior, siguiendo el sentido del flujo del agua (e.g., captación, aducción, etc),se realizó la comparación de los caudales de operación de cada componente de los SAAP encontrando:

- Valores que coincidan entre los elementos de los SAAP.
- Valores que resultaban ser menores entre los elementos, esto podría obedecer a pérdidas técnicas como fugas o daños en el componente, filtraciones y lavados entre otros.
- Valores que no guardan correspondencia entre ellos.

Variable	Número de municipios	Cobertura población total
M/pios que reportaron la secuencia de los elementos del sistema	226	27.761.793
M/pios con información consistente	127	22.835.030

Tabla 2.9: Número de municipios con información consistente de la secuencia del sistema

Adicionalmente, se incorporó en Tabla 2.9 la participación de la población total de Colombia (proyecciones de población del Departamento Nacional de Estadística DANE para el año 2013).

Como resultado, se obtuvo que el 68 % del total de la población en Colombia se encuentran en los 226 municipios que reportaron de manera consecutiva los elementos estructurales de los sistemas de abastecimiento de agua potable. Así mismo, de los 226 municipios, el 56 % (127 municipios) reportaron información consistente, es decir que los valores de cada elemento tenía correspondencia. En términos de cobertura poblacional, los 127 municipios cubren el 58 % de total de la población.

Este análisis evidencia varios aspectos relacionados con la calidad de la información reportada. Por un lado, del grupo de los 226 municipios, 99 no tiene información confiable, y por otro, que de los 1123 municipios del país solo se tenga información confiable de 127 el 11 %. De manera que la cantidad y calidad de información que los tomadores de decisiones necesitan en las fases de análisis y gestión del riesgo requiere un esfuerzo importante que permita a las empresas que desarrollan la actividad del servicio de acueducto generarla con

estándares de calidad, recopilarla en sistemas versátiles, editarla en paquetes útiles y de fácil transmisión a los usuarios (Cardona and Yamín, 2007b).

### 2.3.1. Análisis de redundancia en los SAAP

Una característica sobresaliente e importante de los SAAP es que cada elemento tiene un “grado de confiabilidad natural”, el cual depende de sus características y del comportamiento de cada uno de sus componentes (Barcia and Trujillo, 2011). Usualmente para realizar un análisis de confiabilidad se selecciona un grupo de elementos cuyo comportamiento es relevante para el funcionamiento del sistema (Sanchez-Silva, 2005). Pero considerando que los SAAP de manera general son configurados como sistemas en serie y cada uno de los elementos principales que lo componen presentan un número de atributos propios y únicos, hacen que una evaluación de la confiabilidad se deba concentrar en los elementos principales de los SAAP.

Tal y como se muestra en la Figura 2.19, los elementos A y B están conectados. A través de esta relación se transfieren una serie de atributos (e.g., información, energía, caudal). Esto implica que ambos elementos deberán trabajar para asegurar que el sistema funcione y desde el punto de vista de la confiabilidad Sanchez-Silva (2005) menciona que existen dos alternativas para evaluar en un sistema: 1). identificación de modos de falla y 2). identificación del comportamiento crítico. Considerando que la evaluación no es procedimiento sencillo y depende de un gran número de factores, adicionalmente Sanchez-Silva (2005) indica que entre los factores se encuentra la “redundancia del sistema”.



Figura 2.19: Relación entre dos componentes de un sistema en serie

Muchas investigaciones coinciden en que la clave para el manejo de fallas es la redundancia (Barcia and Trujillo, 2011; Jalote, 1994). Por consiguiente, tal y como se mostró en la Figura 2.2 y considerando que los SAAP son sistemas en serie y que están propensos a generar fallas en el sistema, la evaluación de la redundancia es muy importante como insumos para establecer la vulnerabilidad de un sistema (Sanchez-Silva, 2005).

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE -[SAAP] EN COLOMBIA

---

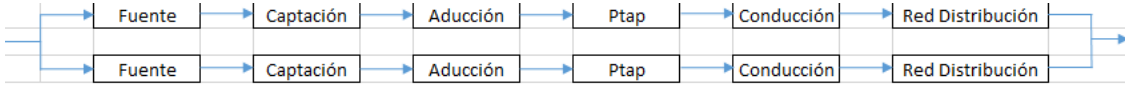


Figura 2.20: Redundancia de un SAAP

La Figura 2.20 mediante un diagrama de bloques que permite de manera conceptual definir la redundancia de un SAAP.

A partir de lo anterior, para evaluar la redundancia de los SAAP, fueron considerados los 127 municipios que han reportado información consistente. Para lo cual fue necesario tener en cuenta los siguientes criterios de análisis:

- Identificar el número de elementos que constituyen un componente estructural.
- Identificar por municipio el número de elementos que componen cada SAAP.
- Una propiedad de un sistema es la Estructura (Sanchez-Silva, 2005). Definida por la forma en que los elementos se relacionan para realizar un proceso (Sanchez-Silva, 2005). Considerando este criterio “*forma*”, al evaluar cada elemento de los SAAP se tuvo que contemplar la arquitectura del mismo (a pesar de que puedan poseer el mismo número de elementos, su estructura varia dada las condiciones de diseño que fueron consideradas), con el propósito de identificar el funcionamiento del mismo y la independencia del elemento y del sistema.

A manera de ejemplo, la ciudad de Cúcuta, posee dos sistemas para potabilizar el agua. Portico y Carmen de Tonchalá. A simple vista se podría inferir que presentan redundancia, sin embargo, dichos sistemas son totalmente independientes entre ellos, por lo que cada uno no logra cubrir las demandas del otro. Adicionalmente considerando las capacidades de diseño y operación se observa que el sistema Portico soporta el 70 % de la producción y el 30 % restante el sistema Carmen de Tonchalá de la demanda total requerida para la ciudad de Cúcuta.

En la Tabla 2.10, de acuerdo con los 127 municipios que reportaron información consistente, se estableció la redundancia de los SAAP. En esta Tabla, se muestra el número de elementos reportado para cada componente estructural de los SAAP asociados al número de municipios.

Como resultado de este análisis, se puede observar que para 1 elemento reportado se concentra el mayor número de municipios (Fuentes: 55 %, Captación: 56 %, Aducción: 42 %, Ptap: 68 % y Conducción: 48 % ). esto significa que en dichos municipios solo se registra 1



### 2.3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Número elementos	Fuentes Número Municipios	Captación Número Municipios	Aducción Número Municipios	PTAP Número Municipios	Conducción Número Municipios	Distribución Número Municipios
1	70	71	53	86	61	-
2	23	27	38	21	27	-
3	17	14	12	9	15	-
4	9	4	9	1	2	-
5	3	4	3	2	8	-
6	3	3	5	-	2	-
7	-	2	1	2	3	-
8	-	1	1	-	1	-
9	-	-	1	1	2	-
10	1	-	1	-	1	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	1	-	1	-
13	-	-	1	-	2	-
14	-	-	-	-	-	-
16	1	-	-	-	-	-
18	-	1	-	-	-	-
20	-	-	1	-	-	-
129	-	-	-	-	1	-

Tabla 2.10: Número de elementos por municipios

solo componente de su sistema, es decir que su redundancia es nula o dicho de otra manera no presenta redundancia.

Por ejemplo, el municipio de Angostura ubicado en el departamento de Antioquía registro al SUI un solo elemento para cada uno de los componentes estructurales que abastecen de agua potable.

## Capítulo 3

# Análisis multicriterio - Proceso analítico jerárquico (AHP)

En los humanos, decidir es uno de los tópicos que más ha ocupado a la especie en su tratamiento desde todos los puntos de vista (filosóficos, sociológicos, psicológicos, económicos, entre otros) y que mejor refleja su conocimiento, su procedimiento y por último, su grado de libertad (Moreno Jiménez, 2002). En la práctica la toma de decisiones está estrechamente relacionada con aspectos subjetivos, tangibles e intangibles, asociados al comportamiento del ser humano, quienes al final resultan ser los actores principales en los procesos de toma de decisiones.

Para Moreno Jiménez (2002) en el pasado la toma de decisiones se efectuaba basándose en el binomio experiencia-intuición. A medida que la complejidad de los problemas considerados ha ido creciendo, esto es, a medida que las situaciones contempladas han sido menos estructuradas e intervienen numerosos escenarios, actores y factores, el binomio seguido ha sido el de información-razonamiento, aunque en los últimos años se está considerando el de conocimiento-razonamiento (Moreno Jiménez et al., 1998).

Según Moreno Jiménez (2002) el término razonamiento “*se refiere al concepto de racionalidad entendido en el sentido clásico, esto es, la aplicación del método científico en la resolución de problemas (objetividad, verificabilidad y causalidad)*” y el término conocimiento, “*es entendido desde el sentido de la inteligencia artificial, por tanto hace referencia a las creencias, ideas, reglas y procedimientos generalmente ciertos en un dominio particular, esto es, a la interpretación dada a la información existente n por parte de los actores participantes en el proceso de toma de decisiones dentro de un dominio específico (uso de la información) la cual explícitamente considera aspectos como la incorporación de aspectos intangibles, aspectos subjetivos asociados a la percepción de la realidad que tienen los*

*participantes implicados en la resolución del problema”.*

Por tanto, bajo los nuevos paradigmas en la toma de decisiones se integra lo racional del proceder científico en la toma de decisiones con lo emocional del comportamiento humano (Moreno Jiménez, 2002; Pietri et al., 2011). Esto conlleva a plantear una herramienta metodológica que refleje estas nueva consideraciones en la toma de decisiones.

El análisis multi-criterio (AMC) se ha venido desarrollando para apoyar los procesos de toma de decisión ya que incorpora diferentes criterios para la toma de decisiones (Galarza Molina, 2011). Moreno Jiménez et al. (1998) y Pietri et al. (2011) coinciden en señalar que el análisis multi-criterio es entendido como el conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejorar la calidad integral de los procesos de decisión. Adicionalmente contiene distintas posibles soluciones que requieren ser evaluadas o clasificadas por la persona o el grupo de personas que toman la decisión (Galarza Molina, 2011).

En la actualidad, se considera que el objetivo de la decisión multi-criterio es el de asistir en el proceso de toma de decisiones (Moreno Jiménez, 2002; Moreno Jiménez et al., 1998; Saaty, 1994), que permite la resolución más efectiva y realista del problema.

### **3.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)**

El Proceso Analítico Jerárquico- AHP, fue desarrollado por el profesor Thomas L. Saaty en los años 70 (Saaty, 1988, 1999), el cual permite emplear variables cualitativas y cuantitativas frente a múltiples objetivos. En este sentido, el Proceso Analítico Jerárquico es una teoría general sobre juicios y valoraciones que, basada en escalas de razón, permite combinar lo científico y racional con lo intangible para ayudar a sintetizar la naturaleza humana con lo concreto de nuestras experiencias capturadas a través de la ciencia (Moreno Jiménez, 2002).

En este sentido, el Proceso Analítico Jerárquico permite llevar un problema multidimensional (multicriterio) a un problema en una escala unidimensional (escala de prioridades) en la que se representan las salidas globales. Principalmente el AHP es un método de descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenando estos componentes o variables en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y finalmente los sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad.

Su formulación inicial se construye bajo una jerarquía básica, conformada por el objetivo general y los criterios que, a su vez, pueden estar constituidos por diversos niveles jerárquicos. Moreno Jiménez (2002) indica que el uso de jerarquías o redes para representar los aspectos relevantes del problema, toda vez que proporciona una visión más acurada a la realidad. El modelo jerárquico básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas.

La jerarquía se construye de modo tal que los elementos de un mismo nivel sean del mismo orden de magnitud y puedan relacionarse con algunos o todos los elementos del siguiente nivel (Saaty, 1988). Por ejemplo en una jerarquía típica en el nivel más alto se localiza el problema de decisión (objetivo). Los elementos que afectan a la decisión (criterios) son representados en los niveles intermedio y las posibles soluciones o acciones a tomar (alternativas) en el nivel inferior (Ver Figura 3.1).

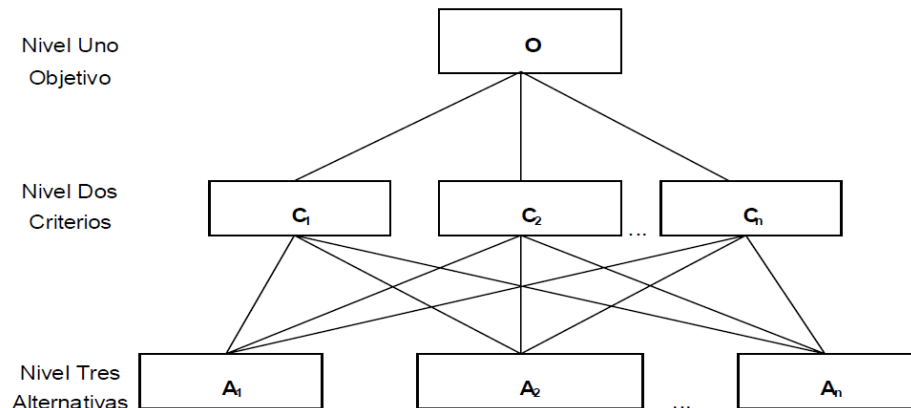


Figura 3.1: Esquema modelo jerárquico  
Fuente:(Saaty, 1988)

Para adelantar el desarrollo de lo anteriormente señalado, a continuación se describe la estructuración del modelo jerárquico de manera genérica.

1. Identificación del problema. Para esto se requiere representar el problema mediante la construcción de una jerarquía de al menos tres niveles, llamado diagrama de árbol (Figura 3.1)
2. Definición del objetivo. Una vez planteado el diagrama de árbol se define el objetivo general a alcanzar.
3. Definición de criterios. Los criterios son para Sánchez (2001): “*aquel factor o punto de*

vista que deba ser considerado en el proceso de decisión con el objetivo de solucionar el objetivo o problema planteado". Una vez definidos los criterios, se construye una matriz de comparación entre los criterios con el propósito de estimar la importancia relativa entre cada uno ellos. La matriz A se basa en las comparaciones biunívocas y se representan de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Esta matriz A presenta la propiedad de que  $a_{ji} = 1/a_{ij}$  y  $a_{ii} = 1$

La operatividad de la matriz se caracteriza por ser capaz de establecer prioridades entre los elementos de un mismo nivel de jerarquía, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior. En el AHP, la comparación por pares se hace usando una escala de nueve puntos (ver Tabla 3.1) propuesta por Saaty (1988), la cual representa los juicios o preferencias de quienes toman decisiones entre las opciones.

Juicio de importancia	Intensidad
Extremadamente más importante	9
Muy fuertemente más importante	7
Fuertemente más importante	5
Moderadamente más importante	3
Igualmente importante	1

Tabla 3.1: Escala de importancia relativa  
Fuente: (Saaty, 1988)

Los valores 2,4,6,8 son valores intermedios entre los dos juicios contiguos (valores intermedios de preferencia), se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores.

4. Identificación de alternativas. Este procedimiento resulta ser igual que el de identificar y definir los pesos de los criterios. Sencillamente este varía en el que la alternativa es la respuesta al objetivo o problema planteado. Para este caso también se debe construir una matriz tipo A como se mencionó con anterioridad.
5. Evaluación del modelo. Se establece el cálculo de los vectores de pesos de cada nivel de la jerarquía y se identifica cual criterio y alternativa son los más representativos.

Para los numerales 3 y 4, no existe alguna restricción con el número de subniveles que pueden presentarse. Hurtado and Bruno (2005) indican algunas ventajas del AHP frente a otros métodos de decisión multicriterio:

- Permite desglosar y analizar un problema por partes
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común
- Incluir la participación de diferentes personas o grupos de interés y generar un consenso

En esencia, el AHP busca mejorar la calidad integral del proceso de toma de decisiones seguido por el sistema considerado. Para ello, intenta dotar de rigor científico cada una de las etapas y fases seguidas en el proceso de resolución. Para esta investigación el análisis se dirigirá hacia: 1) La comprensión del proceso de decisión, 2) Conocimiento de las diferentes etapas, factores, elementos y actores, con el fin de identificar los criterios y alternativas de decisión, 3) Identificar las oportunidades de decisión, 4) Develamiento de las preferencias y gustos de los expertos implicados, 5) Priorización, agregación y síntesis.

Por consiguiente, a continuación se especificará los procedimientos adelantados para el uso del método AHP.

### **3.2. Gestión del conocimiento - opinión o juicio estructurado de experto**

Actualmente el juicio de expertos es una práctica generalizada que requiere interpretar y aplicar sus resultados de manera acertada, eficiente y con toda la rigurosidad metodológica y estadística, para permitir que la evaluación basada en la información obtenida de la prueba pueda ser utilizada con los propósitos para la cual fue diseñada (Escobar Pérez and Cuervo Martínez, 2008).

El juicio de expertos lo define Escobar Pérez and Cuervo Martínez (2008) “*como una opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos cualificados en éste, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones*”. Esta opinión dependerá del nivel de experticia y de la diversidad del conocimiento.

Una pregunta que surge cuando se intenta definir conocimiento. Sin embargo para Rodríguez Castellanos et al. (2001) definir “*conocimiento* ” con precisión es muy difícil; es un

concepto sobre el que han trabajado los más grandes pensadores de la historia, sin que se haya llegado a tener un consenso claro. El filósofo italiano Giambattista Vico citado por (Ratzinger, 2012), apoyándose en Aristóteles señaló: “*el verdadero saber es el saber de las causas. Una cosa la conozco cuando conozco su causa; entiendo lo fundando cuando sé cuál es el fundamento.*”.

En tal sentido, para Escobar Pérez and Cuervo Martínez (2008) con frecuencia se logra confundir entre conocimiento e información. Ambas definiciones (conocimiento e información) son diferentes; el conocimiento es superior a la información en el sentido de que es más complejo, está estructurado, tiene más dimensiones que la información. La información es inerte y estática. Sin embargo, el conocimiento, está ligado al individuo, el cual lo utiliza, comparte, desarrolla e intuye nuevos conocimientos, los cuales en su gran mayoría recurre a procesos de prueba y aprendizaje o prueba/error (Rodríguez Castellanos et al., 2001).

Así mismo, al conocimiento lo acompaña la *Experiencia*, palabra que se derivada del latín “*experientia*” y corresponde al hecho de haber sentido, conocido o presenciado alguien algo. Las palabras “*expertez*” y “*experticia*” se emplean con frecuencia para referirse a la condición de reunir conocimiento experto. Más cercano al propósito de esta investigación la experiencia también cobra importancia, cuyo significado indica que cierta persona cuente con el conocimiento o habilidad para hacer algo.

Brody (2008) señala que un experto se describe generalmente como alguien que es reconocido por sus pares o por el público como una fuente fiable de conocimiento, información y / o habilidades. Sanchez-Silva (2005) menciona que definir un *experto* no es una tarea fácil. Para que una persona sea considerada experta es necesario que cumpla con una serie de condiciones mínimas dentro de las cuales señala:

- Haberse enfrentado a situaciones similares
- Conocer la dinámica del problema y comprender el comportamiento de las principales variables y su interrelación
- Tener la capacidad para emitir juicios
- Tener una responsabilidad ética
- Estar en la capacidad de identificar las presiones que implica la decisión

El modelo AHP ofrece un buen recurso para establecer los pesos entre las diferentes comparaciones. Estas comparaciones nos sirven para capturar el juicio de experto como ya

lo hemos mencionado. A cada juicio emitido por el experto se obtiene un vector propio, el cual proporciona el peso de cada variable (criterio, alternativa).

Considerando que se tienen diferentes opiniones de expertos cada una de ellas con diferentes valores de opinión, se debe aplicar el método de combinación lineal de opiniones de varios expertos sobre una misma variable (López and Dolado, 2009). El objetivo es obtener un solo y único valor para cada variable para que al final se consiga un valor global para la amenaza y vulnerabilidad.

Dicho método de combinación lineal de opiniones responde a la siguiente ecuación 7.6:

$$x = X_1E_1 + X_2E_2 + \dots + X_nE_n = \sum_{i=1}^n X_iE_i \quad (3.2)$$

Donde:

X= Conjunto de vectores propios.

E = Factor peso de cada experto.

### 3.3. Matriz de comparaciones pareadas

Una vez atribuidos los valores numéricos -pesos relativos- por el juicio de expertos, el resultado de estas comparaciones es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada “Matriz de comparaciones pareadas”. Esta matriz agrupa a criterios o alternativas del mismo nivel de jerarquía, de tal manera que se pueden comparar unos con respecto de otros y determinar la importancia relativa de cada uno.

A modo de ejemplo, se obtiene una matriz A como la que se muestra a continuación, donde se han comparado tres elementos: F1, F2, F3, F4:

Para normalizar los valores numéricos, se procede dividir el valor de cada celda de la matriz entre el total de la sumatoria de la columna a la cual pertenece, de manera que se obtiene:

Seguidamente al cálculo de pesos relativos, se determina el “vector principal” que para nuestro trabajo se conocerá como **peso del experto** que representa el valor de los criterios o alternativas comparados en cada una de las matrices de comparaciones a pares. El peso del experto se obtiene mediante la media aritmética de los valores de cada fila de la matriz.



### 3.3. MATRIZ DE COMPARACIONES PAREADAS

	F1	F2	F3	F4
F1	1,00	5,00	7,00	7,00
F2	0,20	1,00	3,00	3,00
F3	0,14	0,33	1,00	0,33
F4	0,14	0,33	3,00	1,00
Total columna	1,486	6,6667	14	11,333

Figura 3.2: Matriz de Comparaciones

	F1	F2	F3	F4
F1	1/1,48	5/6,6	7/14	7/11,3
F2	0,2/1,48	1/6,6	3/14	3/11,3
F3	0,14/1,48	0,33/6,6	1/14	0,33/11,3
F4	0,14/1,48	0,33/6,6	3/14	1/11,3

Figura 3.3: Matriz de normalización

	F1	F2	F3	F4	Vector de prioridad
F1	0,67	0,75	0,50	0,6176	0,64
F2	0,13	0,15	0,21	0,2647	0,19
F3	0,10	0,05	0,07	0,0294	0,06
F4	0,10	0,05	0,21	0,0882	0,11

Figura 3.4: Vector de prioridad

El resultado de la aplicación del método Proceso Analítico Jerárquico es un conjunto de prioridades finales representada mediante un estructura jerárquica.

## Capítulo 4

# Descripción de las Amenazas

A partir de los tipos, lugar y extensión, frecuencia, probabilidad de ocurrencia y magnitud se pretende incorporar las diferentes amenazas que en Colombia se registran en el análisis de riesgos para los SAAP. La información de los diferentes tipos de amenazas fue solicitada a los organismos técnicos nacionales encargados de generar el conocimiento sobre estas. Mediante petición escrita al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Servicio Geológico Colombiano anterior Ingeominas, Superintendencia de Servicios Públicos, Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo y Dirección General Marítima, se solicitó la información a escala municipal de las amenazas bajo estas características:

- Bases de datos en formatos excel o dbf
- Sistema de información geográfica a través de archivos shp (Shapes) o dbf (bases de datos).
- Mapas y/o planos a la resolución más fina en formatos pdf.
- Metodologías empleadas en formatos pdf o .doc.

Dicha solicitud se realizó con el propósito de representar los patrones mediante información geográficamente referenciada de manera que se pudiera analizar cada una de ellas. A continuación se describirá de manera general las metodologías empleadas para la generación y evaluación de las amenazas. El análisis de la información suministrada se desarrollara en el capítulo 4.

## 4.1. Amenaza por movimientos en masa

Los movimientos en masa constituyen una de las causas más frecuentes de pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo (Schuster, 1996; Sidle and Ochiai, 2006 citados por Aritstizábal 2010), por lo que la evaluación de la amenaza por movimientos en masa y la capacidad de predecir dichos movimientos ha sido un tema de gran interés para la comunidad científica (Aleotti and Chowdhry, 1999; Chacón et al., 2006 citados por Aritstizábal 2010).

Pérdidas humanas y económicas generadas por movimientos en masa se presentan cada año en todos los países del mundo, sin embargo el nivel de impacto varía considerablemente de acuerdo con las condiciones geológicas locales y la vulnerabilidad socio-económica (Alcantara - Ayala, 2002; Harp et al., 2009 citados por Aritstizábal 2010).

Dado el problema que representa este fenómeno en Colombia, se han adelantado metodologías para determinar la ocurrencia y la amenaza de deslizamientos en masa. En el país, se han desarrollado diferentes metodologías las cuales tienen diferentes finalidades (e.g., aportes al conocimiento científico, instrumentos de alerta temprana y estudios específicos en zonas determinadas).

En Colombia existen organismos técnicos encargados de generar información técnico-científica para la toma de decisiones de la población, autoridades, sectores económicos y sociales de Colombia, relacionados con la estimación de la amenaza por movimiento en masa. Principalmente esta labor la adelantan Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] y el Servicio Geológico Colombiano [SGC], cada uno de ellos ha desarrollado su propio modelo, los cuales no son excluyentes entre ellos sino que cada uno tienen propósitos diferentes.

La metodología que desarrollo el IDEAM se caracteriza por ser un modelo de susceptibilidad general del terreno a los deslizamientos que tiene como objeto proveer información oportuna acerca de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos asociados a lluvias en tiempo real. Este es un modelo de seguimiento y pronóstico de la amenaza diaria por deslizamientos tiene como base el mapa nacional de susceptibilidad o propensión del terreno a presentar movimientos en masa y la precipitación diaria como agente detonante de dichos eventos (Sánchez, 2002). Este modelo se aplica como instrumento de alerta temprana, el cual permite la activación de los mecanismos de alarma a nivel local, regional y nacional.

El modelo del IDEAM combina varios métodos: (1) heurístico basado en el entendimien-

to de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno; y (2) métodos probabilísticos basados en predicciones estadísticas para el análisis de la lluvia como evento detonante. Para Aritstizábal (2010) ninguna de estas metodologías tienen en cuenta las variables dinámicas del suelo por lo que dichos análisis en sí tan solo reflejan la susceptibilidad de las laderas a la ocurrencia de un movimiento en masa, por lo que no se refleja del todo la amenaza. |

Teniendo en cuenta lo anterior, la metodología propuesta por el Ideam solo refleja la susceptibilidad del terreno más no caracteriza la amenaza por movimientos en masa, razón por la cual este modelo no se considerará dentro del análisis de esta investigación.

La otra metodología que se encuentra en el país fue desarrollada por INGEOMINAS hoy Servicio Geológico Colombiano [SGC], a continuación se describe el modelo empleado para determinar la amenaza por movimiento en masa.

### **4.1.1. Metodología del Servicio Geológico Colombiano para determinar la amenaza por movimientos en masa**

La metodología para zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 se tomó a partir de la información del Servicio Geológico Colombiano SGS (anterior Ingeominas). Es importante considerar las definiciones (descritas en el marco conceptual) entre las que se encuentran movimiento en masa, zonificación, susceptibilidad de deslizamiento para abordar el desarrollo de esta amenaza.

La metodología empleada por parte del Servicio Geológico Colombiano para la generación del mapa de susceptibilidad y amenaza relativa por movimiento en masa consistió en el uso de dos aspectos:

- Variables cualitativas (e.g. geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra)
- Variables cuantitativas (pendiente, longitud de la pendiente, rugosidad y área de la cuenca aferente - acuenca)

Así mismo se aplicó un enfoque heurístico que tuvo como base el trabajo realizado en la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:500.000 del año 2009 el cual fue realizado por el SGC e IDEAM.

Se aplicó un análisis multicriterio que involucró la utilización de datos geográficos, en los que se debió establecer preferencias y combinaciones (o agregaciones) de los datos, de conformidad con las reglas de decisiones que se especificaron, para luego implementarlas en

un ambiente SIG (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011).

Para efectos de los análisis heurísticos, y con el propósito de determinar el Índice de Susceptibilidad de Movimientos en masa (ISD), se propuso la utilización de procesos de análisis jerárquicos (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011). La Figura 4.1 tomada del Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, muestra el esquema de la metodología que se empleó por el SGS para determinar la amenaza relativa por movimientos en masa.

En la Figura 4.1 se evidencia varias fases. En la primera se observa el uso de las variables cualitativas y cuantitativas que se emplearon como insumos para generar el mapa de susceptibilidad. El análisis de susceptibilidad según el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011) *“intenta hacer énfasis en la distribución de movimientos en masa en ladera y procesos de vertientes generadores de desequilibrio morfogénico, tomando en consideración el enfoque geomorfológico, cuyo objetivo es determinar la variación espacial de la inestabilidad de las laderas y su representación cartográfica mediante el mapa de susceptibilidad geomorfológica. La evaluación se fundamenta en el método heurístico, el cual se basa en el análisis de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno, el mapeo de los procesos, los factores ambientales que afectan directamente e indirectamente la inestabilidad de las laderas, estimación de las relaciones entre los factores y los fenómenos de inestabilidad y la clasificación del terreno en dominios de diferente grados de susceptibilidad de acuerdo con las relaciones detectadas, en combinación con el enfoque analítico, en el que se elabora una serie de mapas temáticos, los cuales se evalúan separadamente y después se integran para alcanzar una evaluación general del área de estudio.”*

Por lo anterior, se aplicó:

- Un análisis espacial mediante un SIG, el cual incluye un análisis simultáneo de diferentes características temáticas y de la componente espacial de los objetos geográficos
- La evaluación multicriterio (EMC), a través del proceso analítico jerárquico, el cual involucra la utilización de datos geográficos, debiendo establecer las preferencias y combinaciones (o agregaciones) de los datos, de acuerdo con reglas de decisiones específicas (reglas de decisión), que han sido implementadas en ambiente SIG (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011).

La unión del SIG y del EMC permitió llevar a cabo procedimientos simultáneos de análisis en cuanto a los dos componentes del dato geográfico: espacial y temático (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011). Así mismo fue establecido un sistema de estandarización, dado que las variables originales se expresan en unidades de medida diferentes, con

CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE LAS AMENAZAS



Figura 4.1: Diagrama metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa

Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)

rangos bien distintos y con una amplia gama de posibilidades de interpretación en función de la representatividad o adecuación para un objetivo concreto.

Para cada variable geográfica se analizó las diferentes propiedades que afectan las laderas y según su importancia, se establecieron jerarquías y pesos a los factores considerados y se expresó cuantitativamente con el peso de ponderación para cada uno de ellos en el potencial de desencadenamiento de procesos de ladera de 1 a 5 y en donde el cero (0) representa la no existencia de la propiedad, los valores adoptados están basados en el método heurístico (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011).

Para el proceso analítico jerárquico AHP la Figura 4.2, muestra el diagrama de jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad escala 1:100.000. Allí se señalan los respectivos porcentajes obtenidos después de hacer el análisis de las prioridades relativas,

con los cuales se generaran las ecuaciones de susceptibilidad de cada una de las variables.

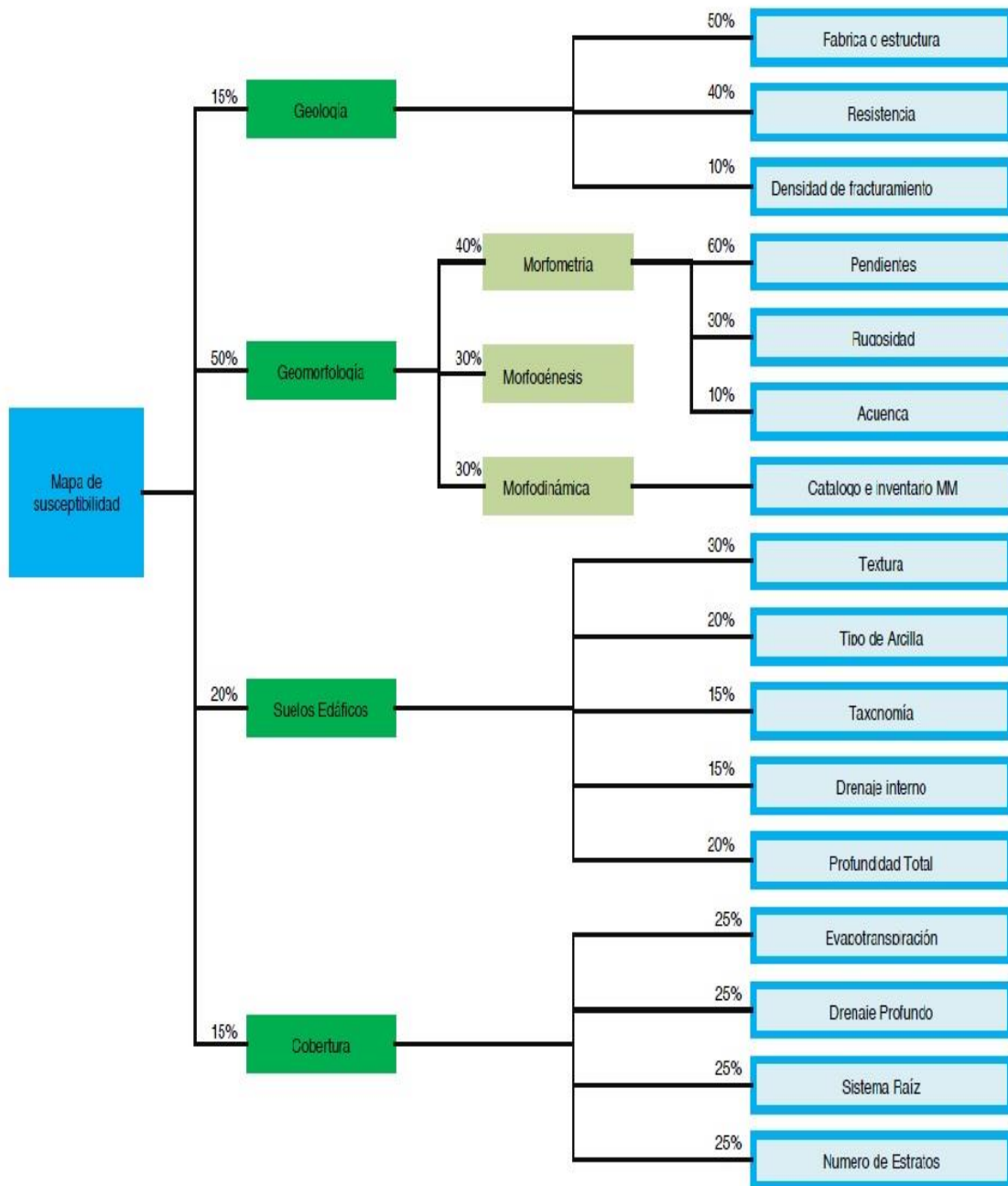


Figura 4.2: Jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad  
Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)

El primer nivel de la jerarquía indica que la meta general es seleccionar el mapa de susceptibilidad. En el segundo nivel, los cuatro criterios (geología, geomorfología, suelos y cobertura) contribuirán a lograr la meta general y el tercer nivel, cada atributo contribuye de manera única a cada uno de los criterios.

El cálculo de la consistencia se estimó a partir de la siguiente expresión (Saaty citado por el Servicio Geológico Colombiano SGS 2011).

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (4.1)$$

En donde,

IC = Índice de consistencia

IA = Índice de Aleatoriedad

El índice de consistencia es definido por (Ormazábal, citado por el Servicio Geológico Colombiano SGS 2011).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.2)$$

$$\lambda_{max} = \sum_{j=i}^n \left( \sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \cdot w_i \quad (4.3)$$

Donde,

$\lambda_{max}$  = Es el autovalor principal

n = matrices recíprocas positivas de orden n

Para el índice de aleatoriedad el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011) empleó los índices propuestos por Ormazábal en el año 2002. los cuales se muestran en la Tabla 4.1.

Una vez los criterios o variables de calificación fueron estandarizados o parametrizados y sus respectivos pesos establecidos, el método de la combinación lineal ponderada o WLC por sus siglas en inglés (Voogd 1983 citado por el Servicio Geológico Colombiano SGS 2011), es el más simple método para la agregación de los criterios de evaluación en un criterio de calificación. Así, según el método WLC, el índice de susceptibilidad a movimientos en masa (ISD) se obtiene de la suma de cada criterio de evaluación multiplicado por su respectivo peso (obtenido de la calificación AHP), así:

$$IS = \sum_{i=1}^n c_i \cdot v_i \quad (4.4)$$



Total de alternativas	Índice aleatorio
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

Tabla 4.1: Índices de aleatoriedad  
Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)

Donde,

IS = Índice de susceptibilidad

$n$  = número de variables

$v_i$  = peso de cada variable

$c$  = criterio de evaluación

Para la cual se obtuvo la siguiente tabla 4.2:

Variable	Ecuación
Susceptibilidad de la geomorfología	$0.30 * \text{Morfogénesis} + 0.30 * \text{Morfodinámica} + 0.40 * \text{Morfometría}$
Susceptibilidad de la morfometría	$0.60 * \text{Pendiente} + 0.30 * \text{Rugosidad} + 0.10 * \text{Acuena}$
Susceptibilidad de la geología	$0.50 * \text{Textura} + 0.40 * \text{Resistencia} + 0.10 * \text{Densidad Fallas}$
Susceptibilidad de los suelos edáficos	$0.30 * \text{Textura} + 0.20 * \text{Tipo de Arcilla} + 0.15 * \text{Taxonomía} + 0.15 * \text{Drenaje Natural} + 0.20 * \text{Profundidad Total}$
Susceptibilidad de la cobertura de la tierra	$0.25 * \text{Evapotranspiración} + 0.25 * \text{Drenaje Profundo} + 0.25 * \text{Sistema Raíz} + 0.25 * \text{Número de Estratos}$
Susceptibilidad Final	$0.5 * \text{geomorfología} + 0.15 * \text{Geología} + 0.20 * \text{Suelos} + 0.15 * \text{Cobertura}$

Tabla 4.2: Resumen de las diferentes ecuaciones para la generación de los mapas de susceptibilidad para una escala 1:100.000

Las áreas de susceptibilidad son representadas en el mapa definitivo de acuerdo a la opinión de expertos, mediante una clasificación cualitativa: Muy baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta susceptibilidad y algunas consideraciones relacionadas con la expectativa de deslizamiento.

# CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE LAS AMENAZAS

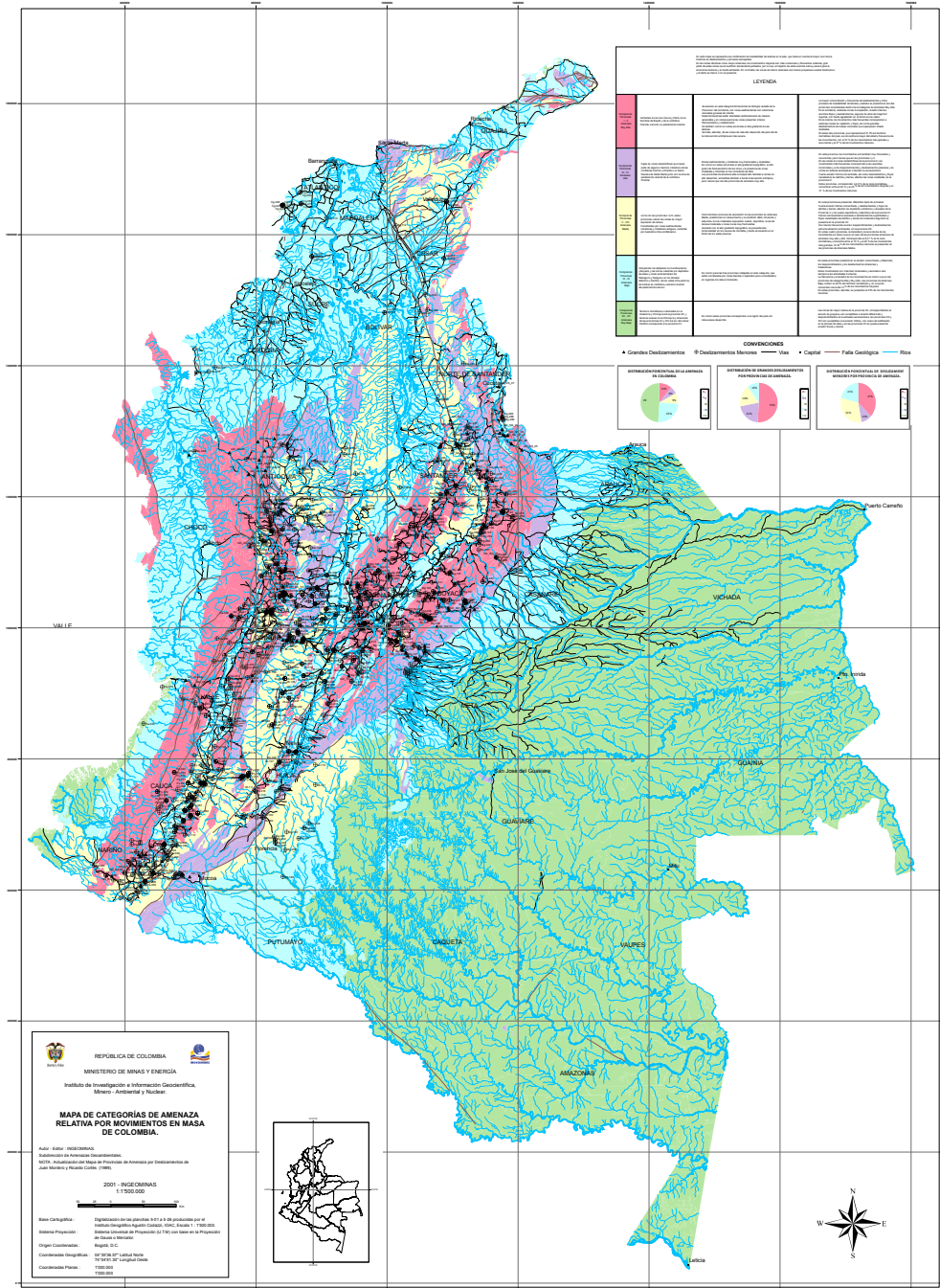


Figura 4.3: Mapa de susceptibilidad de movimiento en masa  
 Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)

Los criterios geológicos, geomorfológicos, de suelos y de cobertura que se definieron en el proceso analítico jerárquico (AHP), precisan los diferentes elementos temáticos en orden de importancia a partir de los cuales fueron establecidos en el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011). Según el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011) la elección de los criterios es determinante ya que según las variables incluidas, el resultado final obtenido puede variar considerablemente, por lo que se ha considerado la geomorfología, la geología, suelos edáficos y cobertura como el primer nivel de nuestra estructura jerárquica cuya relación define los valores de la susceptibilidad.

El análisis de susceptibilidad intenta hacer énfasis en la distribución de movimientos en masa en ladera y procesos de vertientes generadores de desequilibrio morfogénico, tomando en consideración el enfoque geomorfológico, cuyo objetivo es determinar la variación espacial de la inestabilidad de las laderas y su representación cartográfica mediante el mapa de susceptibilidad geomorfológica. Para la caracterización de la zonificación de susceptibilidad el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011) definió cinco rangos de clasificación: muy baja, baja, media, alta y muy alta.

##### 4.1.2. Zonificación de la amenaza

Los mapas de zonificación de amenazas por movimientos en masa a nivel nacional son importantes como insumo en la toma de decisiones sobre políticas nacionales para la gestión y reducción del riesgo según lo señalado por el Servicio Geológico Colombiano SGS (2011). A partir de la zonificación de susceptibilidad definida anteriormente el SGS estableció una metodología heurística para la zonificación de amenazas, para lo cual fueron definidos dos factores: 1) inherentes al clima (temperatura media anual, precipitación media anual y lluvia máxima diaria) y 2) el sismo como detonantes de los movimientos en masa.

##### ■ Condiciones climáticas

El Servicio Geológico Colombiano SGS (2011) propuso a partir de las siguientes hipótesis, la cobertura de factores climáticos que inciden en la generación de movimientos en masa aplicada a la zonificación de amenazas:

- *“La precipitación media anual y la temperatura media anual influyen en el contenido de humedad del suelo, es decir, en zonas en donde la precipitación media anual sea alta y la temperatura media anual sea baja, la humedad del suelo será mayor, lo cual contribuiría en mayor medida a la generación de movimientos en masa.”*

- “A mayor valor de lluvia máxima diaria, mayor saturación y por ende, mayor probabilidad de que se generen procesos de inestabilidad en las laderas.”
- “A mayor contenido de humedad antecedente en el suelo y mayor valor de lluvia máxima diaria, se incrementa la probabilidad de generarse movimientos en masa.”

Inicialmente, la evaluación de la amenaza debida a los eventos detonados por factores climáticos se obtiene mediante la suma de los pesos que contiene cada celda para el detonante y la susceptibilidad, así (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011):

$$Ac = S + Fc \quad (4.5)$$

Donde,

Ac = Amenaza por factores climáticos

S = Susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa

Fc = Factor clima

Teniendo en cuenta la escala de trabajo empleada para la zonificación de la amenaza por movimiento en masa a partir de factores climáticos se consideró el uso de la zonificación climática propuesta por el IDEAM (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011). Dicha zonificación contiene valores continuos a nivel nacional de precipitación media anual y temperatura media anual.

La intercepción entre la calificación de precipitación media anual y la temperatura media anual con las lluvias diarias máximas para un periodo de retorno de 25 años, dieron como resultado mapa final del detonante por factores climáticos (Figura 4.4).

#### ▪ Condiciones de amenaza sísmica

Cuando un sismo ocurre induce un movimiento del terreno a menudo suficiente para causar fallas a taludes que están marginalmente a moderadamente estables antes del sismo. Los daños resultantes pueden ser desde insignificantes a catastróficos dependiendo de la geometría y de las características del material que las conforman (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011).

Para zonificación regional se tomó como base el estudio *Actualización del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica* adelantado por el INGEOMINAS en 2008. De esta manera, el cálculo del detonante sismo se generó a partir de los datos de PGA ( $cm/seg^2$ ) correspondientes a un periodo de retorno de 475 años, los cuales fueron rasterizados y categorizados cada 50

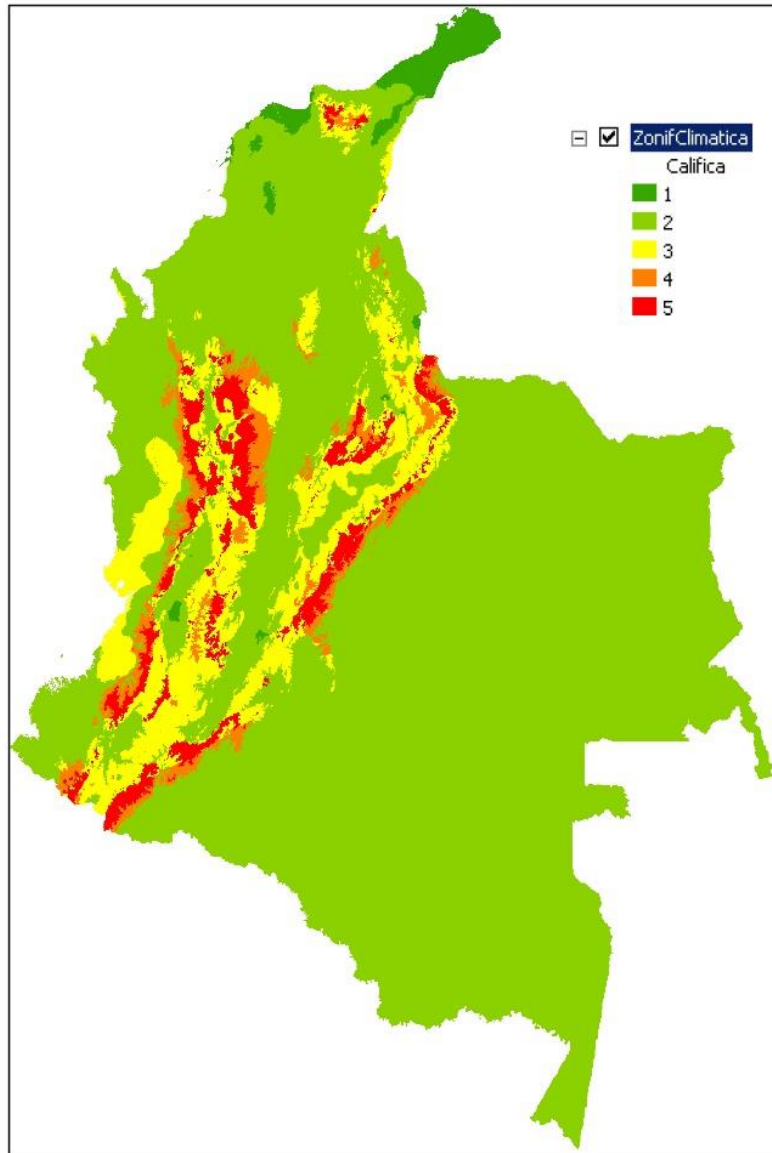


Figura 4.4: Mapa final de detonantes climáticos  
Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)

gales, permitiendo de esta forma calificar, de forma cualitativa el grado de contribución del sismo a la ocurrencia de movimientos en masa.

La Tabla 4.3 muestra la calificación del detonante sismo según su contribución a los movimientos en masa:

Valores de PGA ( $cm/seg^2$ )	Calificación
100	1
100 - 150	2
150 - 200	3
200 - 300	4
>300	5

Tabla 4.3: Calificación del detonante sismo

El cálculo de la amenaza por sismo, se obtiene mediante la suma de los pesos que contiene cada celda para el detonante sismo y la susceptibilidad, así (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011):

$$As = S + Fs \quad (4.6)$$

Donde,

As = Amenaza por detonante sismo

S = Susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa

Fs = Factor sismo

En la Figura 4.5 se presenta la cobertura calificada del detonante sismo a nivel nacional, observándose que las zonas de mayor contribución coinciden con la localización de las estructuras geológicas y fuentes sismogénicas de mayor actividad y recurrencia sísmica, como es el caso del occidente colombiano, la zona centro-oriental andina y la cordillera oriental.

#### ▪ Amenaza relativa total

Con el fin de calibrar el resultado de la zonificación de amenaza total, se establece la coincidencia de las zonas correspondientes a las categorías de amenaza alta y muy alta, con las zonas inestables y potencialmente inestables agrupadas dentro de la variable morfolodinámica (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011).

El cálculo de la amenaza total se obtiene mediante la suma de la amenaza climática y la amenaza por sismo, así (Servicio Geológico Colombiano SGS, 2011):

$$At = Ac + As \quad (4.7)$$

Donde,

At = Amenaza Total

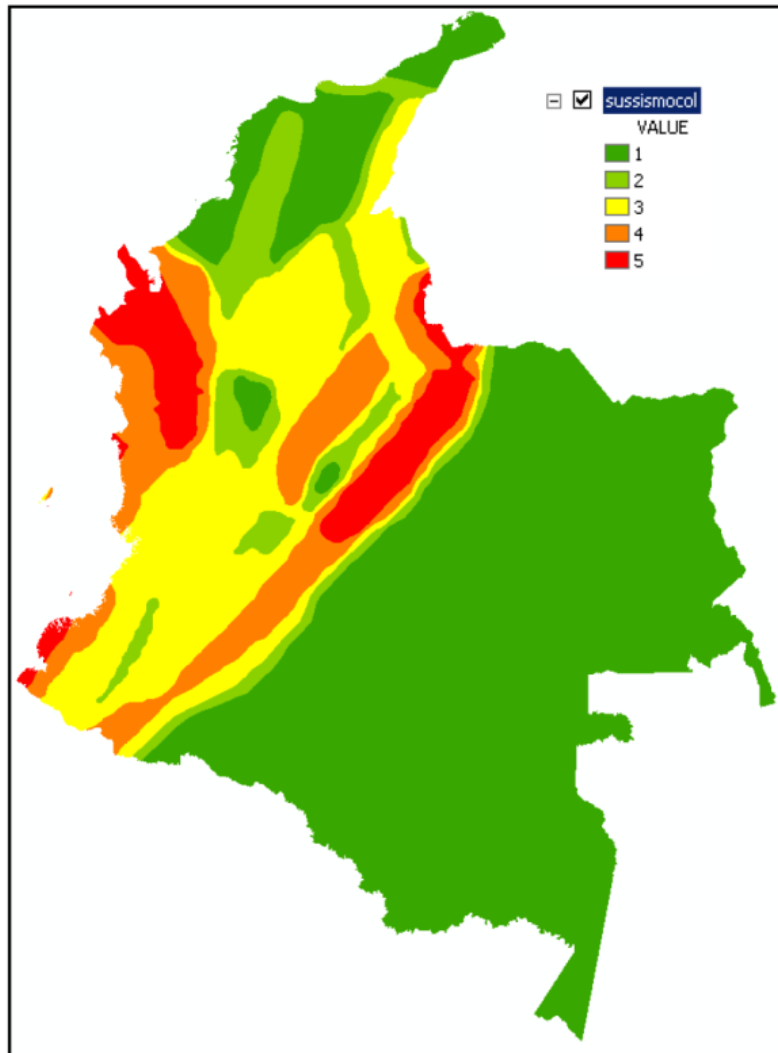


Figura 4.5: Aceleración máxima horizontal a nivel de roca-PGA calificada con base en su contribución a la generación de movimientos en masa.

Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGS (2011)

Ac = Amenaza por detonante clima

As = Amenaza por detonante sismo

Los valores obtenidos de amenaza por detonante clima o sismo oscilan entre 2 y 10 debido a que tanto la calificación de los detonantes como la de la susceptibilidad varían entre 1 y 5.

## 4.2. Amenaza Sísmica

El procedimiento que se presenta a continuación corresponde a la metodología general para evaluar la amenaza sísmica para el año 1996. A pesar de los esfuerzos adelantados para obtener la metodología del año 2010, no fue posible su obtención. Igualmente se aclara que los aspectos específicos de la metodología del año 1996 como por ejemplo las ecuaciones de atenuación y longitud de ruptura, han presentando variaciones, pero se desconocen los nuevos métodos empleados. Por tanto, se muestra a continuación la metodología del año 1996 considerando las anteriores restricciones. También, se aclara que la información digital que se entregó por parte del Servicio Geológico Colombiano SGC corresponde al año 2010.

Según Garzón (2011) para evaluar la amenaza sísmica de una zona hay que conocer previamente la sismicidad de la misma y esta última está definida por parámetros que caracterizan los fenómenos sísmicos. Los parámetros más comunes son los de localización y tamaño de un sismo, tales como: magnitud, momento, intensidad, aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo. Por consiguiente, Garzón (2011) señala que la amenaza sísmica se define como la probabilidad de que un parámetro como la aceleración, la velocidad o el desplazamiento del terreno producida por un sismo, supere o iguale un nivel de referencia. Los métodos para evaluar la amenaza sísmica se clasifican en dos grandes grupos: deterministas y probabilistas (Garzón, 2011).

### Método deterministas.

(Benito, 1999) señala que “*Los métodos deterministas fueron los primeros desarrollados, y tienen por objetivo obtener la acción sísmica en el emplazamiento, sin proporcionar información sobre su periodo de retorno. Tampoco analizan las incertidumbres introducidas en el proceso de cálculo, ni contienen criterios claros que permitan asegurar que el sismo obtenido sea el máximo esperable, lo que lleva con frecuencia a introducir conservadurismos excesivos. A pesar de esos inconvenientes, su uso ha sido generalizado durante dos décadas*”.

De manera general (Garzón, 2011) señala que el proceso de cálculo con estos métodos se realiza en los pasos que se indican a continuación:

- **Definición del área de influencia del sitio a evaluar e identificación de las fuentes sísmicas o fallas incluidas en el área.** Cuando la sismicidad se puede considerar homogénea en toda el area de influencia, se define como una única fuente sísmica de influencia global y se denomina no zonificado. Si se identifican zonas con potencial sísmico diferente, se entiende que el método es zonificado (Garzón, 2011).
- **Estimación de los máximos sismos ocurridos en el área de influencia o en**



**cada una de las zonas fuente.** Se determina (en lo posible) los sismos característicos y se define el máximo sismo potencial que se pueda generar en cada una de las zonas delimitadas.

- **Estimación de la acción sísmica en el área de influencia.** Garzón (2011) indica que por la hipótesis asumida de que la sismicidad es aleatoria en cada zona, el sismo máximo podría tener lugar en cualquier parte de la misma. En tal sentido, Garzón (2011) siguiendo un criterio conservador, menciona que dicho sismo se sitúa en el punto de la zona más cercano al lugar donde se realiza la predicción. Por tanto, aplicando las leyes de atenuación e incorporando la distancia, se proporcionan valores de la intensidad del movimiento en el emplazamiento relacionados con la actividad de cada zona definida.
- **Determinación de la amenaza en el sitio a evaluar.** Tomando el valor máximo de la intensidad del movimiento generado por las diferentes zonas, la amenaza queda caracterizada por el límite superior del movimiento en el sitio (Garzón, 2011).

#### **Método Probabilistas.**

En cuanto a los métodos probabilísticos Bernreuter (1989) indica que “*comenzaron a desarrollarse a finales de los años 60, teniendo ya por objetivo estimar las acciones sísmicas en el emplazamiento con una probabilidad asociada, lo que permite diseñar una construcción para cualquier nivel de riesgo aceptable; así como llevar a cabo un análisis de las incertidumbres derivadas de la aplicación de las distintas opciones de cálculo*”.

El método probabilístico considera los efectos de todos los sismos que pueden afectar a un sitio dado y tienen en cuenta la recurrencia de los mismos. Además se basan en leyes estadísticas las cuales son obtenidas a partir de la información contenida en los catálogos sísmicos (Garzón, 2011). El método probabilístico se clasifica en: paramétricos y no paramétricos.

- **Métodos no paramétricos (Métodos valores extremos).** Según Garzón (2011) los métodos no paramétricos evalúan la amenaza mediante funciones de distribución de valores extremos. Los cuales están basados en la información de catálogos sísmicos que en general no son completos para todos los terremotos contenidos en él, ya que no contiene todos los terremotos pequeños e intermedios ocurridos en épocas antiguas. Para evitar este problema, se ha aplicado a la evaluación de la peligrosidad a través de la teoría de valores extremos desarrollada por Gumbel en 1954 (Garzón, 2011). Esta metodología consta de los siguientes pasos:

1. Determinación del área de influencia alrededor del sitio por evaluar.

2. Cálculo de valores del parámetro del movimiento  $X$  en el sitio. Aplicando las leyes de atenuación a los valores del parámetro  $X$ , permite que se refleje la sismicidad del área durante el periodo de tiempo considerado.
  3. Estimación de la probabilidad de excedencia de un cierto valor extremo fijado,  $X_e$ , durante un tiempo de exposición  $t$ ; se representa así la amenaza.
- **Métodos no paramétricos.** Este método se basa esencialmente en: 1) la adopción de un modelo de zonas sismogénicas y 2) en el ajuste de la sismicidad de cada zona a un modelo de recurrencia. Al cual se adiciona posteriormente la contribución de todas las fuentes para obtener la función de probabilidad que representa la amenaza en el sitio.

Esta metodología consta de los siguientes pasos:

1. Definición de zonas sismogénicas en el área de influencia
2. Definición de un modelo de recurrencia en cada fuente sismogénica.  $f_0$
3. Estimación de leyes de atenuación con la distancia aplicables a las diferentes zonas, en términos del parámetro empleado para evaluar la amenaza (generalmente aceleración máxima). La aplicación de estas leyes sobre la sismicidad de cada zona, representada por su recurrencia, permite obtener la acción de las mismas sobre el sitio en particular.
4. Estimación de la amenaza total. A partir de la suma de las probabilidades obtenidas por acción de todas las zonas que influyen en el sitio a evaluar.

$$H = \sum_{i=1}^n (1 - e^{-\alpha}) \quad (4.8)$$

En donde;

$\alpha$  = la tasa anual de sismos ocurridos en cualquier zona que den lugar a una intensidad del movimiento superior a la de referencia en el sitio estudiado.

$n$  = el número de zonas.

#### 4.2.1. Evaluación amenaza sísmica

La evaluación de la amenaza depende primariamente de los datos obtenidos de la asignación de sismos y del análisis estadístico que se realice con la información de cada una de las fuentes sismogénicas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996).

Con el fin de determinar los niveles de amenaza sísmica de Colombia y por ende las aceleraciones horizontales, el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia adelantado

por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes (1996), empleó un modelo de línea fuente y métodos probabilísticos paramétricos. Pero antes de indicar los resultados de este estudio, debemos considerar las características de los sismos tal y como lo plantea la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica -AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996):

- Longitud de ruptura. Para un sismo grande, el tamaño de la zona de ruptura está relacionado con la energía total liberada, con el tipo de falla y otras características sismológicas y geológicas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996). Para lo cual se estima a través de:

$$L_r = e^{(aM_s - b)} \quad (4.9)$$

En donde:

$L_r$  = Longitud de ruptura

$M_s$  = Magnitud de Richter

a y b = Son constantes

Según señala el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia “*en sismos muy grandes esta longitud puede llegar inclusive a cientos de kilometros, por tanto es un aspecto esencial a considerar en la evaluación de la amenaza sísmica*” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996) .

- Distribución de magnitudes. La distribución de las probabilidades de la magnitud de los sismos puede obtenerse de la ley de magnitudes de Richter, la cual plantea que en un zona de la corteza terrestre y durante un periodo dado, la ocurrencia de los sismos puede aproximarse a (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996):

$$\log_{10} N(m) = p - qm \quad (4.10)$$

En donde:

$N(m)$  = corresponde al número de sismos con magnitud mayor o igual a  $m$

p y q = son constantes

Tambien puede expresarse esta relación:

$$N(m) = e^{(\alpha - \beta m)} \quad (4.11)$$

En donde,

$$\alpha = 2.3 \text{ p } \beta = 2.3 \text{ q}$$

Así mismo, si  $m_0$  representa una magnitud menor al interes en ingeniería (e.g.,  $M_s = 3$  o  $4$ ),  $m_u$  representa el limite superior de la magnitud, el cual puede variar de región a región, la distribución de probabilidad de la magnitud, denominada  $F_M(m)$ , puede obtenerse:

$$F_M(m) = P(M < m \mid m_0 \leq m \leq m_u) = \frac{N(m_0) - N(m)}{N(m_0) - N(m_u)} \quad (4.12)$$

O,

$$F_M(m) = \frac{1 - e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}} \quad (4.13)$$

para  $m_0 \leq m \leq m_u$ .

La función de densidad de probabilidad correspondiente es:

$$f_M(m) = \frac{d}{dm}(F_M(m)) = \begin{cases} \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_0)}} & \text{para } m_0 \leq m \leq m_u \\ 0, & \text{para los otros casos} \end{cases} \quad (4.14)$$

- Atenuación de energía. Los parámetros que definen el nivel del peligro en un modelo de amenaza sísmica se conocen como parámetros de movimiento del terreno tales como la aceleración pico, la velocidad pico y el desplazamiento pico (parámetros pico) o las ordenadas del espectro de respuesta o del espectro de Fourier (parámetros espectrales)(Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996). Estos parámetros definen la intensidad del movimiento sísmico en el sitio de análisis (Garzón, 2011).

Las leyes de atenuación se utilizan para estimar el nivel de movimiento del suelo en el sitio de interés ante la ocurrencia de un sismo con cierta magnitud. Para la estimación de la amenaza se hace por medio de las denominadas funciones de atenuación, las cuales son relaciones con las cuales se puede determinar valores de aceleración a nivel de roca a partir de la distancia focal (fuente-sitio), la magnitud sísmica y el tipo de mecanismo focal de ruptura (Garzón, 2011)

La aceleración máxima (a nivel de roca) ó Peak ground acceleration (PGA) según el Estudio General de Amenaza Sísmica en Colombia corresponde al “*parámetro más empleado en estudios de amenaza sísmica para representar el movimiento del terreno, por lo cual se han propuesto diversos modelos de atenuación de este parámetro con*

la distancia y las propiedades del medio transmisor” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996).

Según el Estudio la atenuación puede expresarse en forma restringida (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996):

$$y = f(m, r) \quad (4.15)$$

En donde:

$y$  = Es la máxima intensidad (aceleración, velocidad, desplazamiento, o intensidad de Marcalli)

$m$  = Es la magnitud del sismo

$r$  = Es la menor distancia entre el sitio de interés y la zona de ruptura

Así mismo el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, señala que: “*para efectos del modelo se debe contar con relaciones de atenuación y sus funciones inversas.*” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996).

$$m = g_1(y, r) \quad (4.16)$$

$$r = g_2(y, m) \quad (4.17)$$

Garzón (2011) indica que las ecuaciones empleadas en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia en 1996 por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes (1996) son:

Referencia	Ecuación
Ecuación de Atenuación de Donovan -D1	$a_h = 1320e^{0,580M}(r + 25)^{-1,520}$
Ecuación de Atenuación de Donovan -D2	$a_h = 1080e^{0,500M}(r + 25)^{-1,320}$
Ecuación de Atenuación de Mac Guire -MG	$a_h = 472,3e^{0,640M}(r + 25)^{-1,301}$

Tabla 4.4: Ecuaciones de atenuación

Fuente: Garzón (2011)

En donde,

$a_h$  = máxima aceleración horizontal del terreno en  $cm/seg^2$

$M$  = magnitud de Richter del sismo calculada utilizando ondas de superficie (Ms)

$r$  = distancia más corta entre el lugar y la zona de ruptura, en km  
 Con base en lo anterior se generó la Figura 4.6:

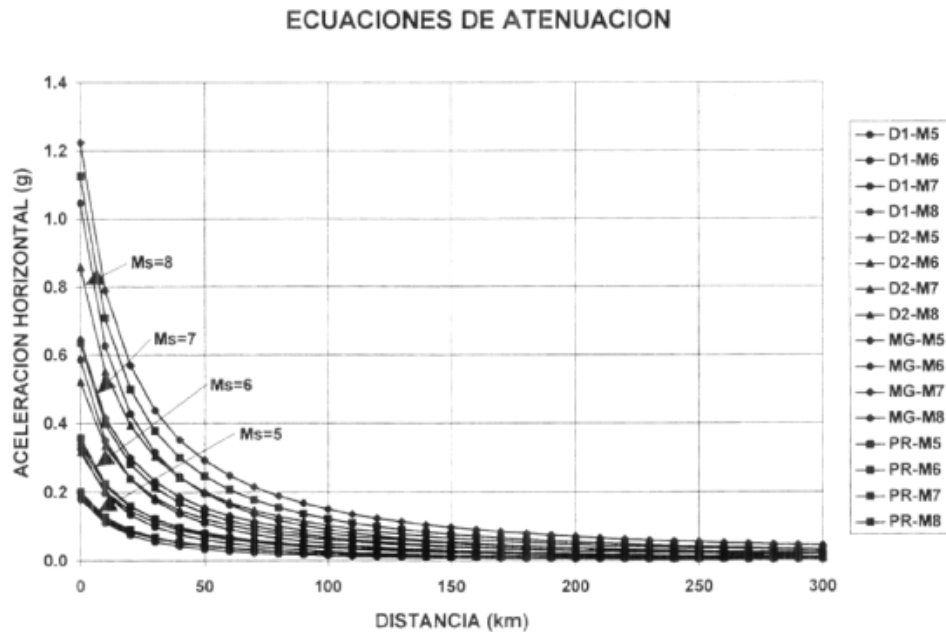


Figura 4.6: Ecuaciones de atenuación

Fuente: Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes (1996) Página 12

Como resultado del Estudio General de Amenaza Sísmica en Colombia se elaboró un mapa de amenaza sísmica (Figura 4.7), el cual proporciona los valores aceleración pico efectiva para diseño [Aa], definida como la “*aceleración pico efectiva horizontal de diseño expresada como fracción de la aceleración de la gravedad*” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996); se anota que dicha aceleración es a nivel de roca.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que “*para el caso de las normas sismo resistentes colombianas el sismo de diseño se ha definido como el evento que produce una aceleración horizontal pico tal que la probabilidad de que sea excedida en un lapso de 50 años es de 10 %*” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996).

La Figura 4.8 se muestra el mapa de valores de Aa obtenido como resultado del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, 1996).

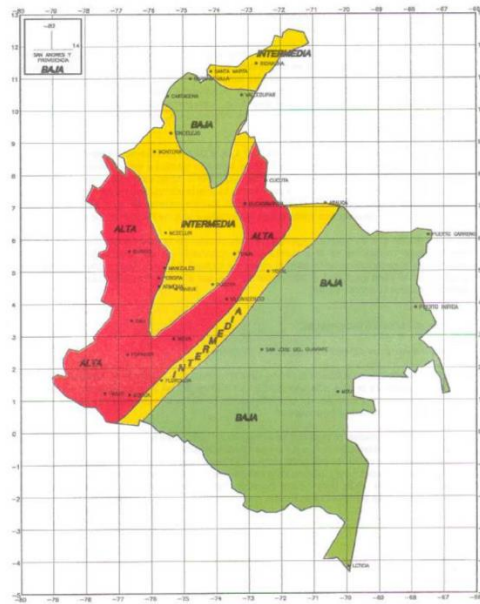


Figura 4.7: Zona de amenaza sísmica

Fuente: Apéndice M Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes (1996)

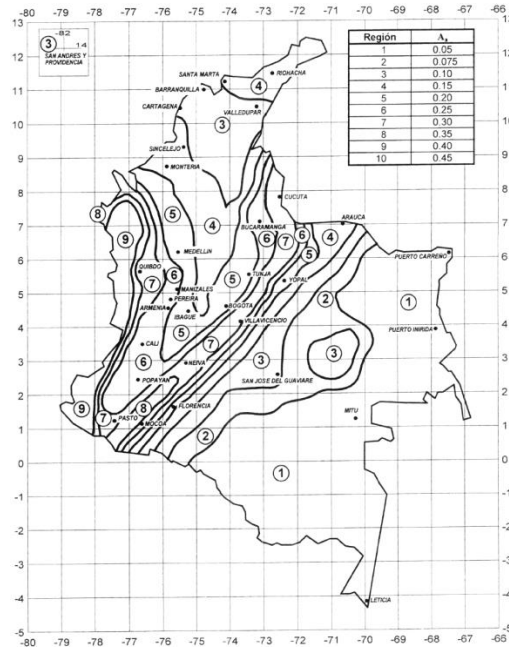


Figura 4.8: Mapa de valores de aceleración pico efectiva para diseño Aa

Fuente: Apéndice M Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes (1996)

### 4.3. Amenaza por vulcanismo

#### 4.3.1. Amenaza Volcán Galeras

La metodología utilizada para la generación del mapa de amenaza volcánica del Galeras, fue desarrollada con base en una zonificación probabilística de los fenómenos asociados a las erupciones ocurridas durante los últimos 500 años y en el modelamiento de fenómenos que no dejaron un amplio registro geológico.

Según el INGEOMINAS el actual cono del Galeras es la última etapa de un gran complejo volcánico. El cual ha evolucionado durante varios miles de años, la cual inició hace 5000 años aproximadamente. Calvache citada por el INGEOMINAS señala que “ *el último periodo de reposo fue entre 1948 y 1988; desde esta fecha ha tenido actividad que sin ser constante, ha generado erupciones caracterizadas por ser de tipo volcánico. Una de ellas la erupción del 14 de enero de 1993*” (Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química, 1997).

La altura máxima del edificio volcánico alcanza los 4270 m.s.n.m. Presenta pendiente variables sobre la ladera del mismo. En sectores de la parte occidental y algunos al nororiente del cono activo es vertical, semivertical al norte, noroccidente y algunas zonas del nororiente y pendientes menores a 60° en las demás zonas (Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química, 1997).

El Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997) señala que el cráter principal tiene un diámetro de 300 m y una profundidad variable entre 100 y 150 m; que se encuentra rodeado de varios cráteres secundarios y 3 conjuntos de fumarolas principales, las cuales en la actualidad tiene (no constante) la expulsión de gases volcánicos; esto últimos presentan diámetros menores a 50 m.

Los resultados de la evaluación de la amenaza volcánica de Galeras se consignan en cuatro mapas. El primer mapa se obtuvo aplicando la metodología de zonificación probabilística, el cual consideró información relacionada con narraciones históricas y estudios geológicos de detalle.

La información de los eventos volcánicos tuvo diferentes escalas: 1) Eventos con registro geológico, 2) Eventos con recuento histórico y 3) los eventos sucedidos entre los años 1988 y 1995. Considerando la edad del edificio actual (5000 años) se realizó una etapa de campo que consistió en realizar excavaciones de apiques con el propósito de localizar flujos piroclásticos que “ *embebieran material carbonosos que pudiese ser datado y dilucidar si el depósito se encontraba en el intervalo de tiempo menor a 500 años, indicando qué sector*



*podría estar de nuevo afectado por eventos piroclásticos en una futura erupción”, de manera que enfatizó en zonas aledañas a sectores poblados cercanos al volcán.*

Según el INGEOMINAS con base en los trabajos previos de geología y estratigrafía y la fase de campo, se obtuvieron los mapas de los eventos volcánicos para ser utilizados en la metodología de zonificación probabilística: flujos piroclásticos, flujos de lava, caídas piroclásticas y flujo de lodo (Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química, 1997).

Calvache citada por Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997) menciona que para el caso de flujos piroclásticos y de lava se tuvo en cuenta 6 miembros (4500, 4000, 2900, 2300, 1100 años y la erupción de 1866) con base en dataciones obtenidas por el método del carbono catorce ( $^{14}C$ ).

El INGEOMINAS indica que un paso indispensable para realizar la zonificación de la amenaza, es la obtención de la una columna estratigráfica generalizada de los eventos emitidos por el Volcán Galeras durante los últimos 5000 años, con el fin de definir el número y tipo de eventos con registro geológico. Para lo cual, se tuvo que recurrir a estudios anteriores que contenían las columnas estratigráficas. Una vez definida la columna (Figura 4.9) y a partir de la correleación de tales columnas se obtuvo como resultado la ocurrencia de 45 eventos entre los cuales el mayor número corresponde a flujos y oleadas piroclásticas (Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química, 1997).

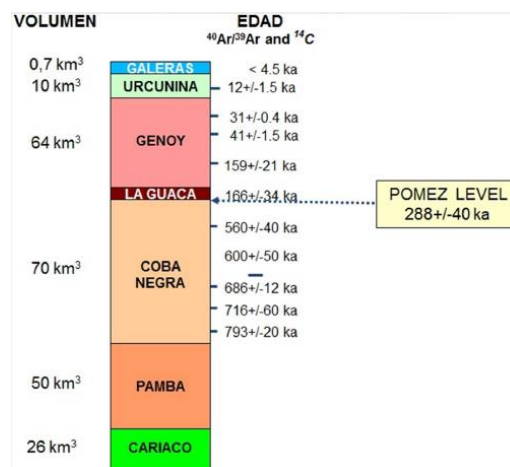


Figura 4.9: Columna estratigráfica generalizada Volcán Galeras

Fuente: Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997)

Con la distribución de los diferentes tipos de depósitos volcánicos, la naturaleza de los

fenómenos volcánicos, las consideraciones geomorfológicas y climatológicas se elaboró los mapas de zonificación de flujos piroclásticos, flujos de lava, caídas piroclásticas y flujos de lodo (Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química, 1997).

El análisis probabilístico se inicia con el cálculo del porcentaje de frecuencia (PF) para cada tipo de depósito, teniendo en cuenta el número total de eventos (Tabla 4.5) (Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química, 1997).

Tipo de depósito	% de Frecuencia (PF)
Flujos piroclásticos	$(27 \times 100)/45 = 60 \%$
Lava	$(3 \times 100)/45 = 6.7 \%$
Caídas piroclásticas	$(9 \times 100)/45 = 20 \%$
Flujos de lodo	$(6 \times 100)/45 = 13.3 \%$

Tabla 4.5: Porcentaje de frecuencia

Fuente: Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997)

Con base en la calificación de la severidad (Tabla 4.6), se obtuvo la severidad para cada tipo de depósito (Tabla 4.7) y posteriormente se calculó la severidad ponderada inicial -SPi (Tabla 4.8) para determinar la severidad ponderada -SP.

El INGEOMINAS señala que “*La severidad ponderada (SP) para cada tipo de evento, resulta a partir del producto de la severidad y el porcentaje de probabilidad de cada evento, llevando al 100 % a través de un divisor común (DC)*”. Aplicando la ecuación 4.18 se obtuvo como resultado la Tabla 4.9

Tipo de daño	Severidad
Daños materiales parciales. Sin peligro para la población	1
Daños total a cultivos. Daños parcial a la propiedad y semovientes	2
Destrucción de propiedad. Posibilidad de supervivencia	3
Poca Posibilidad de supervivencia	4
Destrucción total sin posibilidad de supervivencia	5

Tabla 4.6: Calificación Severidad

Fuente: Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997)

$$DC = \frac{100}{\sum(Spi)} = \frac{100}{420} = 0,24 \quad (4.18)$$

Tipo de depósito	# de eventos	PF	Severidad
Flujos piroclásticos	27	60	5
Lava	3	6	3
Caídas piroclásticas	9	20	3
Flujos de lodo	6	13.3	3

Tabla 4.7: Valoración de la severidad para cada tipo de depósito  
Fuente: Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997)

Tipo de depósito	Severidad	% Frecuencia	SPi
Flujos piroclásticos	5	60	300
Flujos de lodo	3	13.3	39.9
Lava	3	6.7	20.1
Caídas piroclásticas	3	20	60
$\sum(SP_i)$			<b>420</b>

Tabla 4.8: Severidad Ponderada inicial SPi  
Fuente: Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997)

Severidad ponderada para tipo de depósito	Severidad	% Frecuencia	DC	SP
Flujos piroclásticos	5	60	0.24	71
Flujos de lodo	3	13.3	0.24	10
Lava	3	6.7	0.24	5
Caídas piroclásticas	3	20	0.24	14

Tabla 4.9: Severidad Ponderada  
Fuente: Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997)

Una vez que se obtuvo los valores de severidad ponderada SP, se superpusieron los mapas de zonificación de cada evento y se realizó la sumatoria de las severidades ponderadas en aquellas zonas en que sucede más de un evento.

Los análisis de los valores obtenidos en el mapa de severidades ponderadas, permitió definir los intervalos para los diferentes grados de amenaza. Según el INGEOMINAS se definieron para el volcán Galeras la zona de amenaza alta, media y baja (Tabla 4.10) y se trazaron las líneas que delimitan las zonas obteniendo el mapa de amenaza volcánica potencial Figura 4.10:

#### 4.4. Amenaza por Inundación

Según el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2013) los criterios para identificar y delimitar las zonas inundables a escala 1:25000, debe partir de la combinación de diferentes técnicas: imágenes de sensores remotos, recorridos con GPS de

CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE LAS AMENAZAS

Grado de amenaza	Rango de severidad ponderada
Alta	> 20
Media	10 - 20
Baja	< 10

Tabla 4.10: Grado de Amenazas Volcán Galeras

Fuente: Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997)

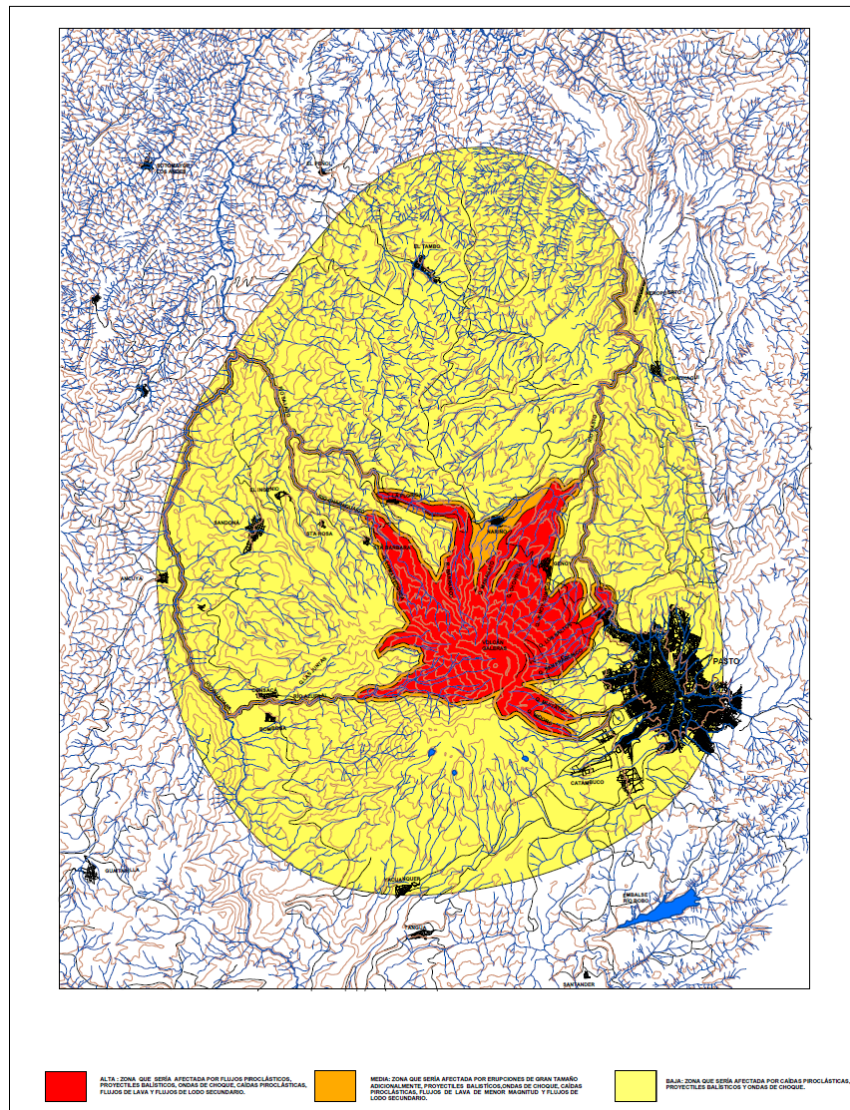


Figura 4.10: Mapa Amenaza Volcán Galeras

Fuente: Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química (1997)

alta precisión para tomar cotas de referencia en sitios de interés y levantamiento de información en la zona con la identificación de marcas y placas sobre elementos artificiales o naturales.

Para explorar zonas con periodos de retorno mayor es necesario apoyarse en la información geomorfológica a escala detallada, especialmente en zonas cercanas a núcleos urbanos y centros poblados, para lo cual la escala recomendada para el análisis es del orden de 1:5000 o más detallada (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2013).

Particularmente la metodología aplicada por el IDEAM para establecer la zonificación de susceptibilidad a inundaciones, considera en la escala nacional (1:500.000) el escenario del entorno geomorfológico y las coberturas de la tierra y permite una evaluación de los siguientes aspectos:

- Tiempo de arribo (súbito en minutos, moderado en horas y lento en días),
- Tiempo de duración (horas, días, semanas),
- Extensión del evento (M = metros, D = decenas de metros, H = cientos de metros, K = miles de metros)
- Tipo de flujo (A = Avenida de Agua, L = Flujo de Lodos, E = Flujo de Escombros)

En la actualidad el IDEAM avanza en el análisis de la zonificación de susceptibilidad y amenazas por inundación siguiendo el esquema de entorno geomorfológico y cobertura de la tierra para una escala 1:100.000 en aquellas zonas donde se cuenta con información geomorfológica de este nivel de detalle (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2013).

Es de resaltar que se presenta una amenaza alta de inundación ocasionada por crecientes súbitas y flujos torrenciales, particularmente en zonas como cañones y piedemontes en los cuales la existencia de centros poblados vulnerables aumenta el riesgo ante eventos hidrometeorológicos.

En el marco de los análisis para establecer la dimensión de las afectaciones por los eventos de la inundación 2010-2011, el IDEAM ha consolidado a escala 1:100.000 para el territorio nacional una propuesta de línea base (año 2001) que delimita las zonas inundables a partir de la presencia de coberturas de la tierra considerando las siguientes unidades:

El Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2013) propone una tipificación que evalúa una serie de características como lo son el tiempo de arribo, la duración, la extensión y el tipo de flujo de los eventos teniendo en cuenta que las respuestas de las

Item de cobertura N°5	Superficies de Agua
5.1	Aguas continentales
5.1.1	Ríos (50 m)
5.1.2	Lagunas, lagos y ciénagas naturales
5.1.3	Canales
5.1.4	Cuerpos de agua artificiales
5.2	Aguas marítimas
5.2.1	Lagunas costeras
5.2.2	Mares y océanos
5.2.3	Estanques para acuicultura marina

Tabla 4.11: Unidades superficies de agua

Fuente:(Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2013)

Item de cobertura N°4	Áreas húmedas
4.1	Áreas húmedas continentales
4.1.1	Zonas pantanosas
4.1.2	Turberas
4.1.3	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
4.2	Áreas húmedas costeras
4.2.1	Pantanos costeros
4.2.2	Salitral
4.2.3	Sedimentos expuestos en bajamar

Tabla 4.12: Áreas húmedas

Fuente:(Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2013)

inundaciones dependen del mecanismo generador y entorno físico en el cual suceda el evento.

Según el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2013) las inundaciones se pueden tipificar en (Figura 4.11:

Como resultado se obtuvo el siguiente mapa

#### 4.4.1. Delimitación zonas inundables a escala 1:25.000

A continuación el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2013) propone una serie de actividades para adelantar la delimitación de las zonas de inundación

Item de cobertura N°3	Bosques y Áreas seminaturales
3.1	Bosques
3.1.1.1.2	Bosque denso alto inundable
3.1.1.2.2	Bosque denso bajo inundable
3.1.2.1.2	Bosque abierto alto inundable
3.1.2.2.2	Bosque abierto bajo inundable
3.2	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
3.2.1.1.2	Herbazal denso inundable
3.2.2.2.2	Arbustal abierto mesófilo

Tabla 4.13: Bosques y Áreas seminaturales

Fuente:(Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2013)

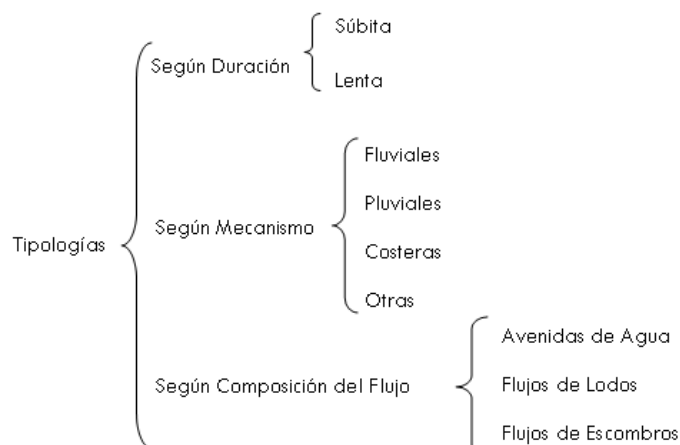


Figura 4.11: Tipificación de las inundaciones

Fuente:(Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, 2013)

considerando una escala de 1:25.000:

1. Consultar la cartografía básica disponible en formato digital o análogo (IGAC) a escala 1:25.000, priorizando las zonas afectadas y los centros urbanos.
2. Realizar el inventario de estaciones hidroclimáticas, las variables con información y el período de registro
3. Identificar los mecanismos predominantes que ocasionan las inundaciones (Fluvial, pluvial, costero, otros).
4. Revisar los eventos históricos y priorizar las áreas con mayor recurrencia de inundaciones.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DE LAS AMENAZAS

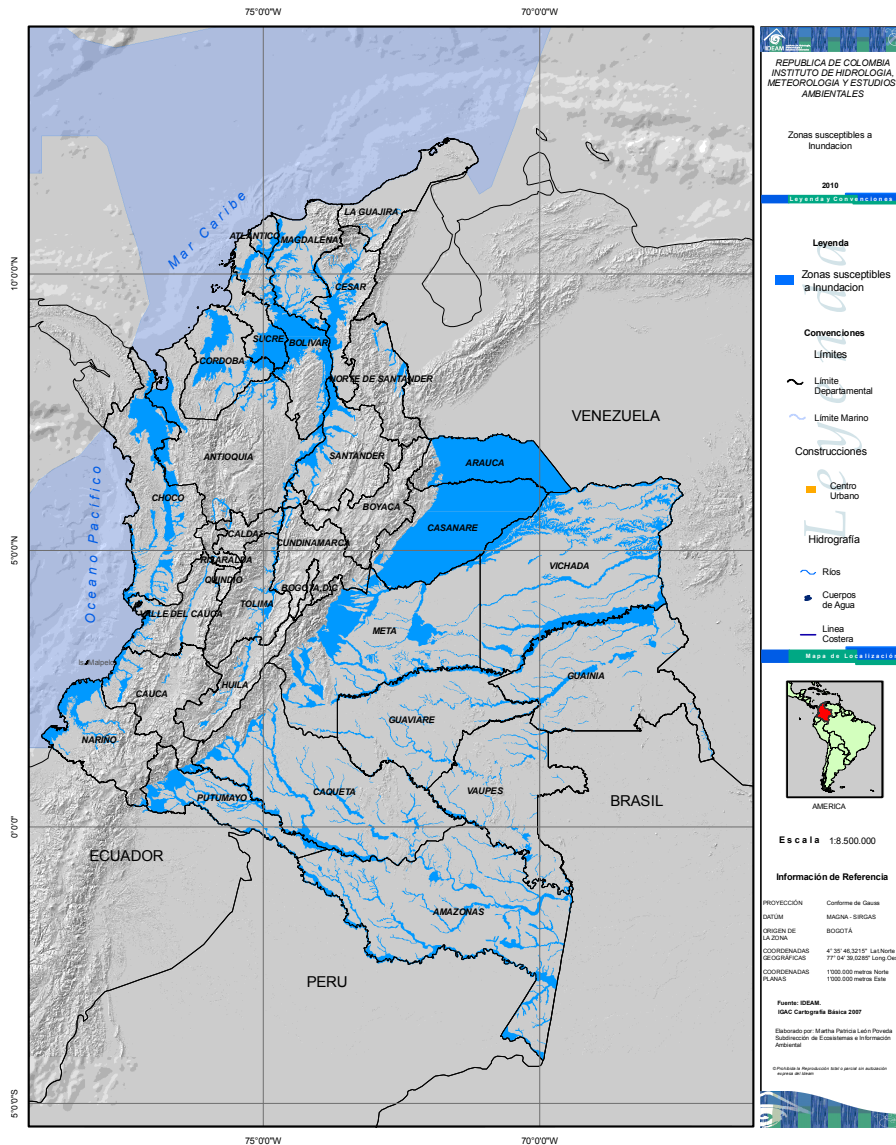


Figura 4.12: Zonas susceptibles a inundaciones

5. Identificar tipo y fecha de las inundaciones, frecuencia de los eventos y número de personas y viviendas afectadas.
6. Determinar huellas de las crecientes y en caso de contar con información de estaciones hidrológicas relacionarlas con la información de niveles registrados.
7. En el caso de contar con información geomorfológica a escala 1:25.000 ésta puede utilizarse para aplicar métodos geológicos y geomorfológicos que se basan en la tipología de las formas del terreno y los depósitos generados a partir de eventos de



inundaciones para delimitar las áreas geomorfológicamente activas dentro del cauce fluvial, su frecuencia cualitativa de inundación, e incluso inferir órdenes de extensión de parámetros como la profundidad, velocidad de la corriente o carga sólida transportada. Ante la ausencia de información geomorfológica pueden usarse como insumo mapas de suelo que ofrecen información de soporte como relieve, material parental, componentes taxonómicos y perfil de suelo, así como características básicas de las unidades de suelo.

8. Para lograr delimitar la zona afectada por la inundación se requieren imágenes de sensores remotos con resolución inferior a 10 m de pixel.
  9. En donde la extensión de las zonas afectadas no es identificable a través de las técnicas de sensores remotos, se deben adelantar levantamientos topográficos, teniendo en cuenta las huellas de inundación reciente y/o a partir del conocimiento de los pobladores sobre la ocurrencia de eventos extremos.
  10. Con la cartografía detallada y los levantamientos topográficos en campo se puede elaborar un modelo digital de terreno para visualizar la mancha de inundación y sus diferentes niveles de amenaza.
  11. Para la determinación de amenazas (Alta, Media y Baja), se deben utilizar los diferentes Períodos de Retorno (Tr) a través de un análisis de frecuencias. Como alternativa en caso de no contar con información proveniente de estaciones hidrológicas, se puede recurrir al conocimiento de los pobladores sobre la presencia de eventos extremos ocurridos en años anteriores e incorporar estos datos en un sistema de información geográfico.
  12. Para determinar los diferentes niveles de inundación se puede utilizar como primera aproximación los métodos hidrológicos que se basan en funciones de conversión de variables meteorológicas (fundamentalmente precipitación, radiación, evapotranspiración, y rocío) a escorrentía superficial (caudales) Algunos de estos métodos que se podrían utilizar son: Método Racional, Hidrogramas Sintéticos, William y Hann, Snyder, S.C.S, Avenida Máxima Probable (PMF), Modelación Hidrológica Distribuida (Modelo TETIS, Modelo de Tanques). De contarse con información más detallada (levantamientos topográficos detallados y secciones transversales del río) se pueden usar modelos hidrológicos-hidráulicos, que cubren un amplio espectro y entre los cuales se puede mencionar como los más usados: HecRas, FLOW 2D, Win River, Mike
- 11.

#### 4.4.2. Delimitación zonas inundables a escala 1:5.000

El Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2013) propone que para determinar la zonas inundables en áreas urbanas una escala a 1:5.000 se requieren las siguientes actividades:

1. Consulta cartografía básica disponible en formato digital o análogo (IGAC), que deberá ser digitalizado para los centros urbanos a analizar, con el mayor nivel de detalle.
2. Revisión de eventos históricos En la cual se analiza tipo y fecha de las inundaciones, la frecuencia de los eventos de inundación de la zona, la identificación del número de personas y viviendas afectadas, a partir de información secundaria.
3. Levantamiento Topográfico tomando como base la cartografía disponible para las zonas urbanas que históricamente presentan más amenaza y periodicidad en inundaciones y georeferenciación de estos puntos.
4. Determinar huellas de las crecientes y en caso de contar con información de estaciones hidrológicas relacionarlas con la información de niveles registrados.
5. Efectuar levantamientos topográficos de la zona afectada por la inundación y secciones transversales del río, ciénaga o laguna (batimetría) con distancias entre secciones del orden de 250 metros. En sitios con infraestructura particularmente vulnerable (puentes, pontones, asentamientos humanos) es recomendable generar secciones con menor distanciamiento entre sí.
6. Incorporar la información topográfica al detalle que se levantó en el terreno y la información batimétrica levantada en campo.
7. Con la cartografía detallada y los levantamientos hidro-topográficos en campo se puede elaborar un modelo digital de terreno para visualizar la mancha de inundación y sus diferentes niveles de amenaza.
8. Para determinación de las amenazas (Alta, Media y Baja), se deben utilizar los diferentes Períodos de Retorno ( $T_r$ ) a través de un análisis de frecuencias.
9. Para determinar los diferentes niveles de inundación se puede utilizar modelos hidrológicos-hidráulicos, que cubren un amplio espectro.

## Capítulo 5

# Tratamiento de las amenazas

A continuación se explican cada uno de los pasos realizados para identificar la amenaza a escala municipal. Posterior a ello, se genera los caminos de representación de cada amenaza y por último se presenta la ecuación que se empleara para la determinación de la amenaza total.

### 5.1. Geoprocesamiento

Este trabajo pudo obtener la información de las amenazas por movimiento en masa, sísmica, inundación y vulcanismo. Cada tipo de amenaza tiene una cuantificación diferente por lo que fue necesario adelantar un tratamiento diferenciado para cada una de ellas. El resultado del tratamiento permite posteriormente comparar el nivel de amenaza, operarlas entre ellas y emplearlas en la determinación de riesgo.

En tal sentido, para cada amenaza se definió niveles cuantitativos y cualitativos:

- Amenaza por inundación y vulcanismo se definió tres niveles: amenaza alta -3, amenaza media -2 y amenaza baja -1
- Amenaza sísmica y movimiento en masa se definió cinco niveles: amenaza alta -5, amenaza media alta -4, amenaza intermedia -3, amenaza baja -2 y amenaza muy baja -1.

Más adelante se indicará por cada tipo de amenaza cómo se obtuvo el nivel de amenaza.

Considerando que la información de las amenazas por movimiento en masa, inundación y vulcanismo no se encontraban detalladas a escala municipal y que para el presente trabajo la escala de referencia es municipal, se procedió a establecer y a cuantificar el área de

amenaza que pudiese tener cada municipio. Por lo que se empleó un sistema de información geográfica (ArcGIS) como herramienta de referencia espacial y geográfica. A través del uso de esta, se adelantó un geoprocésamiento de intersección entre el mapa de la amenaza (shape tipo amenaza) y el mapa de la división municipal (shape municipal). El resultado obtenido logró identificar a nivel municipal los diferentes niveles de amenaza. Este geoprocésamiento permite sobreponer en este caso dos capas y crear una nueva (Ver Figura 5.1).

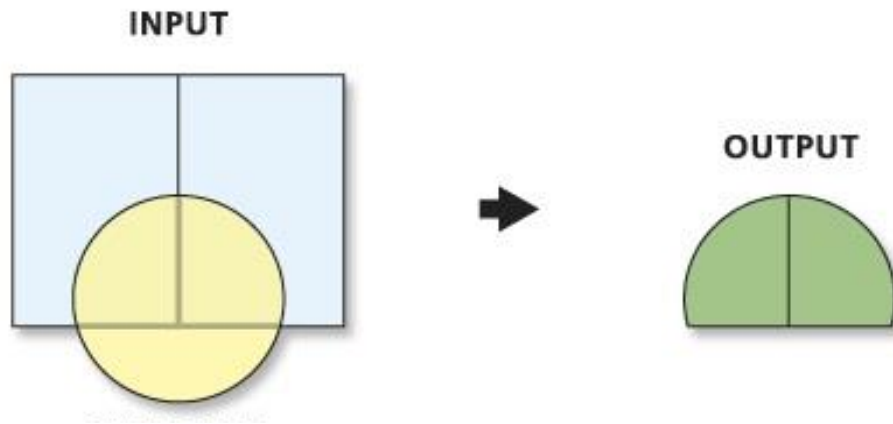


Figura 5.1: Ilustración intersección  
Fuente: <http://help.arcgis.com/>

Una vez obtenida la nueva capa, fue necesario calcular el área de intersección. Para lo cual bajo el sistema de información geográfica ArcGis, se abre la tabla de atributos del nuevo shape y se debe actualizar el campo donde se encuentra el área del nuevo polígono. Con click derecho sobre la columna del atributo correspondiente a las áreas se selecciona Calculate Geometry, se especifica la unidad de medida en la que se requiere la información que en este caso es hectáreas y se obtiene el área de cada nivel de amenaza a escala municipal. La sumatoria de las áreas de cada nivel de amenaza debe ser igual al área total del municipio.

Recalculada las áreas de los diferentes niveles de amenaza a escala municipal, se procedió a ponderar la amenaza. Para lo cual se empleó la siguiente ecuación:

$$A_p = \frac{\sum_{i=1}^n Ana_i * Cna_i}{At_i} \quad (5.1)$$

donde,

$A_p$  = Amenaza ponderada  
 $Ana_i$  = Área del nivel de la amenaza  $i$   
 $Cna_i$  = Nivel cuantitativo de la amenaza  $i$   
 $At_i$  = Área total del municipio  $i$   
 $n$  = Diferentes niveles de amenaza

Con los resultados generados por la ponderación de la amenaza, el siguiente paso fue el de estandarizar dichos valores.

$$Ae = \frac{A_p - A_{p_{min}}}{A_{p_{max}} - A_{p_{min}}} \quad (5.2)$$

donde,

$Ae$  = Amenaza estandarizada

$A_p$  = Amenaza ponderada

$A_{p_{min}}$  = Valor mínimo del grupo de datos de la amenaza ponderada

$A_{p_{max}}$  = Valor máximo del grupo de datos de la amenaza ponderada

Por consiguiente, el proceso de asignación de los valores de preferencia corresponderá a un intervalo entre:

$$Ae = 0 \text{ y } 1$$

## 5.2. Procesamiento de las amenazas

### 5.2.1. Amenaza sísmica

La información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano relacionada con la amenaza sísmica presenta las siguientes características:

- La amenaza sísmica se detalla a nivel municipal. Por lo que no fue necesario ejecutar el geoprocamiento de intersección.
- Los valores de amenaza sísmica se encuentran expresados en valores de la aceleración horizontal  $Aa$ .

Con la información a escala municipal y a partir de los valores de la aceleración horizontal se procedió a estandarizar dicho valor para lo cual se empleo la ecuación 5.2.

### 5.2.2. Amenaza movimiento en masa

La información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano presenta las siguientes características:

- La amenaza por movimiento en masa presenta 5 criterios de clasificación cualitativa: Muy baja, baja, media, alta y muy alta.
- Cada provincia tiene asociada una área expresada en km<sup>2</sup>. Esta área varía de acuerdo con la ubicación espacial de la provincia.

Considerando que la amenaza por movimiento en masa no se encuentra a escala municipal, se adelantó el geoprosesamiento descrito en la sección 5.1.

La amenaza por movimiento en masa presenta una clasificación cualitativa, por tanto, se procedió a obtener una clasificación cuantitativa (Tabla 5.1). Este nivel cuantitativo permite la aplicación de la ecuación 5.1.

Clasificación cualitativa	Nivel cuantitativo de la amenaza
Amenaza muy baja	1
Amenaza baja	2
Amenaza media	3
Amenaza alta	4
Amenaza muy alta	5

Tabla 5.1: Clasificación cuantitativa amenaza por movimiento en masa

Una vez aplicada la ecuación 5.1, se procede a estandarizar los valores empleando la ecuación 5.2.

### 5.2.3. Amenaza por vulcanismo

La información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano relacionada con la amenaza por vulcanismo presenta las siguientes características:

- Se cuenta con información del Volcán Machin, Chiles, Galeras, Cumbal, Purace, Ruiz, Cerronegro, Nevado del Huila y Santa Isabel.
- La amenaza por vulcanismo presenta 3 criterios de clasificación cualitativa: Baja, media y alta.
- Cada criterio tiene asociada una área expresada en km<sup>2</sup>. Esta área varía de acuerdo con la ubicación espacial del volcán.

La amenaza por vulcanismo no se encuentra a escala municipal, por consiguiente, se adelantó el geoprocesamiento descrito en la sección 5.1.

Considerando las tres categorías de la amenaza, se procedió a obtener una clasificación cuantitativa (Tabla 5.2). Este nivel cuantitativo permite la operatividad de la ecuación 5.1.

Clasificación cualitativa	Nivel cuantitativo de la amenaza
Amenaza baja	1
Amenaza media	2
Amenaza alta	3

Tabla 5.2: Clasificación cuantitativa amenaza por vulcanismo

Una vez aplicada la ecuación 5.1, se procede a estandarizar los valores empleando la ecuación 5.2.

#### 5.2.4. Amenaza por inundación

La información suministrada por el Ideam presenta las siguientes características:

- La amenaza por inundación incorpora tres categorías. Cuerpos de agua, zonas inundable periódicamente y zonas susceptibles a inundación.

La amenaza por inundación no se encuentra a escala municipal, por consiguiente se adelantó el geoprocesamiento descrito en la sección 5.1.

Considerando las tres categorías de la amenaza por inundación, se procedió a obtener una clasificación cuantitativa (Tabla 5.3). Este nivel cuantitativo permite la operatividad de la ecuación 5.1.

Clasificación cualitativa	Nivel cuantitativo de la amenaza
Cuerpos de agua	1
zonas inundable periódicamente	2
zonas susceptibles a inundación	3

Tabla 5.3: Clasificación cuantitativa amenaza por inundación

Una vez aplicada la ecuación 5.1, se procede a estandarizar los valores empleando la ecuación 5.2.

### 5.3. Caminos de representación de la amenaza

Los caminos de representación de la amenaza son una herramienta que toma en consideración diferentes posibilidades de representación lineal y no lineal. Regularmente, la

representación de las amenazas se expresa a través de técnicas basadas en el modelo lineal general. Estos modelos lineales para Sanchez-Silva (2005) están representados por un sistema de ecuaciones (ver 5.4) cuya función objetivo y sus restricciones son lineales.

$$\begin{aligned} f(ax) &= af(x) \\ f(x_1 + x_2) &= f(x_1) + f(x_2) \end{aligned} \tag{5.3}$$

donde:

$a$  es una constante.

Según Acuña (2011), un sistema lineal se basa en relaciones de causa-efecto (i.e., la salida sigue fielmente los cambios producidos en la entrada) las cuales están influenciadas por patrones de control lineal. Para Fischer (2010), los modelos lineales “*proceden de modo constante, lo que significa que su tasa de cambio es fija y no se modifica*”. Al hablar de amenazas, se piensa en la magnitud de la misma y en los posibles daños que pueda ocasionar, en este sentido, bajo un crecimiento lineal a mayor magnitud crece el nivel de daño que se pueda presentar de forma proporcional (Fischer, 2010).

(Forigua and Ballesteros, 2006) señala que “*el modelo lineal tiene por desventaja que en la práctica, todos los sistemas físicos presentan un comportamiento no lineal, la mayoría de los sistemas de la vida real tienen características no lineales.*”, según Fischer (2010) un ejemplo claro del comportamiento no lineal son la población, bacterias, bancos, bosques entre otros.

Para (Fischer, 2010) el comportamiento no lineal ofrece otra visión, a través de la cual “*la trayectoria de la curva varía no de forma constante como el modelo lineal sino que su crecimiento esta influenciado por cada uno de los términos que contiene*”.

Retomando nuevamente y considerando la concepción holística de este trabajo, se planteó representar la linealidad y no linealidad de la amenaza bajo diferentes parámetro de curva. En este caso, una recta describe un crecimiento lineal la cual tiene una pendiente constante y una curva describe un comportamiento no lineal con una pendiente variable que puede ser cóncava o convexa.

Con la representación lineal y no lineal se busca identificar el comportamiento de una amenaza. Básicamente en la representación lineal de los interceptos es una línea recta. Tra-



vectoria que indica a mayor magnitud mayor nivel de amenaza. Por el contrario, cuando se representa la no linealidad el nivel de amenaza y la magnitud varía de forma tal que para una curva cóncava el gradiente de cambio de  $x$  es mayor que  $y$ . Para una curva convexa el gradiente de cambio en  $x$  es menor y mayor en  $y$ .

El resultado representará tres caminos de comportamiento: uno lineal, dos no lineales concavo y convexo. La representación de los caminos se realizará para cada tipo de amenaza. La Figura 5.2 representa para la amenaza sísmica los tres tipos de caminos de comportamiento .

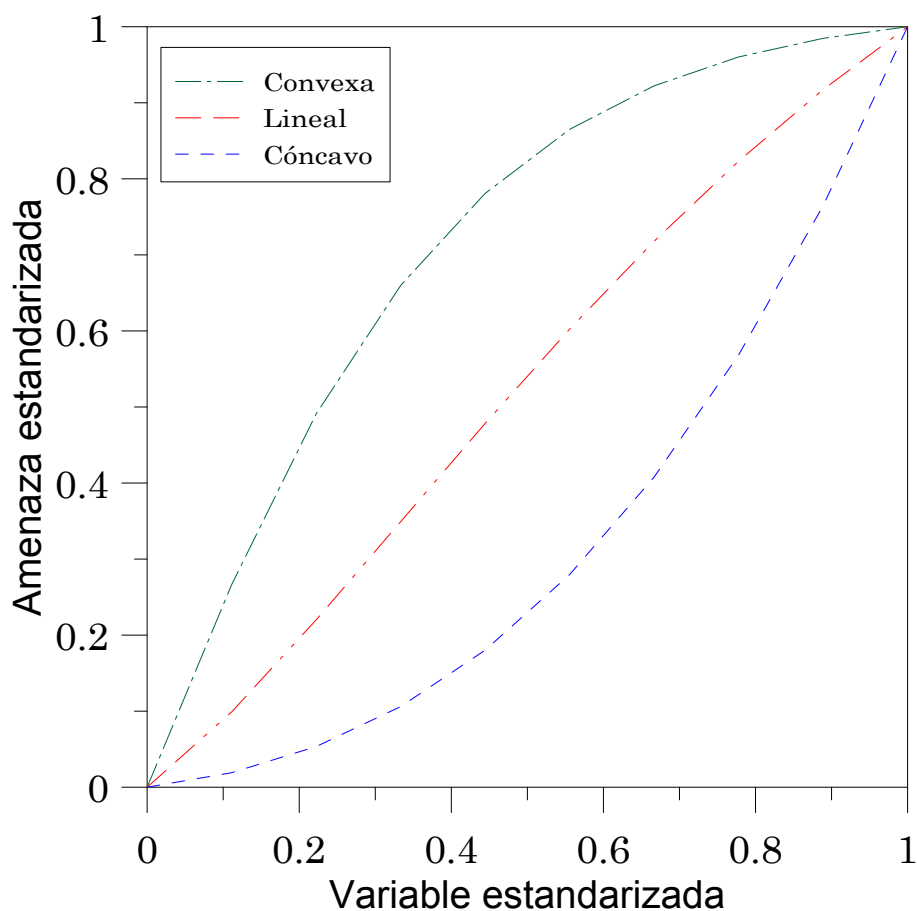


Figura 5.2: Escenarios de representación de la amenaza sísmica

Para la construcción de los caminos de representación de la amenaza se considera la siguiente ecuación 5.4 tomada de Parra (2013)

$$ERA = (1 - \alpha^{Ae})^{(1-Ae)} \quad (5.4)$$

donde:

ERA = Caminos de representación de la amenaza

$\alpha$  = Factor parámetro de curva. Representa los diferentes escenarios de comportamiento de la amenaza estandarizada Ae. Dicho factor se encuentra representando entre 0 y 1

Ae= Valor de la amenaza estandarizada. Tomado de la ecuación 5.2

Fueron seleccionados tres parametros de comportamiento de la amenaza:

- $\alpha 0.1$  = Camino convexo
- $\alpha 0.5$  = Camino lineal
- $\alpha 0.9$  = Camino concavo

Adicionalmente, se busco que la ecuación 5.4 cumpliera las siguientes condiciones:

- Cuando el Ae = 0, ERA = 0
- Cuando el Ae = 1, ERA = 1
- Para cualquier valor de  $\alpha$  e Ae,  $0 \geq ERA \leq 1$ .

#### 5.4. Determinación amenaza total

Una vez realizada la representación de los caminos, se deberá elegir cual de los camino representa mejor la amenaza, considerando criterios como: la probabilidad de ocurrencia que fue empleado para determinar el tipo de amenaza, el daño que genera entre otros. Una vez seleccionados los diferentes caminos de representación y retomando los valores obtenidos de la matriz principal para amenazas del modelo AHP, los diferentes caminos serán afectados por dicho valor del experto, de manera que el resultado de este producto es obtener la amenaza total.

Para lo cual se emplea la siguiente ecuación:

$$A_t = \frac{\sum (ERA_i * Wa_i)}{\sum Wa} \quad (5.5)$$

donde:

$A_t$  = Amenaza total

$ERA_i$  = Camino de representación seleccionado de la amenaza

$Wa_i$  = Peso del experto de la amenaza

Con base en lo anterior se obtiene el valor de la amenaza total, la cual será uno de los insumos para determinar el riesgo.

## 5.5. Modelo AHP para la amenaza

Tal y como se indicó en el capítulo 3, uno de los pasos es la selección de expertos, los cuales se definieron por cada una de las amenazas. A continuación se detallan los perfiles profesionales, investigativos y laborales de cada uno de ellos:

### ▪ Amenaza sísmica

- **Maria Luisa Bermúdez.** Actualmente trabaja en una firma de consultoría KMA construcciones dedicada a la construcción de vías y sistema de acueducto y alcantarillado.
- **Mauricio Gallego Silva.** Estudió Ingeniería Civil en la Universidad Santo Tomás De Aquino tiene una maestría en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

### ▪ Amenaza por inundación y avenida torrencial

- **Nelsy Verdugo.** Ingeniera Civil, Especialista en Recursos Hídricos, modelación matemática de procesos hidrológicos y formulación e implementación de proyectos sobre humedales colombianos. En la actualidad es funcionaria de la Subdirección de Hidrología del IDEAM
- **Elvia Romero.** Ingeniera Civil, Especialista en Análisis Espacial, con experiencia en planificación y supervisión de actividades de gestión del riesgo en empresas prestadoras de servicio público de acueducto y alcantarillado. Actualmente trabaja con la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá
- **Jaime Andrés Lara Borrero.** Profesor Asociado y director de la Maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá. Ingeniero Civil la Pontificia Universidad Javeriana, MSc en Ingeniería y Gestión Ambiental

de la Universidad Politécnica de Cataluña y PhD en Territorio y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Madrid.

### ■ **Amenaza volcánica**

- **Martha Calvache.** Geóloga de la Universidad Nacional de Colombia, con Maestría de Louisiana State University de Estados Unidos, Doctorado de Arizona State University de Estados Unidos, Postdoctorado en Hokaido University en Japón. Actualmente es Directora Técnica Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS) y Subdirectora de amenazas geológicas. Ha sido Directora del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto. Jefe del proyecto de Investigación en Volcanes. Geóloga del Observatorio Vulcanológico de Manizales y Geóloga del Proyecto de Geotermia de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC).

### ■ **Amenaza por deslizamientos**

- **Alfonso Mariano Ramos.** Es ingeniero civil de la Pontificia Universidad Javeriana, Doctorado Universidad de los Andes. Magister de la Universidad Nacional de Colombia de 2000. En la actualidad es Subdirector del Instituto Geofísico Pontificia Universidad Javeriana Bogotá y líder del grupo de investigación Riesgo en sistemas naturales y antrópicos. Actividades de investigación ha sido:  
Variables de la microzonificación sísmica de Bogotá Febrero 2005 Mayo 2005  
Atenuación energía sísmica en la parte norte de Suramérica Mayo 2005  
Vulnerabilidad económica de puentes , viaductos y túneles de la carretera Bogotá - Villavicencio Febrero 2005 Mayo 2007  
Metodologías para diseño sísmico Agosto 2004  
Vulnerabilidad económica carretera Bogotá Villavicencio - materiales térreos Mayo 2004 Octubre 2004  
Actualización catálogo de los terremotos en Colombia Marzo 2004 Febrero 2005  
Teoría de Tsunamis Diciembre 2004 Febrero 2005  
Amenazas por deslizamientos Febrero 2003 Agosto 2003  
Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana Marzo 2002 Septiembre 2002  
Evaluación de la Amenaza Sísmica Local en la ciudad de Villavicencio Diciembre 1999 Junio 2000
- **Jaime Quintero Olaya.** Ingeniero Civil especialista en Patología de la Construcción, con amplia experiencia en Gestión Integral de Riesgos en el desarrollo e implementación de medidas de reducción del riesgo de tipo estructural y no

estructural, en las diferentes fases que comprenden dicha gestión. Actualmente trabaja en Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático.

### 5.5.1. Combinación diferentes opiniones de expertos

El modelo AHP ofrece un buen recurso para establecer los pesos entre las diferentes comparaciones. Estas comparaciones nos sirven para capturar el juicio de experto como ya lo hemos mencionado. A cada juicio emitido por el experto se obtiene un vector propio, el cual proporciona el peso de cada variable (criterio, alternativa).

Considerando que se tienen diferentes opiniones de expertos cada una de ellas con diferentes valores de opinión, se debe aplicar el método de combinación lineal de opiniones de varios expertos sobre una misma variable (López and Dolado, 2009). El objetivo es obtener un solo y único valor para cada variable para que al final se consiga un valor global para la amenaza.

Dicho método de combinación lineal de opiniones responde a la siguiente ecuación 7.6:

$$x = X_1E_1 + X_2E_2 + \dots + X_nE_n = \sum_{i=1}^n X_iE_i \quad (5.6)$$

Donde:

X= Conjunto de vectores propios.

E = Factor peso de cada experto.

Por tanto se obtendrá una valor global por cada componente

### 5.5.2. Modelo jerárquico para la amenaza

Como ya se había mencionado en el capítulo 4, en esta sección se busca identificar que tipo de amenaza presenta más relevancia cuando se comparan entre ellas para cada uno de los componentes de los SAAP.

En tal sentido, considerando la estructura del modelo propuesto por Saaty (1988), en el que plantea tres etapas para la construcción de la estructura jerárquica, la Figura 5.3 muestra cada una de las etapas (problema/objetivo, criterios y alternativas):

Dicha jerarquía estableció los siguientes niveles que a continuación se describen:

## CAPÍTULO 5. TRATAMIENTO DE LAS AMENAZAS

<b>Experto 1</b>	<b>Fuente de abastecimiento</b>	<b>Captación</b>	<b>Aducción</b>	<b>PTAP</b>	<b>Conducción</b>	<b>Red de distribución</b>
	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>
Avenida Torrencial						
Huracán						
Sismo						
Inundación						
Deslizamiento						
Sequía						
Vulcanismo						
Tsunami						

<b>Experto 2</b>	<b>Fuente de abastecimiento</b>	<b>Captación</b>	<b>Aducción</b>	<b>PTAP</b>	<b>Conducción</b>	<b>Red de distribución</b>
	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>
Avenida Torrencial						
Huracán						
Sismo						
Inundación						
Deslizamiento						
Sequía						
Vulcanismo						
Tsunami						

<b>Experto n...</b>	<b>Fuente de abastecimiento</b>	<b>Captación</b>	<b>Aducción</b>	<b>PTAP</b>	<b>Conducción</b>	<b>Red de distribución</b>
	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>	<b>Pesos alternativa</b>
Avenida Torrencial						
Huracán						
Sismo						
Inundación						
Deslizamiento						
Sequía						
Vulcanismo						
Tsunami						

<b>Combinación lineal</b>	<b>Fuente de abastecimiento</b>	<b>Captación</b>	<b>Aducción</b>	<b>PTAP</b>	<b>Conducción</b>	<b>Red de distribución</b>
Avenida Torrencial						
Huracán						
Sismo						
Inundación						
Deslizamiento						
Sequía						
Vulcanismo						
Tsunami						

Tabla 5.4: Combinación lineal opinión de expertos. Matriz de alternativas amenaza

- Nivel I Identificación del problema u objetivo.** En esta fase se pretende identificar por cada componente estructural que tipo de amenaza presenta la mayor relevancia comparadas entre ellas. En este sentido, se formuló la siguiente pregunta a cada uno de los expertos: ¿En orden descendente que tipo de amenaza considera usted que puede causar mayor afectación sobre el componente (fuente de abastecimiento, captación aducción, potabilización, conducción y red de distribución en consideración con la magnitud, ubicación geográfica, frecuencia)?
- Nivel II Criterios.** Como se puede observar en la Figura 5.3 la jerarquía considera tres criterios: Magnitud: (propiedad de la amenaza la cual está relacionada con la cantidad de energía liberada durante el desarrollo específico del fenómeno), la ubicación geográfica (la localización de un sitio con base en sus características geográficas)

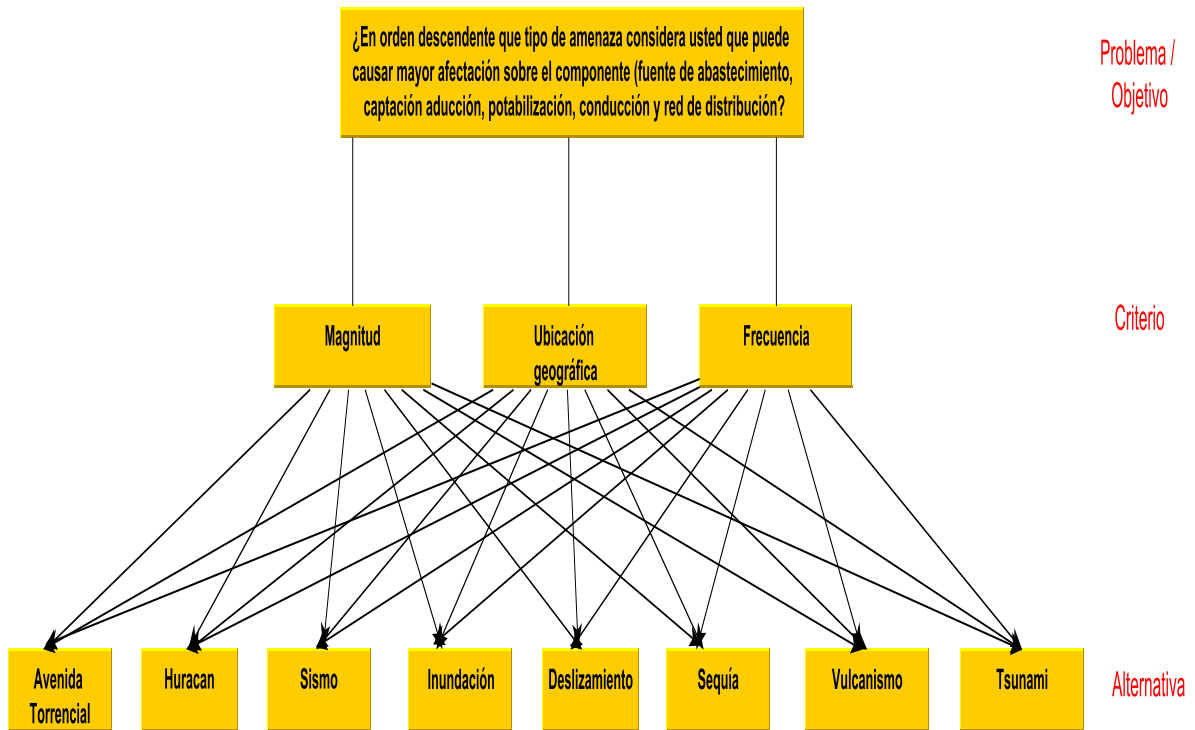


Figura 5.3: Estructura del modelo jerárquico para la amenaza  
Fuente: El autor

y la frecuencia (número de eventos amenazantes presentados en un periodo de tiempo determinado).

- Nivel III Alternativas.** Se consideraron 8 alternativas. Cada una de ellas representa las diferentes amenazas que pueden presentarse (e.i., Avenida torrencial, Huracan, Sismo, Inundación, Deslizamiento, Sequía, Vulcanismo y Tsunami).

El modelo AHP, plantea que para adelantar la calificación a través de la escala de los juicios de importancia, se debe realizar la matriz de comparación por pares de los elementos del mismo nivel de la jerarquía propuesta. Estas matrices cuadradas reflejan el predominio relativo de un elemento frente a otro respecto a un componente de los SAAP. Este proceso de comparación conduce a establecer pesos entre dichos elementos del mismo nivel.

#### ▪ Matriz de comparación de criterios

Los criterios definidos para determinar la importancia relativa de las amenazas son la magnitud, ubicación geográfica y frecuencia. Dichos criterios resultan ser determinantes

para realizar una evaluación de la amenaza.

Estos tres criterios fueron comparados entre ellos mediante una matriz de comparación, la cual se realizó por cada uno de los componentes de los SAAP. Por tanto se planteó una interrogante para determinar la preferencia de cada experto: ¿Para usted cuál criterio (comparados entre ellos) resulta tener una mayor importancia cuando se puede afectar el componente de (fuentes de abastecimiento, captación, aducción, planta de potabilización, conducción y red de distribución) por la materialización de una amenaza?.

Con base en la anterior pregunta, a cada experto le fue entregado la siguiente matriz de comparación de criterios (Ver Tabla 5.5):

### ▪ Matriz de comparación de alternativas

El paso a seguir es el de evaluar las alternativas. Para lo cual se planteó a cada experto la siguiente interrogante ¿En orden descendente que tipo de amenaza considera usted que puede causar mayor afectación sobre el componente(fuentes de abastecimiento, captación, aducción, planta de potabilización, conducción y red de distribución), considerando el criterio (magnitud, ubicación geográfica y frecuencia)?.

Al igual que lo anterior se estableció la siguiente matriz (Ver Tabla 5.6):

### 5.5.3. Establecimiento de las prioridades - AHP

Los pasos principales a tener en cuenta en el desarrollo de esta metodología son:

- Diseño del modelo AHP para el juicio de experto (ver sección 3.2)
- Selección de expertos para la amenaza y vulnerabilidad los cuales fueron mencionados en la sección 3.2
- Entrevista para asignar el valor de prioridad al criterio y alternativa
- Establecimiento de las prioridades derivadas de las valoraciones realizadas por los expertos para la amenaza y vulnerabilidad tanto en la matriz principal como secundaria.

El producto del método AHP se describe a continuación



<b>Criterios matriz principal amenazas</b>			
<b>Fuente de abastecimiento</b>	Magnitud	Ubicación geográfica	Frecuencia
Magnitud	1		
Ubicación geográfica		1	
Frecuencia			1
<b>Captación</b>	Magnitud	Ubicación geográfica	Frecuencia
Magnitud	1		
Ubicación geográfica		1	
Frecuencia			1
<b>Aducción</b>	Magnitud	Ubicación geográfica	Frecuencia
Magnitud	1		
Ubicación geográfica		1	
Frecuencia			1
<b>Potabilización</b>	Magnitud	Ubicación geográfica	Frecuencia
Magnitud	1		
Ubicación geográfica		1	
Frecuencia			1
<b>Conducción</b>	Magnitud	Ubicación geográfica	Frecuencia
Magnitud	1		
Ubicación geográfica		1	
Frecuencia			1
<b>Red de distribución</b>	Magnitud	Ubicación geográfica	Frecuencia
Magnitud	1		
Ubicación geográfica		1	
Frecuencia			1

Tabla 5.5: Matriz criterios amenazas

#### 5.5.4. Matriz principal amenaza

##### 5.5.4.1. Prioridades entre los criterios y alternativas

A partir de la calificación realizada por cada uno de los expertos de las amenazas, se construyó una matriz con los diferentes resultados obtenidos por tipo de componente. La

## CAPÍTULO 5. TRATAMIENTO DE LAS AMENAZAS

Alternativas matriz principal amenazas								
Componente								
Magnitud	Avenida Torrencial	Huracan	Sismo	Inundación	Deslizamiento	Sequía	Vulcanismo	Tsunami
Avenida Torrencial	1							
Huracan		1						
Sismo			1					
Inundación				1				
Deslizamiento					1			
Sequía						1		
Vulcanismo							1	
Tsunami								1

Ubicación geográfica	Avenida Torrencial	Huracan	Sismo	Inundación	Deslizamiento	Sequía	Vulcanismo	Tsunami
Avenida Torrencial	1							
Huracan		1						
Sismo			1					
Inundación				1				
Deslizamiento					1			
Sequía						1		
Vulcanismo							1	
Tsunami								1

Frecuencia	Avenida Torrencial	Huracan	Sismo	Inundación	Deslizamiento	Sequía	Vulcanismo	Tsunami
Avenida Torrencial	1							
Huracan		1						
Sismo			1					
Inundación				1				
Deslizamiento					1			
Sequía						1		
Vulcanismo							1	
Tsunami								1

Tabla 5.6: Matriz de alternativas amenazas

Tabla 5.7 y la Tabla 5.8 proporcionan las diferentes prioridades para identificar el tipo de amenaza más representativa para cada componente estructural de los SAAP.

Componente	Magnitud	Ubicación geográfica	Frecuencia
Fuente	0,39	<b>0,40</b>	0,20
Captación	0,40	<b>0,43</b>	0,18
Aducción	<b>0,59</b>	0,27	0,15
PTAP	<b>0,51</b>	0,34	0,14
Conducción	<b>0,51</b>	0,27	0,22
Red Distribución	<b>0,49</b>	0,30	0,21

Tabla 5.7: Pesos para los criterios matriz principal amenaza

5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

Amenazas	Fuente	Captación	Aducción	PTAP	Conducción	Red Distribución
Avenida Torrencial	0,17	<b>0,20</b>	<b>0,18</b>	<b>0,19</b>	0,15	0,16
Huracan	0,09	0,10	0,11	0,09	0,12	0,10
Sismo	0,11	0,14	0,15	0,15	0,14	0,15
Inundación	0,12	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10
Deslizamiento	0,15	0,17	0,15	0,17	<b>0,17</b>	<b>0,16</b>
Sequía	<b>0,17</b>	0,11	0,08	0,09	0,08	0,07
Vulcanismo	0,09	0,10	0,12	0,12	0,13	0,14
Tsunami	0,09	0,09	0,12	0,09	0,10	0,11

Tabla 5.8: Pesos para las alternativas matriz principal amenaza

## 5.6. Selección representación lineal o no lineal de los diferentes tipos de amenaza y producto con el peso del experto

En la sección anterior se identificaron los pesos relativos de cada una de las amenazas de análisis y partir de la selección del camino de representación lineal y no lineal se realiza el cálculo para obtener el resultado final de el tipo de amenaza afectada por el modelo AHP.

A continuación se muestra la selección de los caminos de representación y el mapa del tipo de amenaza con el resultado final. Así mismo por cada tipo de amenaza se adelanta una comparación con los mapas oficiales del tipo de amenaza.

### 5.6.1. Amenaza sísmica

La amenaza sísmica esta relacionada con la probabilidad de que un parámetro como la aceleración, la velocidad o el desplazamiento del terreno producida por un sismo, supere o iguale un nivel de referencia. En la actualidad la variable considerada en Colombia es la aceleración máxima (a nivel de roca) ó Peak ground acceleration (PGA) (Estudio General de Amenaza Sísmica en Colombia) la cual representa el movimiento del terreno.

La información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano relacionada con las zonas de amenaza sísmica (i.e., amenaza sísmica baja, amenaza sísmica intermedia, amenaza sísmica alta) y una vez adelantados los procedimientos descritos en el capítulo 5, se obtuvo como resultado que la trayectoria cóncava representaba mejor esta amenaza (ver Figura 5.4).

Esta trayectoria cóncava fue seleccionada considerando aspectos como: Parámetro em-

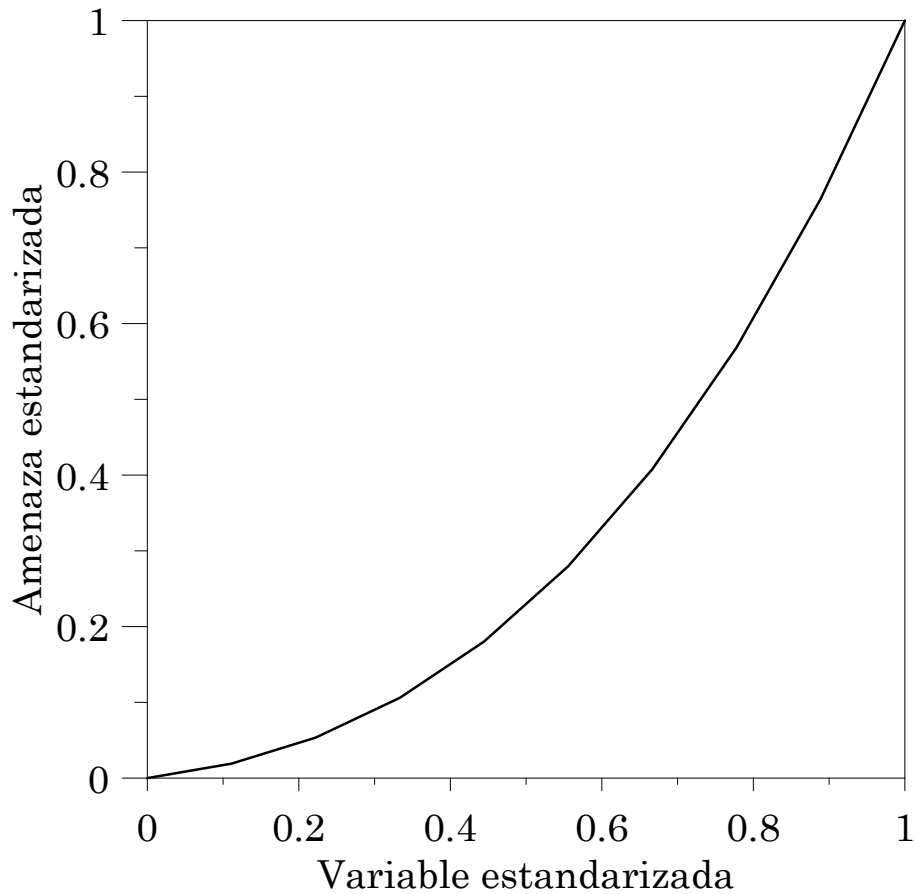


Figura 5.4: Representación amenaza sísmica trayectoria cóncava

pleado para la determinación de la amenaza (i.e., aceleración máxima), comportamiento del parámetro bajo los diferentes escenarios simulados y la relación de efectos que se pudieran presentar.

Esta representación expresa la relación entre la variable estandarizada y el nivel de la amenaza estandarizada. Dicha relación evidencia que en los primeros puntos del eje de las abscisas el cambio de posición es más rápido en relación con el eje de las ordenadas cuyo desplazamiento es menos acelerado. A lo largo de la trayectoria de la curva se observa los diferentes cambios de posición y velocidad.

Esta relación entre el aumento de la aceleración máxima y la trayectoria cóncava, permite atribuirse la siguiente interpretación. A medida que aumenta la aceleración máxima, el nivel de daño que puede ocasionar va en aumento, sin embargo en un primer momento resulta ser no significativo, es decir la presencia de un sismo de baja magnitud resulta ser

## 5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

---

imperceptible. No se presencian de daños en estructuras. En un segundo momento, se percibe el sismo, se presentan perturbaciones y hay presencia de daños menores en estructuras. El último momento, representa un sismo fuerte a muy desastroso, en esta se presentarían considerables daños en estructuras y en otras se destruirían.

A partir del producto entre esta representación y el peso de experto, se generó el mapa a escala municipal (ver Figura 5.5). En este se muestra que la zona pacífica presenta valores significativos de la amenaza (i.e., 35 a 100 %), así como algunos municipios del departamento del Meta, Arauca y Norte de Santander. Se destacan los municipios de Montería - Córdoba, Chalán Sucre los cuales presentan una amenaza del 56 % y 100 %. En la región andina no se evidencia bajo esta trayectoria valores importantes de la amenaza, en su gran mayoría se encuentran valores entre 18 y 35 %. Gran parte de la Orinoquía y Amazonia así como de la Costa Atlántica registran valores cercanos al 0 %.

Se comparó el resultado obtenido con el mapa de amenaza sísmica para Colombia del año 2010 suministrado por el Servicio Geológico Colombiano SGS, en dicha comparación se pueden distinguir:

- Áreas geográficas similares que presentan similitud en el nivel de amenaza. Un ejemplo de esto son algunos municipios de la región Pacífica, Caribe, Orinoquía y Amazonia.
- Se presentan diferencias en la zona Andina (parte media y alta), donde el nivel de amenaza que se obtuvo es menor al que presenta en el mapa de amenaza sísmica del SGS. Esta situación está influenciada por la estandarización de los niveles de amenaza del SGS, así como en la selección de la representación de la no linealidad hacen que dicho comportamiento sea atenuado, ya que cómo se indicó anteriormente el comportamiento de la amenaza sísmica no es una representación lineal.

A partir de la trayectoria seleccionada la Tabla 5.9 muestra el número de municipios que se ubican en el nivel de amenaza (i.e., 0= valor mínimo de amenaza sísmica, 1=valor máximo de la amenaza sísmica), así como la participación (%) de los municipios en relación al nivel.

De la tabla ?? se observa que 74 municipios se encuentran ubicados en niveles superiores del 0.40.

En la figura 5.6, se puede apreciar:

- Que todos los departamentos de la región pacífica se encuentran con un nivel superior al 0.40 (Chocó, Valle del Cauca, Cauca, Nariño). Esta región concentran 44 municipios.

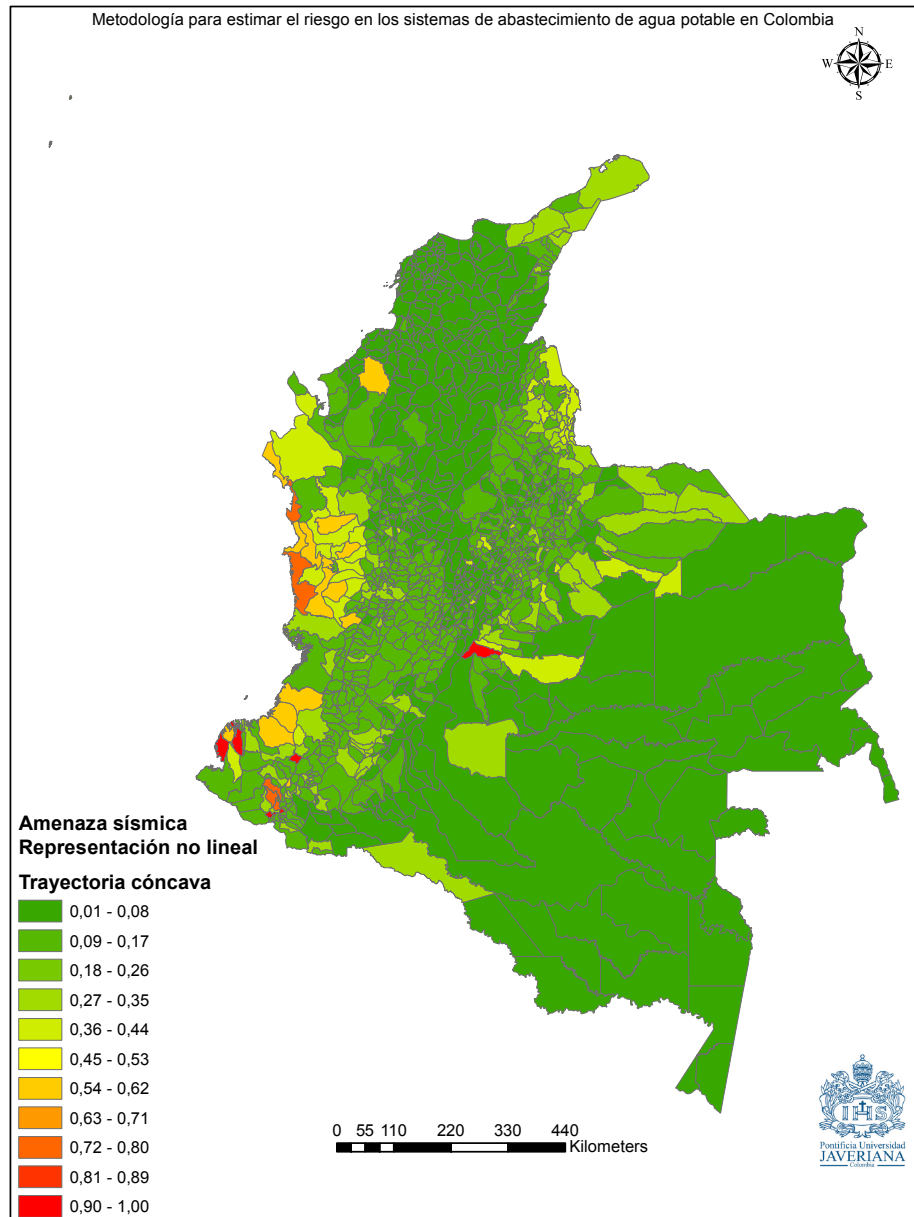


Figura 5.5: Mapa representación de la amenaza sísmica bajo un escenario de no linealidad

- En tres departamentos de la región Caribe (Bolívar, Córdoba y Sucre) se concentran 4 municipios
- En cuatro departamentos de la región Andina (Antioquía, Boyacá, Cundinamarca, Norte de Santander) se registran 20 municipios.

5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

Nivel de amenaza	Número de municipios	Participación (%)
0	56	5
0,01	147	13
0,05	276	25
0,10	172	15
0,18	305	27
0,27	92	8
0,40	41	4
0,56	16	1
0,76	7	1
1	10	1
<b>Total</b>	<b>1123</b>	<b>100</b>

Tabla 5.9: Número de municipios en nivel de amenaza

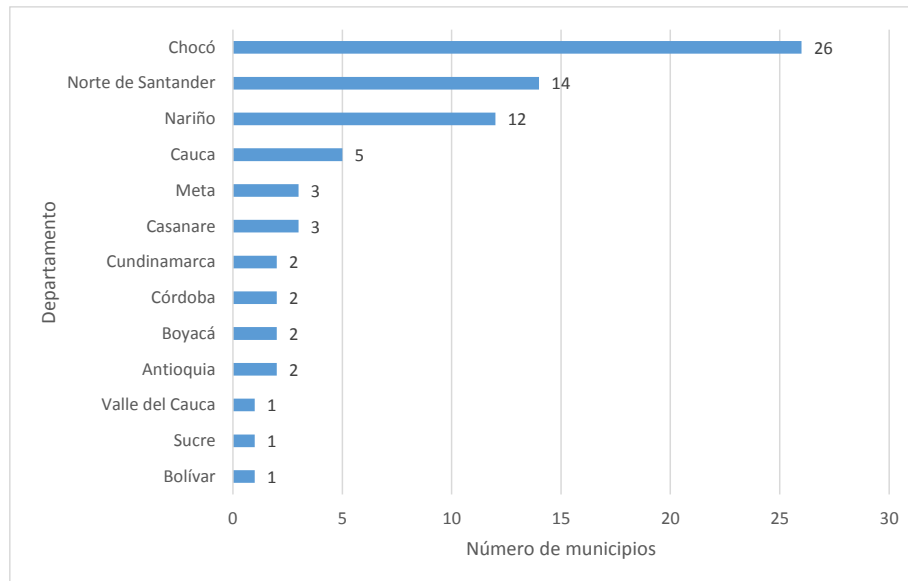


Figura 5.6: Concentración de municipios con amenaza sísmica en nivel superior a 0.40

- En dos departamentos de la Orinoquía (Casanare y Meta) se presentan 6 municipios.

En términos del número de empresas que realizan la prestación del servicio de acueducto, se identificó que se encuentran expuestas ante este nivel de amenaza 99 de ellas. Adicionalmente, en 9 municipios se desconoce cuantas empresas realizan la operación de los SAAP, por lo que el número de SAAP puede aumentar. Dentro del grupo de 99 empresas, llama la atención que se encuentran los municipios de Quibdó en Chocó, Mosquera en Cundinamarca, Cúcuta, Los Patios y Villa del Rosario (área metropolitana de Cúcuta) en Norte de Santander y en el departamento del Valle del Cauca Buenaventura. Todos estos municipios concentran un número importante de usuarios del servicio de acueducto.

Para el nivel entre 0.18 y 0.27 del nivel de amenaza se encuentran 397 municipios a los cuales les corresponde 390 empresas. La Figura 5.7 muestra esta relación.

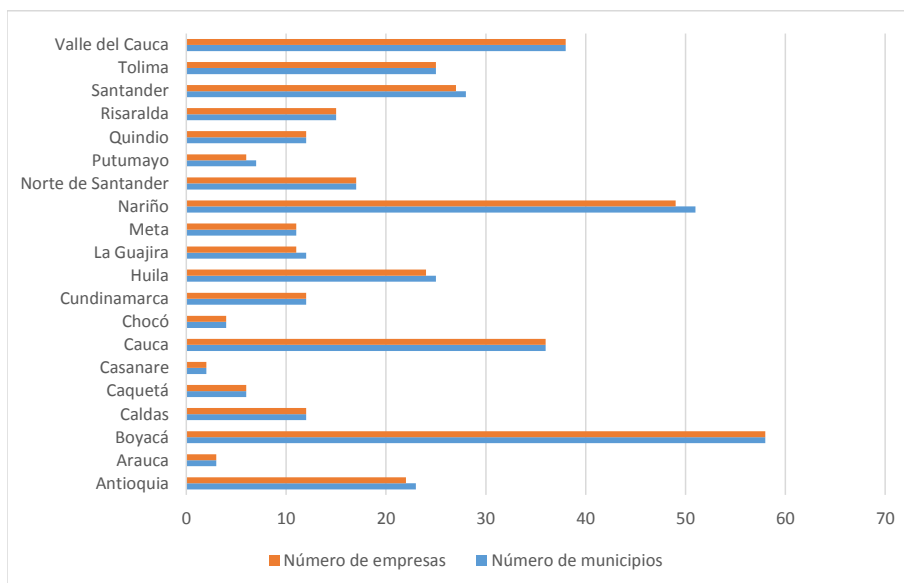


Figura 5.7: Concentración de municipios con amenaza sísmica en nivel medio 0.18 a 0.27

### 5.6.2. Amenaza por movimiento en masa

La amenaza por movimiento en masa está relacionada con la identificación de zonas de susceptibilidad y amenaza relativa por movimiento en masa. La información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano relaciona la clasificación de zonas de inestabilidad de laderas en el país.

Los criterios empleados por el Servicio Geológico Colombiano para determinar dicha zonas fueron variables cualitativas (geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra) y variables cuantitativas (pendiente, longitud de la pendiente, rugosidad y acuenca), variables que fueron explicadas en el capítulo 4.1.

Una vez adelantados los procedimientos descritos en el capítulo 5, se obtuvo como resultado que la amenaza por movimiento en masa se representaba mejor bajo la trayectoria no lineal cóncavo.

Esta trayectoria representa la relación entre la variable estandarizada y la amenaza estandarizada. Dicha relación evidencia que en los primeros puntos del eje de las abscisas el



## 5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

---

cambio de posición es más rápido en relación con el eje de las ordenadas cuyo desplazamiento es menos acelerado. A lo largo de la trayectoria de la curva se observa los diferentes cambios de posición y velocidad, en la medida en que se desplaza la trayectoria se van haciendo más notorias las variaciones en ambos ejes.

Esta relación entre el aumento de las zonas de inestabilidad y la trayectoria cóncava, permite atribuirse la siguiente interpretación. A medida que aumenta la zona de inestabilidad el nivel de daño va en aumento, sin embargo en un primer momento resulta ser no significativo, resulta ser mínimo. En un segundo momento, en el cual se va expandiendo las zonas de inestabilidad se presentan perturbaciones y la existencia daños menores. El último momento, representa zonas con susceptibilidad a la inestabilidad, en esta se presentarían considerables daños en estructuras física y naturales y en otras se destruirían.

El resultado de esta representación cóncava y el peso de experto, se generó el mapa a escala municipal (ver Figura 5.8) muestra que la zona andina presenta valores significativos (i.e., 45 a 100 %). Algunas zonas de la región Caribe presentan valores entre el 18 y 26 %. Gran parte de la Orinoquía y Amazonia así como el occidente y centro de la Costa Atlántica registran valores cercanos al 0 %. La zona pacífica registran valores entre 9 y 26 %. Esta situación comparativamente frente al mapa de amenaza relativa por movimientos en masa del SGC, muestra que:

- Existen zonas en la región andina, la parte alta de la región caribe y parte alta de la región pacífica con niveles más bajos, que los presentados por el SGC. Esta situación obedece principalmente a que el mapa de amenaza por movimiento en masa del SGC no se presenta a escala municipal, situación que conlleva a estimar el nivel de amenaza bajo esta escala. Adicionalmente se presentaron diferentes niveles de amenaza en un municipio por lo que fue necesario determinar de manera general el nivel de amenaza por municipio (procedimiento que fue detallado en la sección 5.1.
- La región de la amazonia mantiene sus niveles de amenaza

A partir de la trayectoria seleccionada la Tabla 5.10 muestra el número de municipios que se ubican en el nivel de amenaza (i.e., 0= valor mínimo de amenaza por movimiento en masa, 1= valor máximo de la amenaza por movimiento en masa), así como la participación (%) de los municipios en relación a dicho nivel.

El 45 % del total de municipios se ubican en un nivel superior al 40 %. El restante 55 % en niveles menores al 30 %. Se puede observar que 502 municipios se encuentran en niveles superiores del 0.40. En la figura 5.9, se aprecia su ubicación:

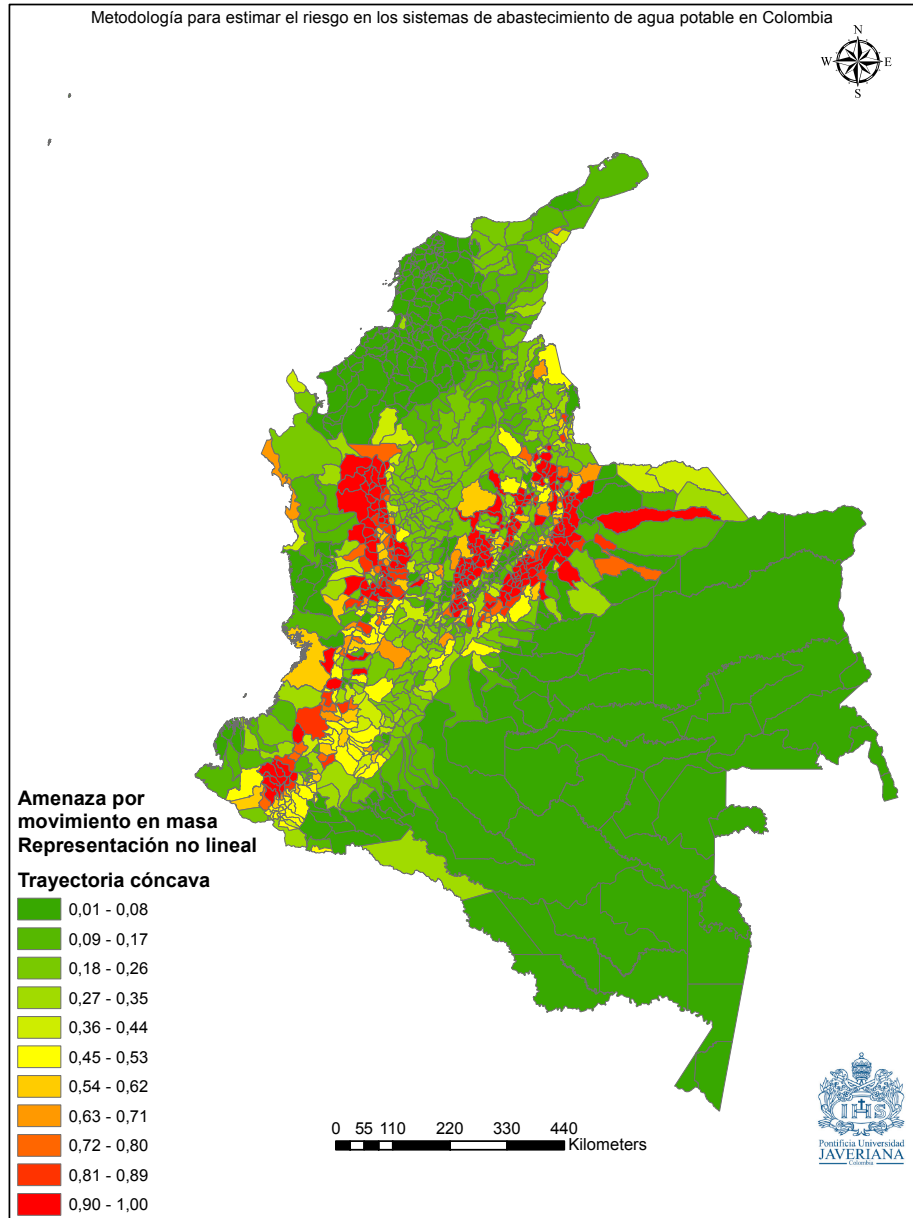


Figura 5.8: Mapa representación de la amenaza por movimiento en masa bajo un escenario de no linealidad cóncavo

- En todos los departamentos de la región Andina existe la presencia de la amenaza: Antioquía, Caldas, Risaralda, Quindío, Huila, Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Santander y Norte de Santander

5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

Nivel de amenaza	Número de municipios	Participación (%)
0	81	7
0,1	269	24
0,2	192	17
0,3	79	7
0,4	62	6
0,5	90	8
0,6	45	4
0,7	32	3
0,8	40	4
0,9	47	4
1	186	17
<b>Total</b>	<b>1123</b>	<b>100</b>

Tabla 5.10: Número de municipios en nivel de amenaza por movimiento en masa

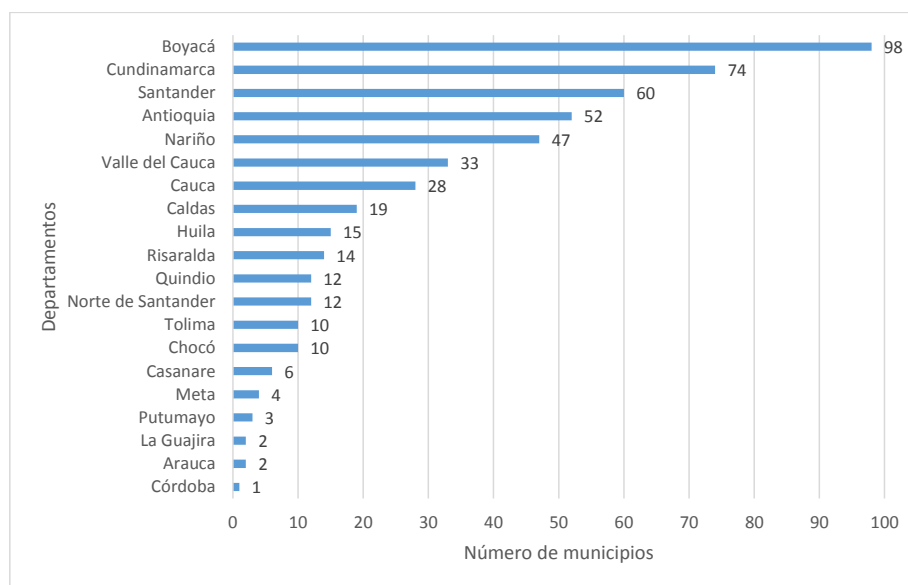


Figura 5.9: Concentración de municipios con amenaza por movimiento en masa en nivel superior a 0.40

- Cuatro departamentos de la región Pacífica: Valle del Cauca, Cauca, Nariño, Choco, tienen la presencia de la amenaza.
- En dos departamentos de la región Caribe (La Guajira y Córdoba) se registran 3 municipios .
- En cuatro departamentos de la Orinoquía (Casanare, Meta, Arauca, Putumayo) se registran 15 municipios.

En términos del número de empresas que realizan la prestación del servicio de acue-

ducto, se identificó que se encuentran expuestas ante este nivel de amenaza 1456 de 2750 esto es el 50 % de las empresas. Adicionalmente, en 4 municipios se desconoce el número de empresas que realizan la operación de los SAAP, por lo que el número de SAAP puede aumentar. Dentro del grupo de 1456 empresas, llama la atención que se encuentran los siguientes municipios: Medellín Antioquía, Sogamoso, Villa de Leyva - Boyacá, Manizales - Caldas, Popayán - Cauca, Armenia - Quindío, Pasto -Nariño, Pereira- Risaralda, Cali - Valle del Cauca los cuales concentran un número significativo de población a la cual se le presta el servicio de acueducto.

Para el nivel entre 0.01 y 0.30 del nivel de amenaza se encuentran 621 municipios a los cuales les corresponde 1282 empresas. La Figura 5.7 muestra esta relación.

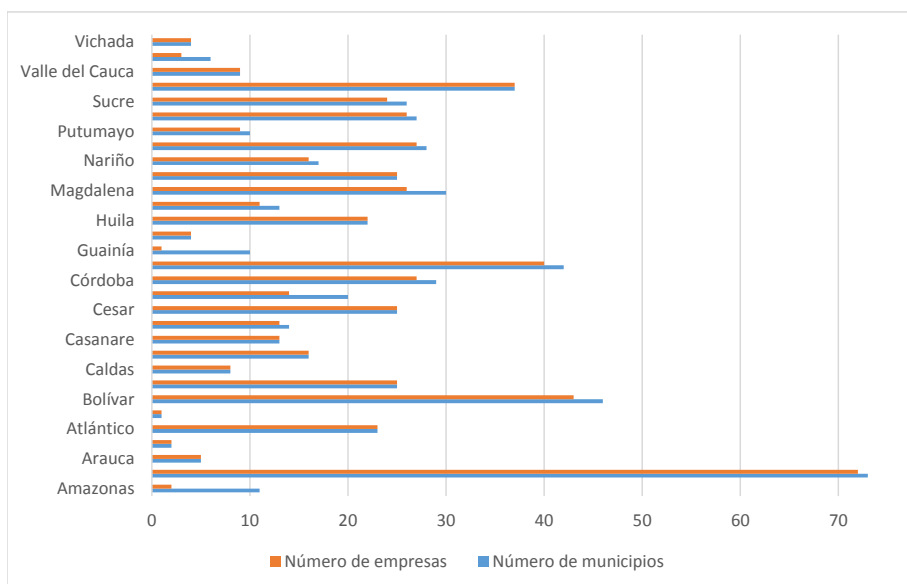


Figura 5.10: Concentración de municipios con amenaza por movimiento en masa en nivel medio 0.01 a 0.30

### 5.6.3. Amenaza por vulcanismo

La amenaza por vulcanismo esta relacionada con la identificación de zonas de sujetas a un determinado evento volcánico potencialmente destructivo que puede afectar un área determinada. En esencia, la amenaza volcánica no considera la existencia de población o bienes alrededor del volcán. Esta determinación se realiza en función de varios parámetros que operan de forma secuencial.

Principalmente los parámetros que son empleados por el Servicio Geológico Colombiano para determinar la zonas de amenazas son: flujos de lava, flujos piroclásticos, explosión la-

## 5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

---

teral dirigida de ángulo bajo (BLAST), caída de piroclastos, flujos de lodo (Lahares). Estas zonas se determinan a partir de áreas de afectación. Adelantados los procedimientos descritos en el capítulo 5, el resultado para representar la amenaza por vulcanismo correspondió a una trayectoria convexa.

Esta representación convexa fue seleccionada considerando que en el desarrollo de una eventual erupción, se activan todos los parámetros mencionados anteriormente. Estos parámetros no presentan un comportamiento lineal, es decir que se van activando a medida que aumenta la amenaza sino que por el contrario, en el entorno a la actividad volcánica se generan diversos procesos eruptivos simultáneos y secuenciales.

El desencadenamiento simultáneo de los diversos procesos eruptivos generan que el comportamiento de la trayectoria sea no lineal. Pues en la medida que aumenta la magnitud de la erupción, la cual puede pasar muy rápidamente de la alerta amarilla a alerta roja, aumenta con una mayor celeridad el nivel de amenaza.

A partir del producto entre esta representación y el peso de experto, se generó el mapa a escala municipal de la amenaza por vulcanismo (Ver Figura 5.11)

Esta relación entre el aumento del área de amenaza y la trayectoria convexa permite atribuirse la siguiente interpretación: En un primer momento el desplazamiento que tiene el eje de las abscisas es menor en una unidad con respecto al eje de las ordenas, por lo que a menor área de amenaza se comienzan a notar los síntomas de una activación del procesos eruptivos. En un segundo momento, las perturbaciones generadas por los diversos procesos eruptivos son mayores a pesar que el desplazamiento del área de la amenaza aún no alcance los límites. Y un último momento representa cuando ya el desplazamiento del área llega a los límites y se materializa una erupción con efectos negativos.

Comparativamente con los mapas de los diferentes complejos volcánicos generados por el SGC, se puede inferir:

- Existen zonas que se definieron como amenaza intermedia por parte del SGC, estas zonas conforme con los resultados obtenidos del comportamiento convexo pasan a presentar nivel de amenaza alto. Situación que principalmente ocurre en la gran mayoría de volcanes (Volcán Galeras, Volcán Nevado del Ruiz, Volcán Nevado del Tolima, Volcán Nevado de Santa Isabel).
- Esta situación obedece principalmente a que el mapa de amenaza por cada uno de los complejos volcánico del SGC no se presenta a escala municipal, situación que conlleva a estimar el nivel de amenaza considerando esta escala, encontrando que en varios

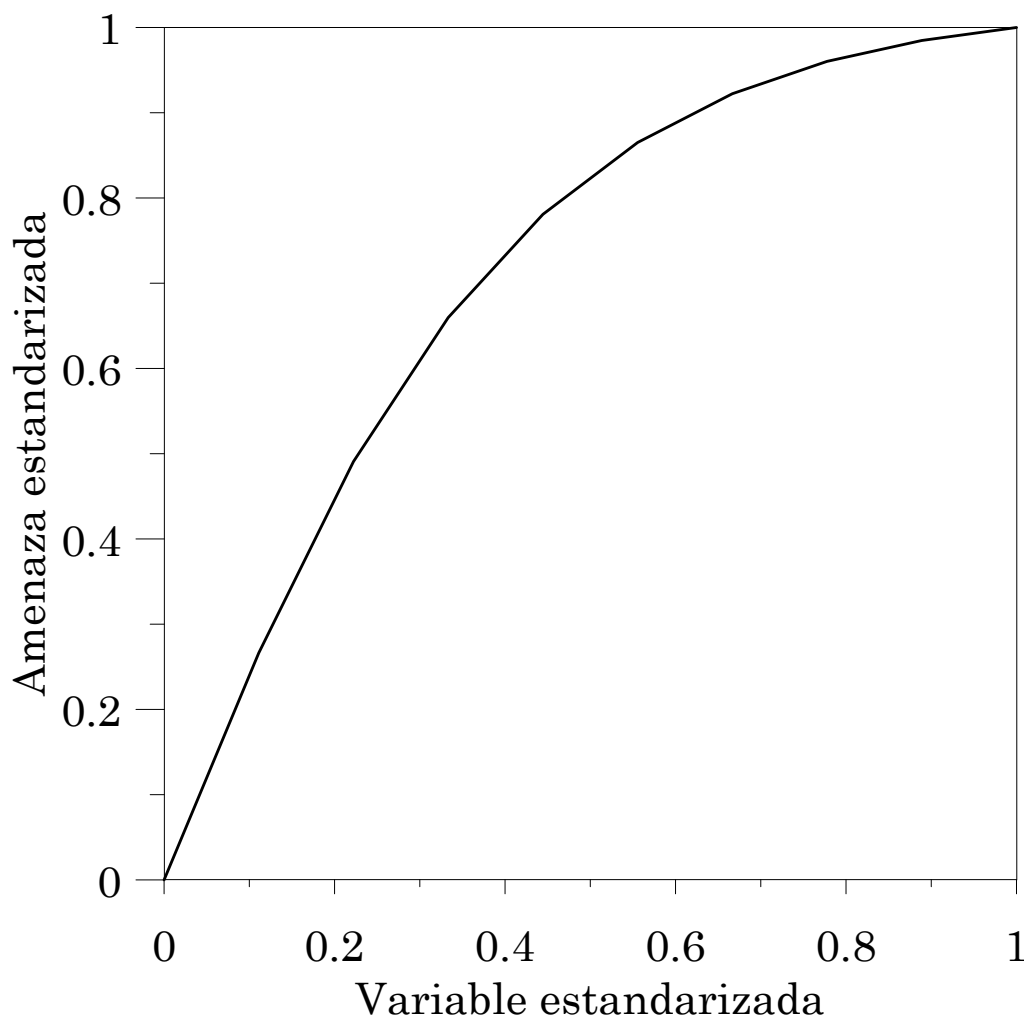


Figura 5.11: Representación amenaza por vulcanismo trayectoria convexa

municipios presentan diferentes niveles de la amenaza por vulcanismo, por lo que fue necesario ponderar a escala municipal el nivel de amenaza de un municipio (ver 5.1).

A partir de la trayectoria seleccionado la Tabla 5.11 muestra el número de municipios que se ubican en el nivel de amenaza (i.e., 0= valor mínimo de amenaza volcánica, 1=valor máximo de la amenaza volcánica), así como la participación (%) de los municipios en relación al nivel.

Se puede observar que 55 municipios se encuentran ubicados en niveles superiores del 0.40, principalmente ubicados en:

- En seis departamentos de la región Andina: Caldas, Risaralda, Quindío, Huila, Tolima, Cundinamarca.

## 5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

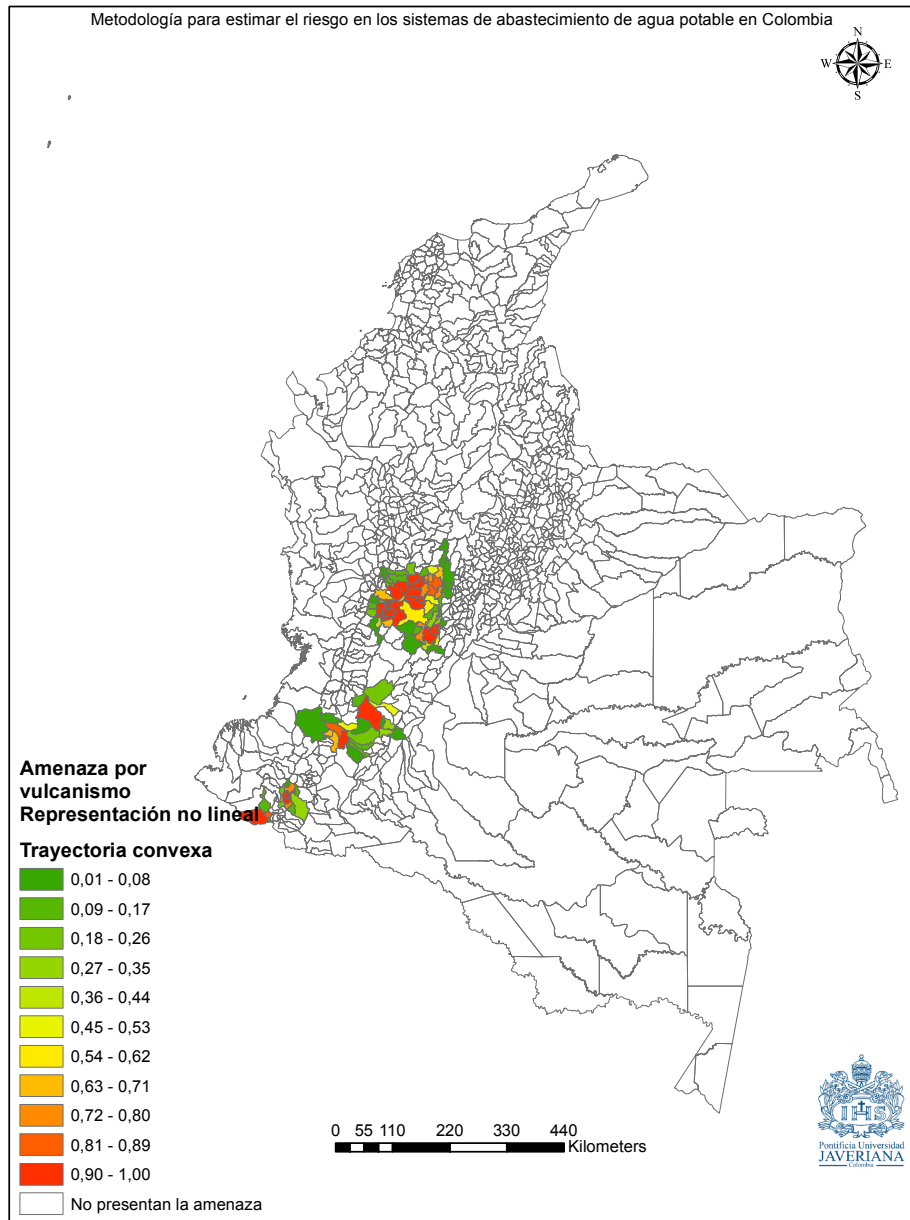


Figura 5.12: Mapa representación de la amenaza por vulcanismo bajo un escenario de no linealidad convexo

- En cuatro departamentos de la región Pacífica: Valle del Cauca, Cauca, Nariño.

La Figura 5.13, muestra la concentración de municipios.

En términos del número de empresas que realizan la prestación del servicio de acueducto, se identificó que se encuentran expuestas ante esta amenaza 176 de ellas. Dentro de este

CAPÍTULO 5. TRATAMIENTO DE LAS AMENAZAS

Nivel de amenaza	Número de municipios	Participación (%)
0	22	2
0,1	15	1
0,22	2	0,2
0,28	5	0,4
0,33	2	0,2
0,35	3	0,3
0,4	2	0,2
0,46	2	0,2
0,5	3	0,3
0,56	1	0,1
0,64	2	0,2
0,68	2	0,2
0,72	3	0,3
0,79	6	1
0,8	4	0,4
0,88	2	0,2
0,95	2	0,2
0,99	7	1
1	19	2
Sin presencia de la amenaza	1019	91
<b>Total</b>	<b>1123</b>	<b>100</b>

Tabla 5.11: Número de municipios en nivel de amenaza por vulcanismo

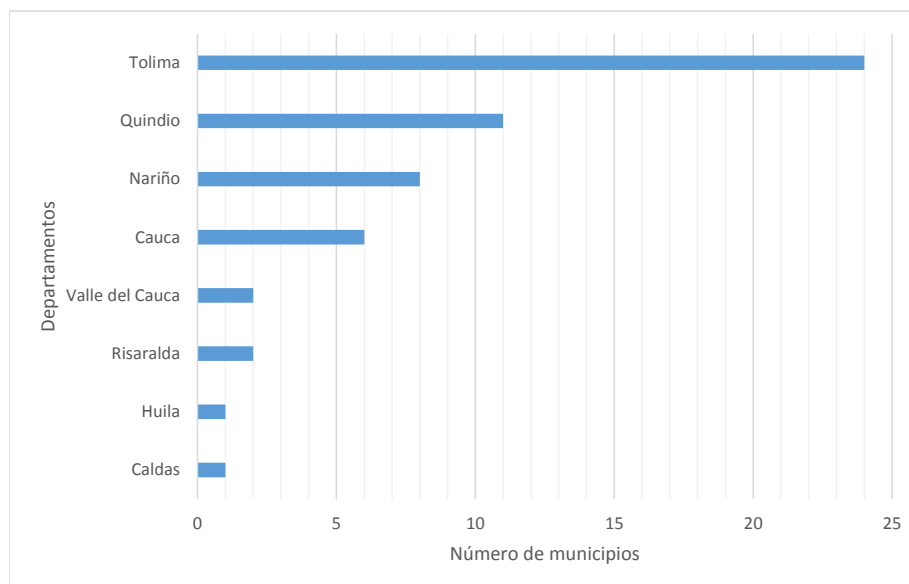


Figura 5.13: Concentración de municipios con amenaza por vulcanismo en nivel superior a 0.40



## 5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

grupo de empresas, llama la atención los municipios de Manizales - Caldas, Popayán - Cauca, Armenia - Quindío, Pereira- Risaralda, los cuales registran con un nivel superior al 0.40.

Para el nivel entre 0.01 y 0.30 del nivel de amenaza se encuentran 44 municipios a los cuales les corresponde 102 empresas. Este número mayor de empresas obedece a que no solo se encuentran las empresas de las cabeceras municipales sino que además se relacionan las que operan en las zonas rurales. La Figura 5.14 muestra esta relación.

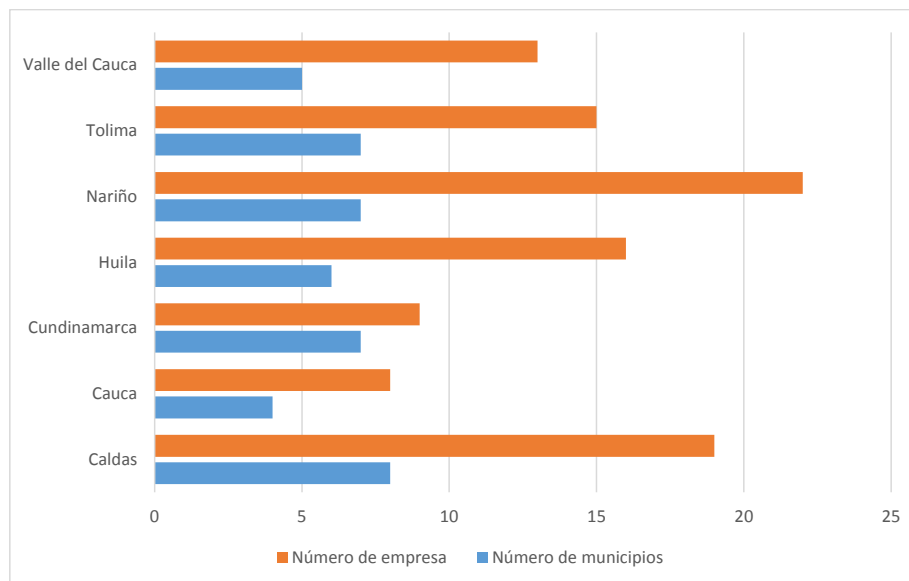


Figura 5.14: Concentración de municipios con amenaza por vulcanismo en nivel medio 0.01 a 0.30

### 5.6.4. Amenaza por inundación

La amenaza por inundación esta relacionada con la identificación de zonas sujetas a un determinado evento de anegación que potencialmente puede afectar un área determinada. A partir de áreas de afectación y adelantados los procedimientos descritos en el capítulo 5, se obtuvo como resultado que la amenaza por inundación se representaba mejor con una trayectoria convexa.

Esta relación entre el aumento del área de amenaza y el camino de representación, permite interpretarse como a medida que aumenta el área de amenaza, el nivel de daño que puede ocasionar va en aumento, materializandose en áreas anegadas cada vez mayores.

El resultado de esta representación cóncava y el peso de experto, se generó el mapa a escala municipal (ver Figura 5.16). En este se muestra que la zona de la Orinoquía presenta

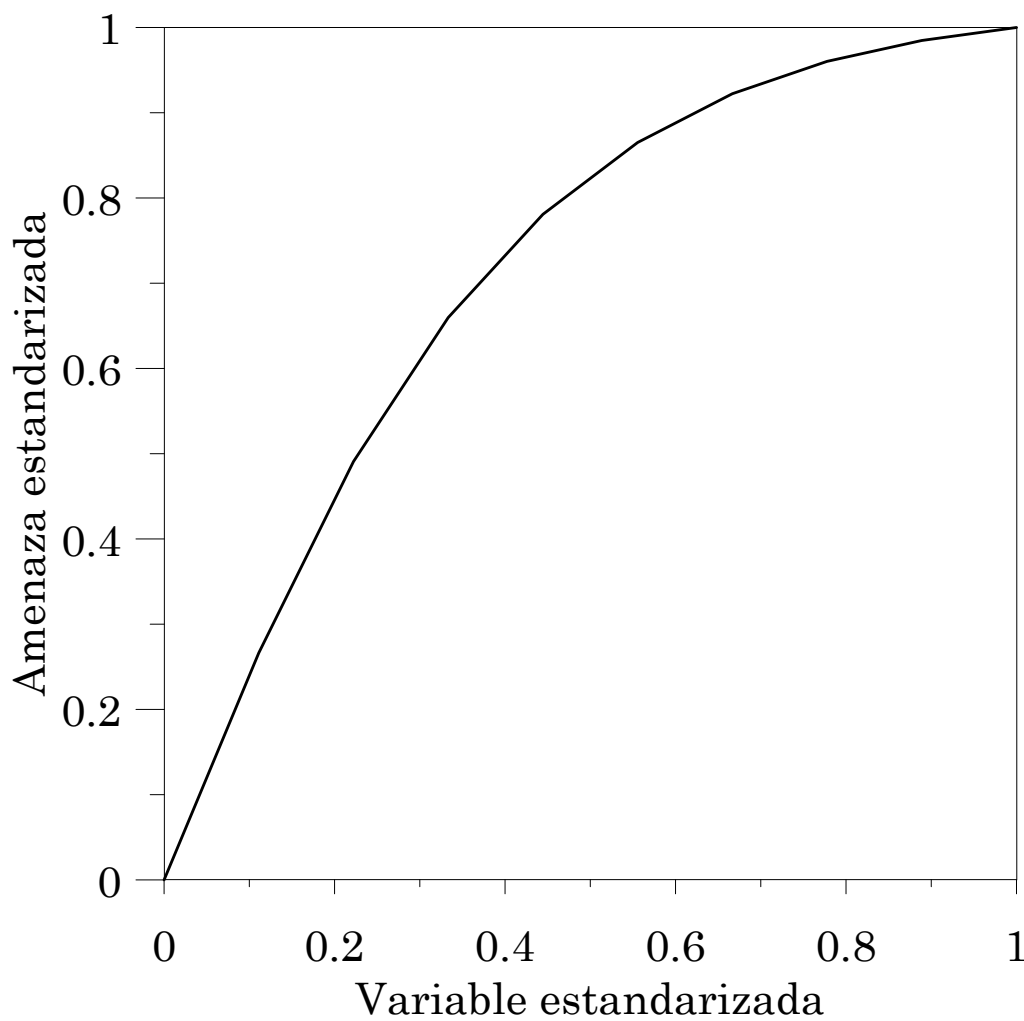


Figura 5.15: Representación amenaza por inundación trayectoria convexa

valores significativos de la amenaza (i.e., 35 a 100 %) entre los que sobresalen algunos municipios del departamento del Meta, Arauca y Casanare. Así mismo en los departamentos de Sucre, Magdalena, como también sobre la zona pacífica en los departamentos de Choco y Nariño.

Comparativamente con el mapa de de susceptibilidad a inundaciones generado por el IDEAM, se puede inferir:

- Se presentan algunas zonas con características similares de amenaza, estas son: Región de la Mojana, Arauca, Casanare, parte de la Amazonia, parte norte y sur de la región pacífica.
- De conformidad con el mapa obtenido, la región Andina presenta niveles bajos, esta

## 5.6. SELECCIÓN REPRESENTACIÓN LINEAL O NO LINEAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE AMENAZA Y PRODUCTO CON EL PESO DEL EXPERTO

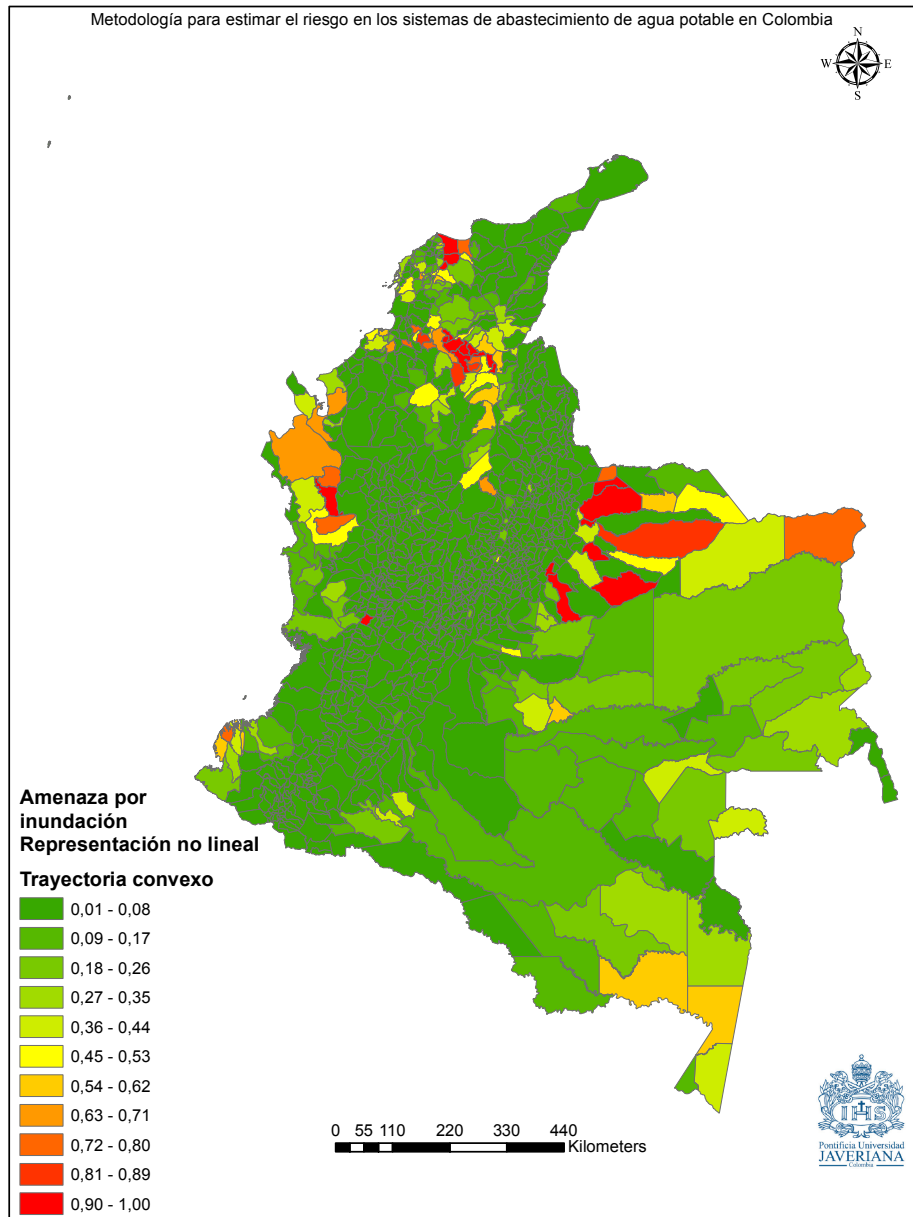


Figura 5.16: Mapa representación de la amenaza por inundación bajo un escenario de no linealidad convexo

situación obedece a que el área de inundación es baja en relación con el área total del municipio (ver 5.1).

- Así mismo, el sentido común no indican que existen zonas que se inundan con grandes

## CAPÍTULO 5. TRATAMIENTO DE LAS AMENAZAS

---

areas anegadas. Esta situación puede obedecer a que nos concentramos en un espacio de tiempo específico y dado que también la recurrencia nos hace pensar que los eventos se presentan con una mayor regularidad. Sin embargo esta percepción del todo no resulta ser contraria, simplemente es que la amenaza es calculada a partir de la información multi anual y bajo otras consideraciones como por ejemplo el periodo de retorno, por lo que estos eventos son en un momento del año y muchos de ellos no reúnen las condiciones para ser catalogados con un nivel de amenaza alta. Además el nivel de resolución del mapa de inundaciones del IDEAM es alto.

A partir de la representación convexa seleccionada la Tabla 5.12 muestra el número de municipios que se ubican en el nivel de amenaza (i.e., 0= valor mínimo de amenaza por inundación, 1=valor máximo de la amenaza por inundación), así como la participación (%) de los municipios en relación al nivel.

Nivel de amenaza	Número de municipios	Participación (%)
0,00	860	76
0,05	61	5
0,10	35	3
0,15	23	2
0,20	23	2
0,25	15	1
0,30	11	1
0,35	12	1
0,40	12	1
0,45	11	1
0,50	6	1
0,55	8	1
0,60	7	1
0,66	2	0,2
0,70	3	0,3
0,75	9	1
0,80	2	0
0,87	1	0,1
0,88	1	0,1
0,91	5	0,4
0,95	13	1
1,00	4	0,4
<b>Total</b>	<b>1123</b>	<b>100</b>

Tabla 5.12: Número de municipios en nivel de amenaza por inundación

Se puede observar que 84 municipios se encuentran ubicados en niveles superiores del 0.40, y menor al 0.40 se encuentran 1040 municipios

La Figura 5.17, muestra la concentración de municipios.

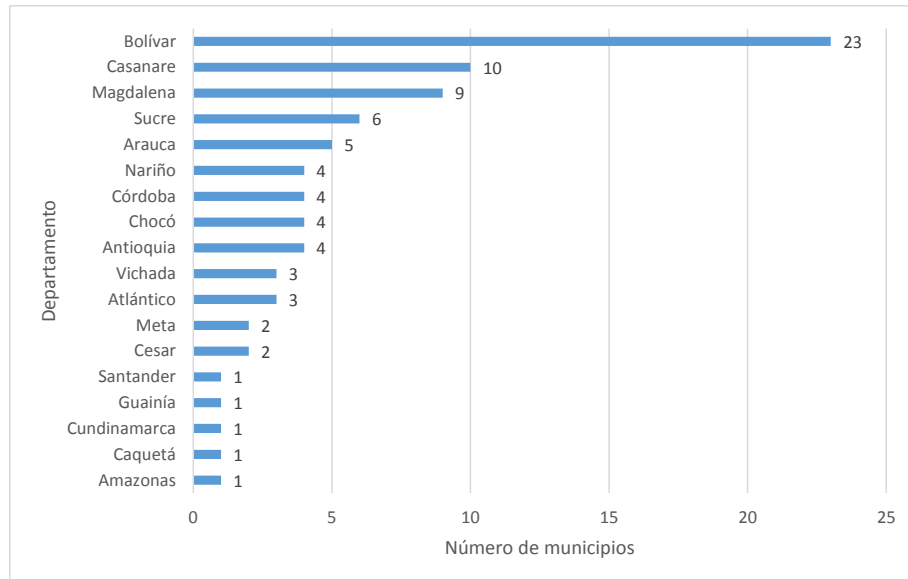


Figura 5.17: Concentración de municipios con amenaza por inundación en nivel superior a 0.40

En términos del número de empresas que realizan la prestación del servicio de acueducto, se identificó que se encuentran expuestas ante este nivel de amenaza 112 de ellas. Dentro de este grupo de empresas, llama la atención que se encuentran los municipios de la zona de la Mojana Sucreña (Majagual, San Marcos), Quibdó - Chocó, Yopal - Casanare, Arauca - Arauca.

Para el nivel entre 0.01 y 0.30 del nivel de amenaza se encuentran 1040 municipios a los cuales les corresponde 2626 empresas. Este número mayor de empresas obedece a que no solo se encuentran las empresas de las cabeceras municipales sino que además se relacionan las que operan en las zonas rurales.

La Figura 5.18 muestra esta relación entre municipios y empresas, así como la concentración de empresas. Así mismo, se observa que en algunos departamentos (i.e., Vaúpes, Amazonas, Guainía) se desconoce a cargo de quien se encuentra la prestación del servicio de agua potable.

## 5.7. Amenaza total

Antes de calcular la amenaza total, se debe seleccionar por cada amenaza la trayectoria lineal o no lineal que se representa mejor de la amenaza y una vez seleccionada se realiza el

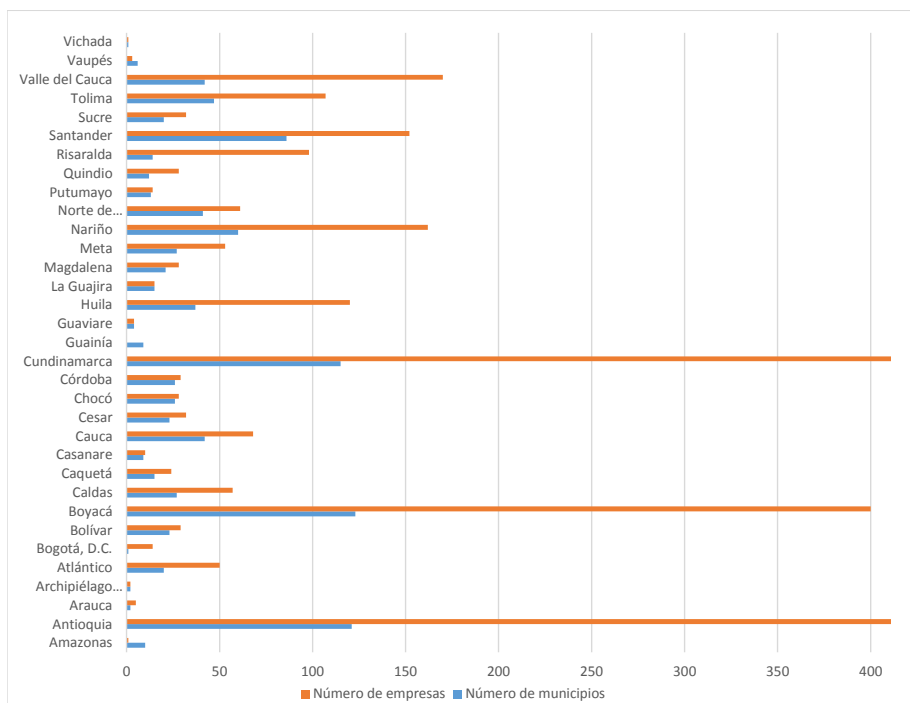


Figura 5.18: Concentración de municipios con amenaza por inundación en nivel medio 0.01 a 0.30

producto con el peso final dado por los expertos. A continuación se describe la determinación de la amenaza total con base en la ecuación 5.5.

### 5.7.1. Determinación de la amenaza total

Una vez definidos las trayectorias de no linealidad para cada amenaza, el siguiente paso fue el de obtener la amenaza total. Para lo cual, el producto de la amenaza total se obtuvo entre los pesos obtenidos de la valoración realizada por los expertos en el modelo AHP de la matriz principal de amenazas (ver capítulo 5.5.4) y los valores de las trayectoria.

A partir de los resultados, se muestra que 768 municipios se encuentran en un nivel de amenaza menor al 30 %, 210 municipios presentan un nivel entre 36 y 40 %, y 73 municipios un nivel superior al 40 %. La Tabla 5.13 evidencia los mencionados resultados.

Con los niveles de amenaza total obtenidos, se identificó el número de empresas que operan los sistemas de abastecimiento de agua potable SAAP. En la Tabla 5.14 se señala que el 21 % del total de las empresas se encuentran entre el nivel del 36 y 40 %. En este grupo se encuentran los municipios de Quibdo - Choco, Yopal - Casanare, Barbosa, Barichara - Santander, Popayán - Cauca, Salento y Filandia, - Quindio.

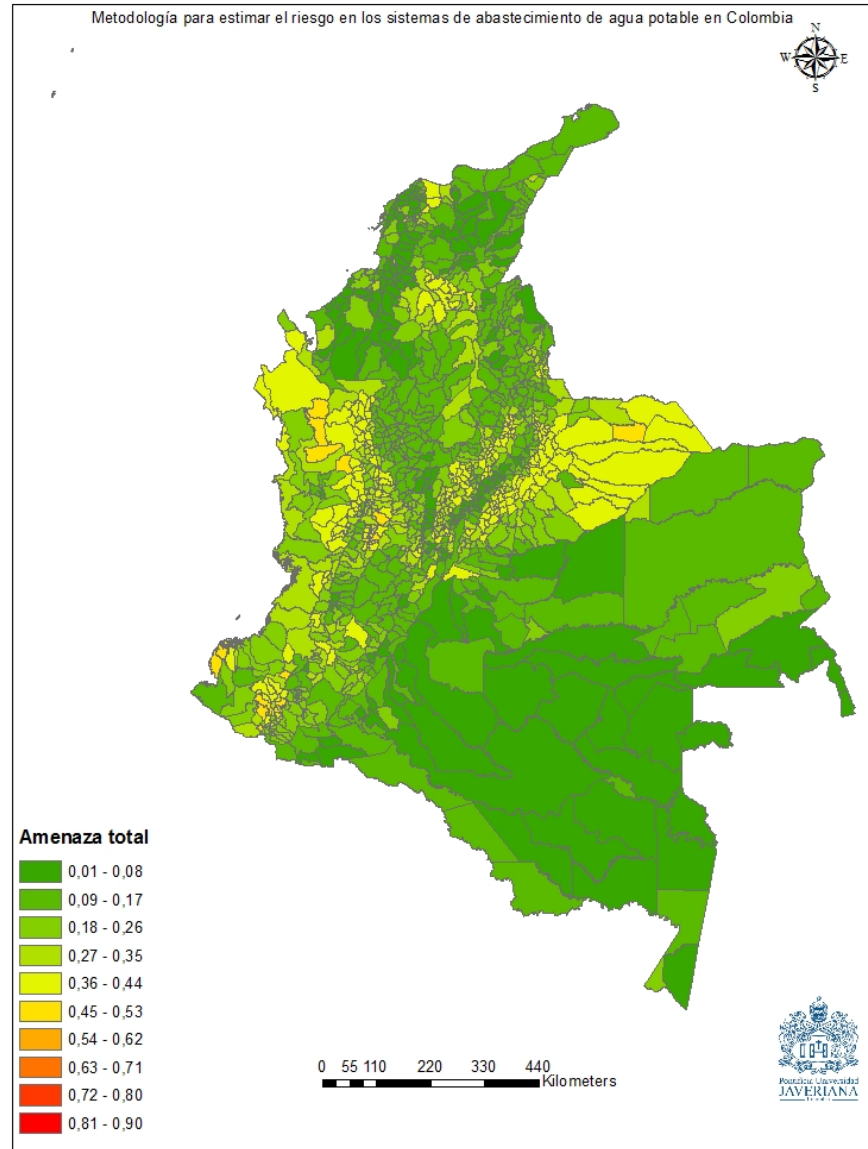


Figura 5.19: Mapa de representación de la amenaza total

Así mismo, vale la pena recordar que el mapa de amenaza total es la sumatoria de los mapas por tipo de amenaza. Por tanto en este se deben tener en cuenta las consideraciones realizadas en cuanto a:

- La amenaza sísmica, movimiento en masa presenta un representación no lineal concavo. Es decir que a medida que aumenta el valor de la amenaza estandarizada (eje

Nivel de amenaza	Número de municipios	Participación (%)
0-5	131	12
6-10	149	13
11-15	163	15
16-20	122	11
21-25	122	11
26-30	81	7
30-35	72	6
36-40	210	19
41-45	57	5
46-50	9	1
>50	7	1
<b>Total</b>	<b>1123</b>	<b>100</b>

Tabla 5.13: Número de municipios en nivel de amenaza total

Nivel de amenaza	Número de empresas
0-5	289
6-10	329
11-15	409
16-20	241
21-25	339
26-30	193
30-35	232
36-40	575
41-45	110
46-50	22
>50	11
<b>Total</b>	<b>2750</b>

Tabla 5.14: Número de empresas relacionadas con el nivel de amenaza total

abscisas) el nivel de la amenaza (eje ordenadas) no crece de la misma manera, dicho desplazamiento es menos acelerado en los primeros momentos.

- El resultado de la amenaza total está afectado por: 1) Los pesos de los expertos dados a cada tipo de amenaza 2) La escala con la que fue generada la amenaza, 3) La ponderación de los niveles de amenaza que se presentan en un municipio cuando se presenta la misma amenaza y 4) Por los caminos de representación de acuerdo a cada tipo de amenaza. Razón por la cual los resultados obtenidos pueden no representar la situación específica de amenazas en un municipio. Por ende los estudios detallados pueden ayudar a comprender mejor los fenómenos naturales.
- Sin embargo, vale la pena considerar que bajo las consideraciones evaluadas para



determinar la amenaza se tiene un indicador a escala municipal del nivel de amenaza que pueda presentar un municipio, el cual es propicio para adelantar acciones de zonificación de las misma.

Como se indicó en capítulo 2 se registran en la Superintendencia de Servicios Públicos 6050 empresas del servicio de acueducto de las cuales 2750 tienen una ubicación espacial, el restante de empresas 3300 se desconoce su ubicación, localización y área de prestación, por tanto no entran en este análisis.

Así mismo se identificó el nivel de amenaza de las principales ciudades del país. Y se pudo observar que la ciudad con mayor nivel de amenaza es Pereira, seguida de Manizales. En la Tabla 5.15, se detalla esto.

Municipio	Nivel de amenaza
Barranquilla	9
Santa Marta	9
Bogotá, D.C.	12
Villavicencio	12
Cartagena	13
Bucaramanga	13
Cúcuta	13
Medellín	15
Cali	23
Manizales	30
Pereira	33

Tabla 5.15: Principales ciudades y su nivel de amenaza total

La determinación de la amenaza total, resulta ser una pre-condición para la ocurrencia de algún evento amenazante (i.e., Sismo, movimiento en masa, vulcanismo, inundación), sin embargo, no se debe encasillar cada amenaza a esta determinación. Ya que las amenazas tienen propiedades intrínsecas con un potencial para la ocurrencia.

Así mismo, la amenaza no se puede moldear a las condiciones de los SAAP, son los SAAP los que se moldean a las condiciones de la amenaza, de forma que se pueda asegurar el funcionamiento de los elementos constitutivos de los sistemas.

En el capítulo 2 se adelantó la identificación a escala municipal del número de elementos de los SAAP que han sido reportados en el SUI e integrando esta información con la de la amenaza total, se pudo obtener la Figura 5.20, la cual describe el número de elementos

estructurales de los SAAP y sobre estos se sobrepuso la amenaza total.

Vale la pena recordar que tan solo 226 municipios reportaron la información de todos sus elementos y que de estos solo 127 municipios registraron información consistente de sus infraestructuras (ver capítulo 2).

Respecto a la información relacionada con el registro de cero componentes reportados, podemos evidenciar un corredor en la zona andina con amenaza del 36 al 44%, otro muy similar en la zona pacífica y sobre la costa caribe. Gran parte de la Orinoquía y Amazonia no tienen el registro de sus infraestructuras. La falta de información sobre los elementos estructurales de los SAAP puede aumentar la incertidumbre de su comportamiento bajo condiciones de materialización de una amenaza.

Para el caso en el que se reportaron todos los componentes de los SAAP al SUI, se evidencia que en el interior de la región Andina se registran pequeños nodos de municipios con información. La Orinoquía presenta solo 5 municipios con el reporte total de sus infraestructuras.

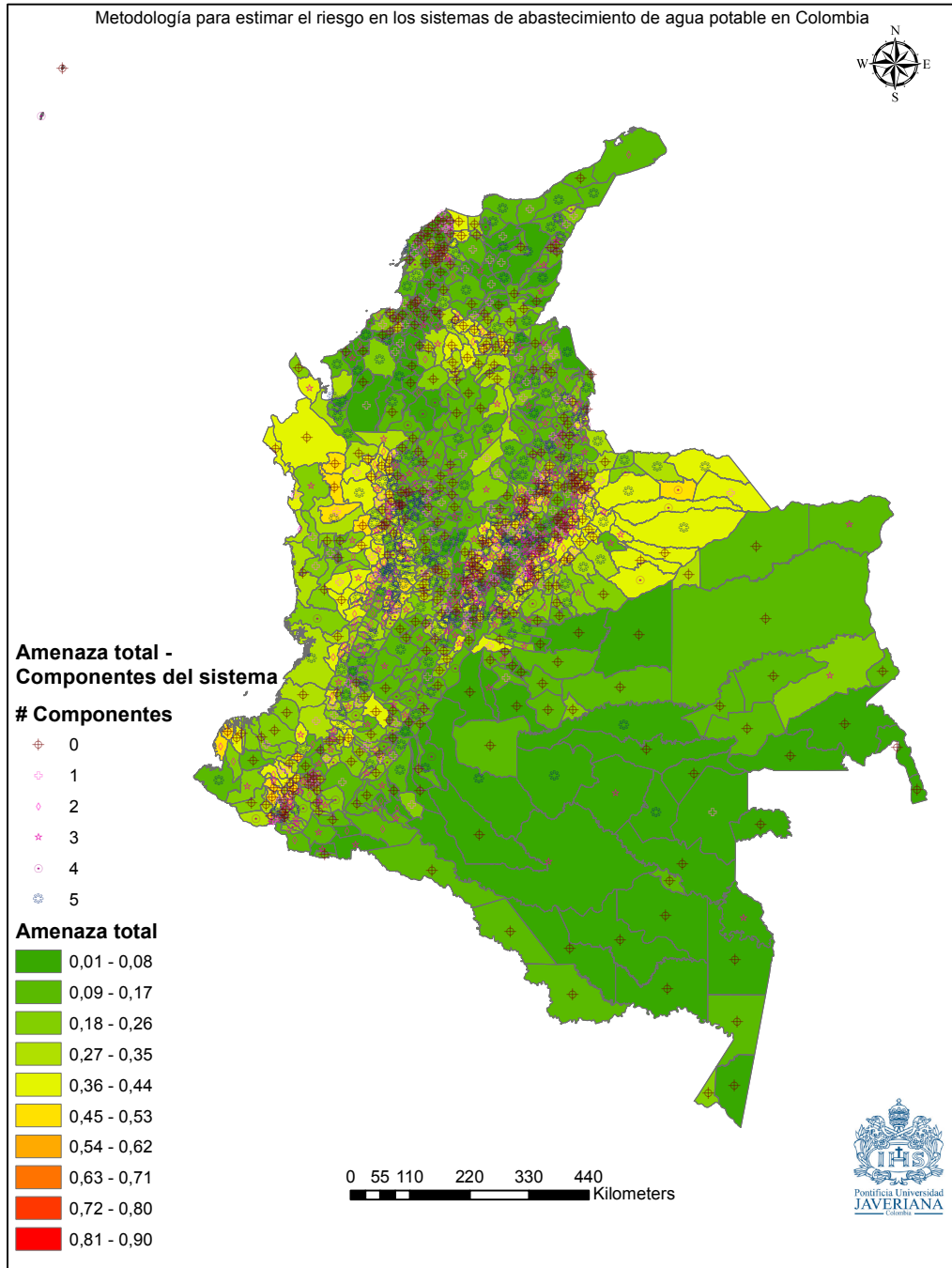
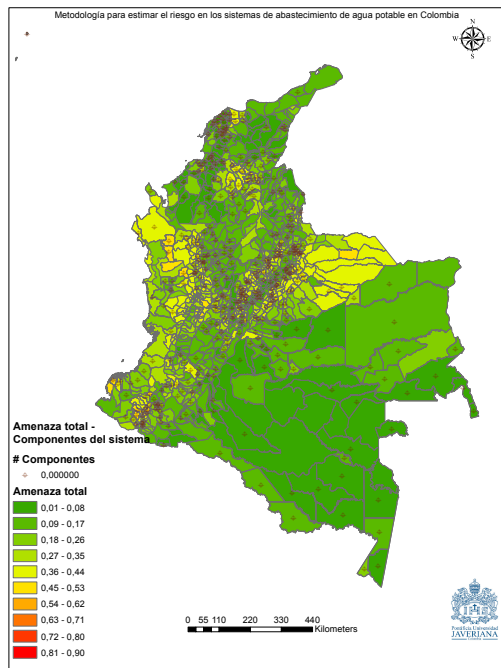
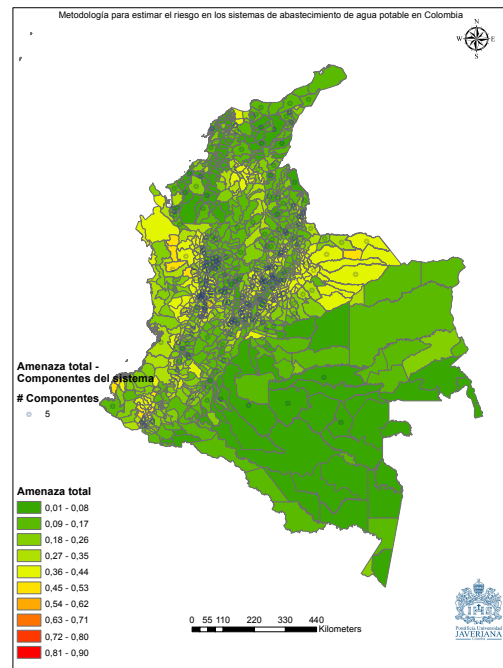


Figura 5.20: Mapa superposición entre los componentes de los SAAP y la amenaza total



(a) 0 elementos SAAP reportados



(b) 5 elementos SAAP reportados

Figura 5.21: Información del número de elementos de los SAAP en relación con la amenaza total

## Capítulo 6

# Vulnerabilidad

Los Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable SAAP, a menudo son llamados sistemas de línea de vida, toda vez que proporcionan un flujo confiable y un servicio esencial para la seguridad de la sociedad (i.e., económica, institucional, industrial). Para Wang et al. (2012) “*los sistemas de energía eléctrica, telecomunicaciones, sistemas de abastecimiento de agua, sistemas de abastecimiento de gas natural, y los sistemas de transporte constituyen la piedra angular de la sociedad moderna. Dichas infraestructuras no existen de manera aislada, sino que están interconectados con otras infraestructuras, por lo que, las funciones de una infraestructura con otras infraestructuras están mutuamente relacionados, por cuanto alguna perturbación (externas o internas) de algunos de los componentes de un sistema pueden hacer que los componentes en otro sistema fallen también*”.

En tal sentido, los sistemas de línea de vida deben ser lo suficientemente fiables para asegurar que las personas tengan acceso al propósito de cada sistema (servicios públicos), toda vez que el acceso a estos servicios públicos se encuentran relacionados con la protección del bienestar de la población (desarrollo social), funcionamiento del gobierno (seguridad sanitaria, defensa nacional, entre otras) y con la capacidad de producción económica de una región.

En vista de la importancia que tienen los Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable SAAP en el desarrollo de una sociedad (i.e., acceso a un bien público de agua potable) y considerando que los SAAP pueden presentar perturbaciones (externas o internas) en algún o algunos de sus componentes, perturbaciones que pueden generar la interrupción en el normal funcionamiento de estos, cuyas consecuencias se enmarcan principalmente en la suspensión en el suministros de agua a una población, colapsos estructurales en los elementos del sistema y grandes alteraciones económicas para una población.

Bajo esta perspectiva, los análisis de vulnerabilidad se han convertido en una herramienta cada vez más importante para identificar y predecir el impacto en los elementos de los SAAP como en los componentes sociales, naturales y económicos ocasionados por las diferentes perturbaciones (i.e., amenazas naturales y/o antrópicas).

Para Wang et al. (2012) el análisis de vulnerabilidad no debe determinarse de forma aislada, lo que significa que solo se lleva hasta los límites de una única infraestructura o elemento objeto de análisis, sino que dicha evaluación debe considerar una perspectiva de análisis global. De esta manera, se pueden considerar no solo el análisis a aspectos del elemento evaluado sino que busca ir más allá en cuanto a la identificación de factores que puedan ser determinantes para la evaluación.

Existen varios métodos para el análisis de la vulnerabilidad, la cual desde el enfoque con la que se determina (ambiental, social, física, económica, etc.), responderá al ámbito evaluado. Esta pluralidad de conceptos para Ramos (2014) son el producto de cómo las diferentes disciplinas conciben y abarcan el problema. La Figura 6.1 evidencia los mecanismos "categorías" para evaluar la vulnerabilidad. En ella se puede observar que aunque se presentan con un mismo nombre, su definición resulta ser distinta. Lo anterior, considerando la perspectiva y perfil del autor.

Esta multiplicidad y variedad de definiciones para Glade (2003) obedece a que existen dos diferentes perspectivas para examinar la vulnerabilidad, la primera desde las ciencias sociales y la segunda desde las ciencias naturales, en la que se basa la ingeniería.

Según Ramos (2014) dichas diferencias radican principalmente en: *“para la ingeniería, la vulnerabilidad se puede entender como el potencial de un elemento expuesto a experimentar un impacto adverso (Alexander, 1999), como una medida del daño que sufre un elemento en riesgo cuando se ve materializada la amenaza (Wisner and Luce 1993, Blaikie et al., 1994, Dooge 2004) o como la relación existente entre la exposición de un elemento y la resistencia del elemento bajo un nivel de amenaza dado. En el contexto de las ciencias sociales, la definición de vulnerabilidad se refiere a las características de una persona o un grupo de personas en términos de su capacidad para anticipar, enfrentarse, resistir y recobrase del impacto de una amenaza”*.

Ramos (2014) continúa señalando que *“desde la perspectiva de la ingeniería es necesario que exista un elemento expuesto para que se genere vulnerabilidad, es decir, cada elemento expuesto tiene una vulnerabilidad intrínseca asociada a su existencia (sólo por el hecho de estar en el área de influencia de una amenaza tiene vulnerabilidad). El elemento en riesgo*

Dimensiones del territorio Departamento Nacional de Planeación, 2010	Gustavo Chaux, 1989	Gobierno Regional del Cusco, 2011	Ana Maria Foschiatti - Allan Lavell, 1997	Dirección de Gestión del Riesgo, 2010	Verónica Botero F, 2009	INDECI, 2006	Ana Maria Foschiatti, 2009	Terry Cannon, 1991
Económico-Productivo	Económica	Económica	Social -	Económica	Económica	Económica	Económica	Vulnerabilidad en los sistemas de vida
	Institucional	Político Institucional	Organizacional	Institucional		Político Institucional	Ambiental y de los sistemas de vida.	
	Física	Física	Físico-Material	Física		Física	Física	
Político-institucional	Institucional	Político Institucional	Motivacional Actitudinal	Institucional	Político institucional	Político institucional	Social y organizacional	Vulnerabilidad en los aspectos de protección social
	Económica	Económica	Social -	Económica	Económica	Económica		
	Social	Socio Cultural - Organizativo	Organizacional	Organizacional	Socio-Cultural	Social	Social	
	Política	Político Institucional		Política				
Natural	Natural	Vulnerabilidad Ambiental e Higiene	Físico-Material	Ambiental		Ambiental y Ecológica	Ambiental y de los sistemas de vida.	Vulnerabilidad en los sistemas de vida
	Ecológica						Ambiental	
	Física	Higiene		Física			Física	
						Científica y Tecnológica	Física	
	Económica	Económica	Social - Organizacional	Económica	Económica	Económica	Sanitaria y epidemiológica	
	Social	Socio Cultural - Organizativo		Organizacional	Socio-Cultural	Social	Social	
	Cultural			Cultural		Cultural e Ideológica	Económica	
Política	Político Institucional	Motivacional Actitudinal	Política		Político Institucional	Social y organizacional		
Urbano - Regional		Vulnerabilidad Ambiental e Higiene	Físico-Material	Ambiental		Ambiental y Ecológica	Ambiental y de los sistemas de vida.	Vulnerabilidad en los sistemas de vida
	Natural							
	Ecológica							
	Física			Física	Física	Física	Ecológica	
	Técnica	Operativa					Física	
						Científica y Tecnológica	Sanitaria y epidemiológica	
	Económica	Económica	Social-Organizacional	Económica	Económica	Económica	Social	
	Social	Socio Cultural - Organizativo		Organizacional	Socio-Cultural	Social	Económica	
	Cultural			Cultural		Cultural e Ideológica	Social y organizacional	
	Ideológica			Educativa		Educativa	Movilidad urbana.	
Institucional	Político Institucional	Motivacional Actitudinal	Institucional	Político institucional	Político Institucional	Ambiental y de los sistemas de vida.		
Política			Política			Ambiental		
Social	Natural	Vulnerabilidad Ambiental e Higiene	Físico-Material	Ambiental		Ambiental y Ecológica	Ecológica	Vulnerabilidad en los aspectos de autoprotección
	Ecológica						Física	
	Física				Física		Física	
	Técnica	Operativa					Social	
						Científica y Tecnológica	Económica	
	Económica	Económica	Social - Organizacional	Económica	Económica	Económica	Social y organizacional	Vulnerabilidad en los aspectos de protección social
	Social	Socio Cultural - Organizativo		Organizacional	Socio-Cultural	Social Cultural e Ideológica	Movilidad urbana.	
	Cultural		Cultural					
	Política	Político Institucional	Motivacional Actitudinal	Política		Político Institucional		
							Educativa	

Figura 6.1: Comparación entre los diferentes tipos de vulnerabilidad y las dimensiones del territorio

*puede comprender las personas, las propiedades, las actividades económicas, los servicios públicos y privados entre otros (Alexander, 1999). Desde el punto de vista de las ciencias sociales, el único “elemento” que está expuesto es la persona, o grupo de personas y los otros elementos expuestos permiten que la materialización de la amenaza tenga un impacto más o menos fuerte”.*

Conforme con lo mostrado en la Figura 6.1, los diferentes tipos de vulnerabilidad ofrecen diferentes enfoques. Esto conlleva a que su valoración responda a la necesidad del autor y por ende su determinación resulte ser parcial, considerando particularmente el enfoque del autor (en su gran mayoría responde a un enfoque de las ciencias sociales). Por lo que para Cardona (2001) y Cutter (2003) esta pluralidad de enfoques requieren de una concepción más amplia que unifique las diferentes categorías, que conciba una perspectiva integradora entre lo social e ingenieril y que además permita explicar las complejas interacciones entre los sistemas sociales, naturales e ingenieriles.

Considerando que existen varias definiciones del término vulnerabilidad (que se encuentran en la bibliografía), este trabajo define la vulnerabilidad como el grado de pérdida o de propensión a ser afectado y/o sufrir un daño de un elemento específico que se encuentra expuesto ante una amenaza de una magnitud dada..

Esta investigación empleando las cinco dimensiones del territorio propuestas por el Departamento Nacional de Planeación (2011) propone definir cinco enfoques de vulnerabilidad, los cuales darán cuenta del estado actual de vulnerabilidad de los SAAP bajo una perspectiva holística. Esta nueva concepción incorpora los aspectos sociales e ingenieriles los cuales a su vez se encuentran enmarcados en un territorio (i.e., el municipio). De manera que bajo esta única e integradora perspectiva se logre establecer estrategias permanentes de planificación y acciones anticipadas que reconozcan las particularidades locales, de responder a aquellas circunstancias que ponen a las personas y lugares en riesgo y aquellas condiciones que reducen la capacidad de las personas y los lugares para responder a las amenazas y por ende contribuye a reducir la vulnerabilidad bajo una visión integral.

Vale la pena mencionar que dependiendo de las condiciones espaciales de un territorio la vulnerabilidad no siempre presenta una misma representación, a pesar de que se empleen los mismos atributos para su determinación. Esta circunstancia obedece principalmente a la particularidad del territorio y a la forma de cómo se presenta la amenaza (alta, media o baja). Considerando que los elementos que componen los SAAP se encuentran ubicados geográficamente en sitios diferentes (e.g., la captación regularmente se ubica en zonas de altas pendientes en referencia con las PTAP’s que su pendiente es menor y cercana a las



---

zonas urbanas), esta investigación realizará la determinación de los cinco tipos de vulnerabilidad de forma particular, es decir para cada uno de los elementos y de forma agregada para los diferentes sistemas de abastecimiento.

Para determinar cada tipo de vulnerabilidad, fue necesario identificar y estructurar una serie de variables que permitieran responder a la cuantificación. Como primer paso, se reconocieron las variables más relevantes (más adelante aplicando el modelo AHP tomaran el nombre de alternativas) las cuales tienen en su interior unas subseries de variables (variables de segundo nivel) y dentro de cada subserie de las variables de segundo nivel, se reconocieron una serie variables de tercer nivel las cuales proporcionan la información clave para el cálculo (i.e., dato, índice e indicador) (Figura 6.2).

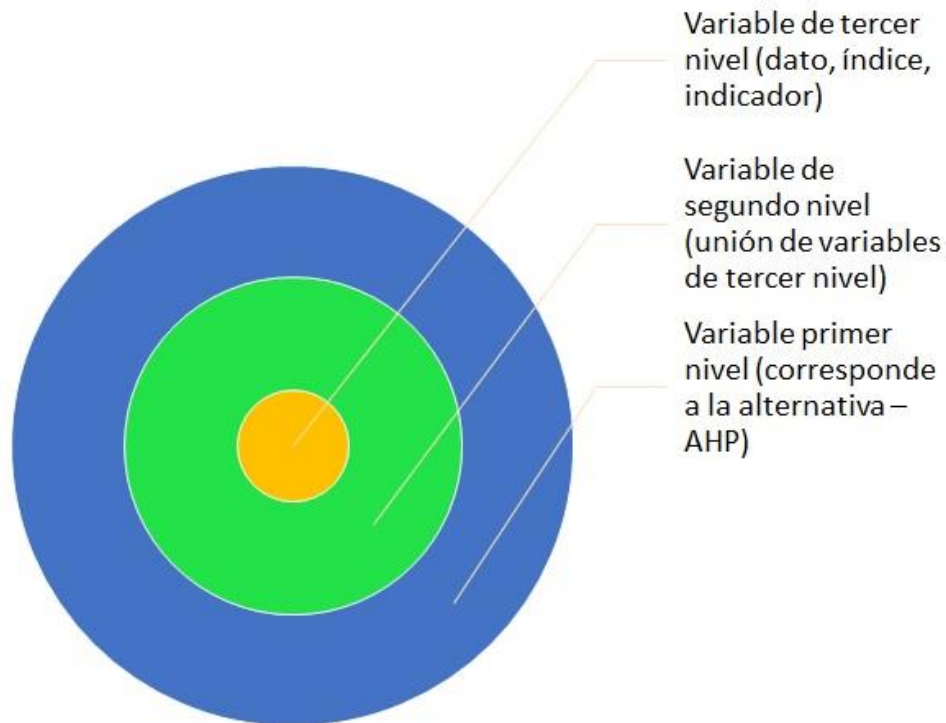


Figura 6.2: Estructura del conjunto de variables

Para una mayor claridad en el reconocimiento de los niveles de las variables, se definió tres identificadores para cada uno de ellos así:

- Variables de primer nivel (-)
- + Variables de segundo nivel (+)
- \* Variables de tercer nivel (\*)

Una vez reconocidas las variables objeto de análisis, se propone mediante el modelo AHP realizar la integración de los tipos de vulnerabilidad, la cual será fundamental para determinar la vulnerabilidad del lugar y del SAAP.

Para determinar los tipos de vulnerabilidad se tuvo que requerir a diferentes fuentes de información entre las que se encuentran: IDEAM, DANE, SIGOT (<http://sigotn.igac.gov.co/>), Departamento Nacional de Planeación -DNP, Sistema Nacional de Parques Nacionales Naturales -SNPNN, Instituto Alexander Von Humbolt, Superintendencia de Servicios Públicos, Servicio Geológico Colombiano, Confederación Colombiana de Municipios, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Sistema de Información Ambiental de Colombia ([www.siac.gov.co](http://www.siac.gov.co)), Sistema de Información sobre Biodiversidad (<http://data.sibcolombia.net>) y Sistema Único de Información -SUI, Unidad de Planeación Minero Energética.

Bajo las anteriores consideraciones, la determinación de la vulnerabilidad será la integración de los enfoques sociales, económicos, ingenieriles y de las dinámicas del territorio que tendrá como resultado obtener una visión más completa, un enfoque holístico y una aproximación efectiva y actual de la vulnerabilidad.

### 6.1. Vulnerabilidad natural

El medio natural tiene varios significados para diferentes personas. Para algunos, la palabra evoca pensamientos de escenas de bosques con aire fresco y limpio y aguas cristalinas. Para otros, significa una vecindad suburbana agradable o un campus tranquilo. Otros más, consideran que son relaciones entre la ecología y el medio ambiente; piensan en las interrelaciones de planta-animal, cadenas alimenticias, especies amenazadas y otras cuestiones recientemente reconocidas como la ocurrencia de fenómenos naturales que afectan a la población e infraestructura (Jain, 2002).

Jain (2002) señala que “*el medio natural es una combinación de todos estos conceptos, además de muchos, muchos más. Incluye no sólo las áreas de aire, el agua, las plantas y los animales, sino también de otras características naturales y modificados por el hombre, que constituyen la totalidad de nuestro entorno*”.

En otras palabras, el medio natural es percibido y se compone de una combinación de nuestro entorno natural, aspectos físicos (aire, agua, suelo, biota) y la relación que tiene el ser humano con este entorno (incluye aspectos estéticos, históricos, culturales, económicos y sociales).

De las anteriores consideraciones este trabajo define la vulnerabilidad natural como el grado de afectación del medio y los recursos naturales, el cual comprende el deterioro de las diferentes relaciones entre los aspectos básicos del ecosistema (i.e., calidad de agua y la regulación del ciclo hidrológico, corredores ambientales, entre otros), la capacidad de los ecosistemas ante las influencias antrópicas como son su explotación y ocupación, la oferta de servicios (i.e., protección y regeneración de los recursos naturales, modelos forestales sostenibles) y su interconexión con las regiones biogeográficas. Así mismo incorpora factores socio culturales (i.e., capacidad de organización asociativa) los cuales influyen de manera directa sobre el medio natural (i.e., preservándolo o destruyéndolo).

La vulnerabilidad natural ayuda orientar procesos en la sostenibilidad ambiental, revertir los efectos del deterioro y reducir la contaminación sobre la población y las generadas por las actividades económicas. Para lo cual considera dos ejes esenciales para su determinación:

- Mantener o mejorar la oferta ambiental en calidad, cantidad y disponibilidad. Se debe procurar por la sostenibilidad del medio natural, de manera que los recursos naturales continúen disponibles aún para las generaciones futuras en cantidades suficientes y con una buena calidad para toda la sociedad (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).
- Orientar procesos culturales y sociales hacia la sostenibilidad. Parte principalmente de la regulación de la actividad humana con el propósito de lograr la protección y uso racional de los recursos y el patrimonio ambiental a partir de la construcción de valores individuales y colectivos (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Desde el punto de desarrollo territorial, la condición natural se detecta rápidamente mediante atributos y componentes desde los ámbitos urbano y rural. Para lo cual a través de la agrupación de variables, se pretende asociar variables de la estructura natural, variables del orden socio-económicas y socio-culturales. Para caracterizar cada variable se cuenta con los siguientes elementos:

### **VARIABLES DE LA ESTRUCTURA NATURAL**

Conforme con la Figura 6.2 y siguiendo el reconocimiento de los niveles de las variables a continuación se detallan cada uno de ellos.

#### **– Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes**

En este se identifica la existencia de elementos naturales y ecosistémicos de gran valor que requieren un manejo específico en el territorio municipal.

- + Porcentaje de área agrícola sembrada ((Número de hectáreas sembradas por municipio / área total del municipio en hectáreas.) \* 100)
- + Número de especies de flora y fauna
- + Recursos naturales urbanos. Entre ellos se encuentran
  - \* Área protegida(km<sup>2</sup>)
  - \* Área de Bosques (km<sup>2</sup>)
  - \* Número de reservas forestales
  - \* Área de parques nacionales naturales (km<sup>2</sup>)
  - \* Número de fuentes hídricas
  - \* Número total de personas que residen en área urbana
  - \* Número total de personas que residen en área rural
- **Función ambiental del municipio** Se caracteriza por reconocer a nivel municipal la oferta y demanda de servicios y su interacción con la región.
  - + Oferta y demanda de recursos hídricos expresado en (l/s).
    - \* demanda de agua de la población para clima frío expresado en (l/s)
    - \* demanda de agua de la población para clima cálido expresado en (l/s)
    - \* demanda de agua por parte de los distritos de riego expresado en (l/s)
    - \* índice de escasez hídrica (%). Relación porcentual entre la demanda potencial de agua del conjunto de actividades sociales y económicas con la oferta hídrica disponible.
  - + Número de especies de flora y fauna
  - + Patrimonio ambiental. Está conformado por el número de bienes naturales, culturales, tradicionales e históricos de un municipio. Hacen parte del patrimonio ambiental: parques nacionales, monumentos naturales y zonas protectoras entre otras.
  - + Número de gremios y/o organizaciones encargadas de adelantar actividades de sensibilización o educación ambiental
  - + Explotación minera. La cantidad de material extraído de minerales como oro, platino y plata. expresado en kilogramos
  - + Producción petrolera, expresada en número de barriles.
  - + Existencia de interconexión eléctrica (si/no)
  - + Número de instituciones con la cátedra de educación ambiental
  - + Número de programas de reciclaje adelantados durante un año

- + Principal actividad económica en un municipio expresada en el mayor número de unidades de la actividad. Entre ellas se encuentran unidades tales como: mantenimiento y reparación, compra y venta productos no fabricados, alojamientos, restaurantes, cafeterías, construcción, transporte, correo y telecomunicaciones, intermediación financiera, seguros, fondos de pensiones y cesantía, educación, salud, servicios sociales, disposición de basuras, entre otros.
- **Dinámica ambiental dominante** Determina el desempeño de las condiciones ambientales del municipio
  - + Agotamiento del recurso hídrico. En este se relacionan las siguientes variables
    - \* demanda de agua de la población para clima frío expresado en (l/s)
    - \* demanda de agua de la población para clima cálido expresado en (l/s)
    - \* demanda de agua por parte de los distritos de riego expresado en (l/s)
    - \* uso del Agua (IUA) corresponde a una categorización entre la oferta hídrica de agua anual y la demanda hídrica de los sectores económicos
    - \* índice de escasez hídrica (%). Relación porcentual entre la demanda potencial de agua del conjunto de actividades sociales y económicas con la oferta hídrica disponible.
  - + Contaminación atmosférica. Para lo cual se consideran los contaminantes criterio en Colombia.
    - \* Ozono Troposférico (O<sub>3</sub>) expresado en concentraciones de ozono en la troposfera
    - \* Monóxido de Carbono (CO) expresado en concentraciones de CO
    - \* Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) expresado en concentraciones de NO<sub>x</sub>
    - \* Óxidos de Azufre (SO<sub>x</sub>) expresado en concentraciones de SO<sub>x</sub>
    - \* Partículas Suspendidas de diámetro menor a diez micras (PM<sub>10</sub>) concentraciones de fondo de material particulado
    - \* Partículas Suspendidas Totales (PST) concentraciones de partículas suspendidas totales
  - + Contaminación hídrica. Se deben reconocer las variables establecidas por autoridad ambiental para las fuentes hídricas. Entre ellas se encuentran:
    - \* demanda química de oxígeno expresado medida de concentración másica mg/l
    - \* demanda bioquímica de oxígeno expresado medida de concentración másica mg/l

- \* sólidos disueltos totales expresado medida de concentración másica mg/l
  - \* sólidos suspendidos totales expresado medida de concentración másica mg/l
  - \* coliformes fecales expresado En el número más probable (NMP)
  - \* coliformes totales expresado En el número más probable (NMP)
  - \* toxicidad para insectos acuáticos determinación de la concentración letal media (CL50-48)
  - \* toxicidad para peces determinación de la concentración letal media (CL50-48)
  - \* pH expresado en la escala de pH. típicamente, de 0 a 14. Son ácidas las disoluciones con pH menores que 7 (el valor del exponente de la concentración es mayor, porque hay más iones en la disolución) y alcalinas las de pH superiores a 7. El pH = 7 indica neutralidad de la disolución.
- + Contaminación de suelos, expresado por superficie afectada en Ha. Bajo la actual reglamentación nacional se mide la contaminación bajo los siguientes aspectos 1). degradación física: erosión por el agua y el viento. 2) degradación química: la cual se refiere a la pérdida de nutrientes y a la salinización, acumulación de basuras, sustancias tóxicas aplicadas en exceso (pesticidas y fertilizantes químicos), los gases de centros mineros, y la aplicación de aguas contaminadas por desechos mineros (relaves). 3) degradación biológica. se relaciona con la pérdida de la materia orgánica, debido a las malas prácticas de preparación de terrenos para siembra, la deforestación, cambios de uso del suelo sin medidas de conservación, obras de infraestructuras y urbanismo mal planificados
- + Calidad de las fuentes de agua
- \* demanda química de oxígeno expresado medida de concentración másica mg/l
  - \* demanda bioquímica de oxígeno expresado medida de concentración másica mg/l
  - \* sólidos suspendidos totales expresado medida de concentración másica mg/l
- + Calidad del agua suministrada a la población (IRCA)
- + Conflictos por el uso del suelo. Corresponde a las áreas en conflicto por uso del suelo expresadas en Ha.
- + Explotación pesquera y caza de animales expresado en kilogramos
- + Número de hectáreas de bosques sembradas (ha)
- + Zonas con tipo de erosión específica. expresa en términos de degradación de suelos. La información se encuentran categorizada en tres tipos. Baja (Pérdida

<25 % del horizonte A de suelo), moderada (pérdida de 25 a 75 % del horizonte A.), severa (pérdida >75 % del horizonte A).

## 6.2. Vulnerabilidad socio-cultural

Antes de entrar a definir lo que significa para esta investigación la vulnerabilidad socio-cultural, se pretende contextualizar cómo se concibe desde lo social y cultural la vulnerabilidad, e identificar sus diferencias y particularidades. De esta forma se esboza la relación tan estrecha que existe entre ambos aspectos y al finalizar se obtiene una definición en la que se integran ambos términos.

- **Vulnerabilidad social**

Las diferentes materializaciones de eventos naturales siempre han tenido efectos sobre la población. Bajo las condiciones de variabilidad climática resultan ser aún mayores (e.g., los impactos ocasionados a la población de New Orleans por el Huracán Katrina). Diferentes investigaciones sobre los riesgos y desastres han comprendido desde hace tiempo que las decisiones humanas tienen una influencia en el resultado de los eventos de riesgo (Schmidtlein et al., 2008). Por tanto, la vulnerabilidad social proporciona una mayor comprensión de la manera en que las decisiones que tomamos como sociedad influyen en nuestra experiencia diferencial de eventos peligrosos (Schmidtlein et al., 2008).

La estimación de la vulnerabilidad social resulta ser más compleja considerando las dinámicas sociales que intervienen es su valoración. Schmidtlein et al. (2008) menciona que estos problemas ponen de relieve la necesidad de integrar mejor la investigación de las ciencias sociales en relación con la determinación de la vulnerabilidad social.

En un estudio adelantado por Castaño Mesa (2007) para el Departamento Nacional de Planeación, en cuanto a una aproximación de la vulnerabilidad, indica (citando a Chambers,1995) que *“la vulnerabilidad está determinada por dos dimensiones: la interna y la externa. Por factores externos se entiende las amenazas, los shocks y/o eventos de peligro o estrés. Los internos, en cambio, son la situación de indefensión (sentimiento o incapacidad para defenderse) y la carencia de medios para enfrentar la pérdida”*. Esta definición de vulnerabilidad propuesta por Castaño Mesa, obedece a que la vulnerabilidad es considerada desde una concepción de pobreza en la cual

un hogar o individuo sufre o puede sufrir de uno o más episodios de pobreza o la persistencia de esta (i.e., la pobreza será entendida como aquella que ocurre cuando una persona experimenta una privación fundamental, es decir la carencia de las capacidades básicas o esenciales para su bien-estar).

No obstante, frecuentemente se identifica la condición de pobreza de la gente con vulnerabilidad, para Pizarro (2001) las personas u hogares que vivan con ingresos menores de la línea de pobreza, no necesariamente se deben clasificar vulnerables, para lo cual define la vulnerabilidad social como *“el resultado de los impactos provocados por el patrón de desarrollo vigente pero también expresa la incapacidad de los grupos más débiles de la sociedad para enfrentarlos, neutralizarlos u obtener beneficios de ellos.”*.

Por tanto el enfoque de vulnerabilidad social debe dar cuenta a factores tales como: la indefensión, inseguridad, exposición y resistencia. Ya que si solo se incorpora la variable de pobreza solo expresaría una condición de necesidad resultante de la insuficiencia de ingresos (Chambers, 1989). Según Pizarro (2001), al evaluar la vulnerabilidad social teniendo la variable de pobreza como eje central, su valoración se encuentra limitada ya que no comprende *“el multifacético mundo de los desamparados”*.

Cutter (2003) adelantó una investigación en la cual planteó la necesidad de considerar diferentes enfoques para entender y responder a una vulnerabilidad de la sociedad. Entre ellos se encuentran la sofisticación tecnológica, el acceso limitado a los recursos y el poder político, el capital social, las creencias y las costumbres, las limitaciones físicas de la población (i.e., la construcción de valores, edad, tipo de población) y las características del entorno construido (i.e., densidad de la infraestructura y líneas de vida), variables que no considera el modelo propuesto por Castaño Mesa (2007). Sin embargo el modelo de Cutter se enfoca en las consecuencias que un peligro pueda ocasionar a la sociedad.

- **Vulnerabilidad cultural**

Como hemos visto, la vulnerabilidad social presenta diferentes percepciones, alguna de ellas consideran variables culturales, las cuales son centrados en dimensiones de condiciones de pobreza, exclusion o desde un ámbito económico. Esta variable puede condicionar el análisis, estimación y percepción del riesgo. Ríos and Murgida (2004)



señalan en un artículo sobre la vulnerabilidad cultural y escenarios de riesgo por inundación que: *“En las localidades de Dique Luján y Rincón de Milberg (Partido de Tigre/ Provincia de Buenos Aires) se han expandido una significativa cantidad de urbanizaciones cerradas polderizadas para mitigar el riesgo por inundaciones propio de esa zona. Éstas últimas operarían como un elemento simbólico en la articulación de la construcción identitaria y de la percepción del riesgo para dos sectores socioeconómico y culturalmente diferentes. Nos referimos a dos grupos que poseen estrategias propias para mitigar el riesgo por inundaciones. Por un lado, los nuevos habitantes de las urbanizaciones cerradas, confían en la tecnología, en los profesionales, y en las millonarias inversiones económicas realizadas por los empresarios. Por el otro, quienes poseen cierta antigüedad en la zona, depositan la confianza en los sistemas constructivos propios del lugar como los palafitos, en saberes transmitidos de generación en generación, y su inclusión en redes solidarias locales.”*

Lo planteado por Rios y Murgida hace ver cómo los individuos y comunidades pueden tener diferentes concepciones y maneras de percepción de la vulnerabilidad, aquellas en la cual los medios tecnológicos juegan un papel importante y otras en los saberes ancestrales transmitidos, percepciones que en muchos casos resultan tener opositores de parte y parte. Un ejemplo claro de la oposición a los medios científicos lo menciona Martínez (2012): *“la comunidad indígena de Jenoy, rechaza el manejo que las instituciones han dado a las emergencias generadas por la actividad volcánica del Galeras y en consecuencia expresan su incredulidad en la información científica y se resisten a las ordenes de evacuación. Manifiestan que están acostumbrados a las erupciones de ceniza y asumen al Galeras como el protector que da todo, calor, agua y alimento.”*

Por consiguiente, las consideraciones culturales de una comunidad inciden en sus aspectos sociales por lo que la representación de la vulnerabilidad presenta diferentes facetas de percepción. De esta forma, es posible constatar un estrecho vínculo entre la vulnerabilidad social y cultural, ello explica que la integración de los aspectos culturales, económicos y sociales parecen ser los elementos más apropiados para comprender los nuevos desafíos para comprender la vulnerabilidad y de esta manera poder encontrar medios eficientes y efectivos que logren reducir el impacto de los desastres en el mundo (Fernández, 1996).

En esta investigación, la vulnerabilidad socio-cultural se define como el grado de afectación que pueden tener las comunidades, familias e individuos cuando las estructuras sociales, económicas y culturales se ven afectados o se producen cambios por algún

tipo de evento (i.e., repentino o transformación estructural) que provocan perturbaciones en las condiciones de vida.

A partir de la anterior definición se pueden distinguir dos dimensiones. Una dimensión interna centrada en las características del grupo, comunidad, hogar o individuo (i.e., edad, sexo, valores, practicas ancestrales, resiliencia entre otros) y una dimensión externa la cual considera los rasgos del entorno territorial.

La vulnerabilidad socio-cultural conlleva a establecer relaciones entre los elementos externos al grupo social y las características socio-económicas y culturales que posee dicho grupo (i.e., la situación de indefensión (sentimiento o incapacidad para defenderse), carencia de medios para enfrentar pérdidas y/o acceso de las personas a participar en todos los ámbitos de la sociedad).

A continuación se especifican las variables para su determinación:

- **Capital social.** Es un elemento fundamental para entender las diferencias de los individuos y grupos o comunidades. Las variables son:
  - + Tasa de crecimiento poblacional (%)
  - + Densidad población expresada en hab/km<sup>2</sup>
  - + Distribución poblacional:
    - \* Número de población femenina
    - \* Número de población masculina
    - \* Distribución de la población según la edad
  - + Pertenencia étnica: Número de población indígena, negritudes, raizal
  - + Número de asociaciones, organizaciones comunitarias
  - + Tasa de mortalidad (%)
    - \* Número de defunciones anual
  - + Participación ciudadana: Porcentaje de participación electoral
  - + Reciprocidad. Número de acciones solidarias
- **Capital humano.** Representa el valor que aporta un individuo de acuerdo a sus estudios, conocimientos, capacidades y habilidades. Se encuentran:
  - + Demanda laboral. se expresa en el número de trabajadores requeridos por los megaproyectos públicos y privados
  - + Tasa de ocupación (%)

- + Tasa de desempleo (%)
  - + Número de personas con acceso al sistema de salud: Número de personas que pertenecen al regimen contributivo y subsidiario
  - + Porcentaje de población con niveles educativos (Normalista, técnico profesional, tecnológico, profesional, especialización, maestría y doctorado)
  - + Capital social comunitario: Escolaridad máxima del jefe del hogar, escolaridad promedio de personas de 12 años y más, proporción de jóvenes de 12 a 18 años que asisten a secundaria y universidad
  - + Cobertura educativa (%)
  - + Oferta educativa (%)
  - + Número de personas en un municipio con analfabetismo
  - + Recursos de los hogares -
    - \* Ingresos
- **Capital físico.** Corresponde a las condiciones físicas de una comunidad, grupo social o individuo.
- + Cobertura a servicios públicos en áreas urbanas y rurales (%).
    - \* acueducto
    - \* alcantarillado
    - \* energía
    - \* gas
    - \* recolección de residuos sólidos
  - + Calidad del agua suministrada a la población. Índice de riesgo a la calidad de agua suministrada (IRCA)
  - + Número de pasajeros movilizados por terminal de transporte terrestre y aeropuerto
  - + Tipo de vivienda (%). Corresponde a la participación del tipo de vivienda a escala municipal. Se categorizan por tipo así: casa, apartamento, cuarto(s) en inquilinato, cuarto(s) en otro tipo de estructura, vivienda indígena, otro tipo vivienda com: carpa, tienda, vagón, embarcación, refugio natural, puente.
  - + Calidad de la vivienda: Factor de ponderación de las categorías (%): material predominante de los pisos de la vivienda y material predominante de las paredes de la vivienda
  - + Número de viviendas con acceso a vía vehicular
  - + Índice de deficit de vivienda (%)
  - + Número de instituciones educativas a nivel municipal

- + Número de hospitales, centros de salud a nivel municipal
- + Número de estaciones de policía a nivel municipal
- + Número de estaciones de bomberos a nivel municipal
- + Número de centros de acopio de alimentos
  
- **Capital financiero.** Representa toda aquella liquidez de capital de un individuo y/o comunidad.
  - + Necesidades básicas insatisfechas NBI (%)
  - + Participación en el PBI nacional o departamental del municipio de análisis
  - + Principal actividad económica en un municipio expresada en el mayor número de unidades de la actividad. Entre ellas se encuentran unidades tales como: mantenimiento y reparación, compra y venta productos no fabricados, alojamientos, restaurantes, cafeterías, construcción, transporte, correo y telecomunicaciones, intermediación financiera, seguros, fondos de pensiones y cesantía, educación, salud, servicios sociales, disposición de basuras, entre otros.
  - + Capacidad de ahorro de la población a nivel municipal. Expresa el ahorro corriente / ingreso corriente) x 100
  - + Número de personas que habitan en un hogar a nivel municipal
  - + Número de personas con desnutrición en un hogar
  
- **Capital cultural.** Es aquel que se observa en los bienes materiales de tipo cultural con que la población cuenta, y a los que puede recurrir para su uso en el espacio territorial.
  - + Prácticas ancestrales. Son de grupos de negritudes, indígena y campesinos.
  - + Número de equipamientos culturales para las practicas.
  - + Recursos culturales. Número de organizaciones musicales, danza, teatro, arte en un municipio.
    - \* Número de bienes de interés cultural
    - \* Número de casas de la cultura
    - \* Número de eventos culturales (anuales)
    - \* Número de instituciones con la cátedra de educación ambiental
    - \* Número de eventos de participación en procesos de gestión del riesgo municipal (e.g., formulación, mitigación y reducción)

### 6.3. Vulnerabilidad económica-productiva

La vulnerabilidad económica se encuentra asociada a dos conceptos (Celidoni, 2013): la inseguridad económica y las condiciones de pobreza. Para Celidoni (2013) *“la inseguridad económica, a diferencia de las condiciones de pobreza, se refiere más a la medición subjetiva ex post de la falta de seguridad y no un peligro de pobreza objetiva. Todo el mundo puede sentirse económicamente inseguro pero sólo una parte de la población, las personas vulnerables, son propensos a convertirse en pobres en el futuro. De esta forma la vulnerabilidad económica tiene como objetivo identificar a los pobres de antemano lo que representa una fuente de información ex ante para el diseño de políticas.”*

En esta misma línea varios autores señalan que lo que realmente importante es realizar las intervenciones de lucha contra la pobreza, ya que permite la identificación no solo de aquellos que se encuentran pobres sino de los que no son actualmente pobres, pero que pueden caer. De manera que a futuro la determinación de la vulnerabilidad servirá para adelantar políticas apropiadas para evitar el aumento del número de personas en situación de pobreza (Chaudhuri et al., 2002; Jamal and Policy, 2009; Zhang and Wan, 2008).

Según Wilches Chaux (1988), los sectores económicamente más deprimidos de la humanidad son los más vulnerables frente a los procesos naturales. Esta situación no siempre ocurre así. Un ejemplo de ello se observa en la ciudad de Tunja (Boyacá). Los barrios Urapanes, La Maria y Remansos de Santa Inés que corresponden al estrato socioeconómico alto (5). Durante el año 2010 tuvieron que ser evacuados debido al desbordamiento de los ríos Jordan y la Vega que afectó las viviendas dado que la altura de la inundación fue de más de 1 metro.

Comparativamente, si un mismo evento de inundación se presentara sobre una población económicamente más debil (i.e., estratos 1, 2 y 3) es muy probable que las consecuencias logren percibir la alta fragilidad de estas comunidades.

Para las Naciones Unidas (2006) el concepto de vulnerabilidad económica resulta ser más amplio. Esta definición incorpora a las condiciones de pobreza las dinámicas económicas, las cuales redundan en restricciones sobre el crecimiento principalmente en las condiciones microeconómicas. La determinación de este tipo de vulnerabilidad tiene como propósito identificar los países menos desarrollados.

Bajos estos dos contextos se ha visto que la vulnerabilidad económica tiene dos aristas: desde el punto de vista económico y otra desde lo social. Pero en ninguna de ellas se hace reconocible una variable determinante de los factores que influyen en la productividad y competitividad. Situación que podría conllevar a tener efectos diferenciales para la sociedad de acuerdo con su ubicación o área geográfica.

Esta investigación define la vulnerabilidad económica-productiva como el grado de afectación que tienen los sistemas económicos y productivos (i.e., activos económicos, cadenas de producción, la competitividad, consumo de bienes y servicios) que impactan de manera externa e interna a una sociedad, grupo e individuo.

Los factores externos, corresponden a las condiciones económicas de un país, las cuales se ven influenciadas por las políticas económicas y fiscales, las diferentes crisis que emanan de trastornos en los escenarios internacionales, altas tasas de inflación, inestabilidad del tipo de cambio y altos déficit fiscales, altas tasas de interés efectividad y viabilidad de la política pública, entre otras.

Los factores internos, corresponden a aspectos relacionados con la capacidad económica del individuo, grupo o comunidad, comportamiento de los principales agentes que participan en la economía, los consumidores y las empresas, distribución de ingresos, intercambio y consumo de bienes y servicios, entre otros.

Por consiguiente, para dar cuenta de la vulnerabilidad económica-productiva se consideran las siguientes variables:

– **Producto interno bruto**

- \* Productividad de los diferentes sectores económicos:
  - \* Explotación minera. La cantidad de material extraído de minerales como oro, platino y plata. expresado en kilogramos
  - \* Producción petrolera, expresada en número de barriles.
  - \* Producción agrícola expresada en el número de toneladas producidas por municipio. Producción de café, caña de azúcar, maíz, papa.
- + Exportaciones e importaciones en toneladas
- \* Producto Interno Bruto municipal(%)

– **Factores de producción.**

- + Número de personas empleadas por actividad productiva
- + Población en edad de trabajar (%)
- + Tasa de desempleo (%)
- + Ingresos promedio de los hogares (Pesos /habitante)
- + Gasto de los hogares (Pesos/habitante)
- **Acceso a bienes y servicios.**
  - + Cobertura a servicios públicos en áreas urbanas y rurales (%).
    - \* acueducto
    - \* alcantarillado
    - \* energía
    - \* gas
    - \* recolección de residuos sólidos
  - + Número de personas con acceso al sistema de salud: Número de personas que pertenecen al regimen contributivo y subsidiario
  - + Tipo de vivienda (%). Corresponde a la participación del tipo de vivienda a escala municipal. Se categorizan por tipo así: casa, apartamento, cuarto(s) en inquilinato, cuarto(s) en otro tipo de estructura, vivienda indígena, otro tipo vivienda com: carpa, tienda, vagón, embarcación, refugio natural, puente.
  - + Calidad de la vivienda: Factor de ponderación de las categorías (%): material predominante de los pisos de la vivienda y material predominante de las paredes de la vivienda
  - + Número de viviendas con acceso a vía vehicular
  - + Índice de deficit de vivienda (%)
  - + Número de bibliotecas, museos, casas de la cultura.
    - \* Cobertura Bruta en Educación por Nivel de escolaridad (%)
- **Condiciones del mercado.**
  - + Impuestos. Entre los que se encuentra: a la renta (%), valor agregado (%)
  - \* Índice de precios al consumidor (%)
  - \* Gastos de funcionamiento del estado (%)
  - \* Gastos de inversión del estado (%)
  - \* Tasas de interés a créditos de consumo establecidas por el banco de la república (%).

#### 6.4. Vulnerabilidad político-institucional

Hace algunas décadas existía el viejo sistema de intermediación de la sociedad con el Estado, el cual se hacía por un solo canal, el de los partidos políticos. Esto representaba unos costos burocráticos muy altos, nepotismos y diversas forma de acceder al gobierno sin unas reglas de juego claras. Para Saavedra (2000), era necesario pensar en una nueva distribución de mecanismos, de roles entre organizaciones de la sociedad civil y el sistema político. Una que concilie el andamiaje de las instituciones democráticas con la participación social. Una que propicie el diálogo entre Estado y mercado, entre Gobierno y empresarios, empresarios y sociedad, sociedad y Estado.

En Colombia, a partir de la Constitución Política de 1991, esto cambio. A partir de la descentralización del gobierno se establecieron unas reglas de juego más claras de participación de la sociedad y Estado. Situación que conllevó a que el municipio se convirtiera en el espacio natural de dicha participación ciudadana y que a través de diferentes mecanismos institucionales, administrativos y jurídicos el ciudadano de a pie tuviera acceso a: participación en la gobernanza local y gobierno nacional, adelantar control a partir de veedurias ciudadanas en las diferentes escalas administrativas (i.e., local, departamental, nacional), acceso a subsidios de salud, vivienda y servicios públicos, entre otros mecanismos de cohesión.

Hoy en día, dichos procesos no resultan ser tan transparentes. Las debilidades territoriales se han evidenciado cada día. Un ejemplo de modelo de integrabilidad fue la columna publicada por la revista Semana el 16 de septiembre de 2009 (Naranjo, 2009) que señalo: “*En Colombia los niños todavía mueren por hambre. El panorama de la desnutrición infantil en Colombia es aterrador, según un informe reciente que calcula que 15000 niños mueren al año por enfermedades asociadas a la falta de alimento.*”, ésta y otras situaciones han provocado diferentes cuestionamientos en los ejercicios de control del Estado y la capacidad institucional para ejercerlo a nivel territorial .

No obstante, la descentralización administrativa resulta ser el primer elemento para la existencia del diálogo entre el Estado y la sociedad. Con está descentralización se pretende responder a los desafíos propios del territorio y dar respuesta a las necesidades locales e impulsar el desarrollo local. Si bien, existe una relación muy estrecha entre lo político y/o institucional, también es cierto que dicha relación es muy frágil y que la vulneración a algunos de estos dos aspectos conlleva a tener problemas democráticos (i.e., la percepción negativa ciudadana que se tiene de la política y políticos,



principalmente se relaciona con aspectos de corrupción, poco liderazgo y transfugismo (Infantozzi (2012)), que para González (2000) “*Cada vez más gana aceptación la tesis de que la democracia, para mantenerse a lo largo del tiempo, requiere de un entramado institucional que la sostenga y contribuya a la reproducción de sus normas y valores. Eso no sólo lo demuestran las democracias más antiguas -Inglaterra, Francia, EEUU, los países bajos- y las democracias en proceso de consolidación -Chile, Argentina, Uruguay-, sino también las democracias incipientes -El Salvador, Guatemala, Honduras, Perú-, amenazadas permanentemente por la reversión autoritaria. Si en las primeras es la fortaleza institucional la que explica la permanencia de la democracia, en las segundas es justamente la debilidad institucional la que explica el atascamiento de procesos de políticos y democráticos*”.

Por ende para el cuidado de esta relación debe partir por la pluralidad de las formas institucionales que promuevan un mercado más cívico y al mismo tiempo más competitivo capaces de concebir el beneficio como un instrumento para conseguir objetivos de humanización de la sociedad.

Por ende, esta investigación define como vulnerabilidad político-institucional al grado de afectación de las relaciones entre el Gobierno (local, regional, nacional) y la sociedad. Grado de afectación que se evidencia en la debilidad de los esquemas político institucionales bajo los cuales una población, entidades y organizaciones públicas, privadas, cívicas y organismos internacionales (e.i., ONG 's) pueden ver obstaculizado los mecanismos de participación.

La debilidad de los esquemas político institucionales provoca: la falta de legitimidad (i.e., corrupción, transparencia, enriquecimiento ilícito, entre otros), el deterioro en la oferta de políticas, servicios y bienes públicos y la reducción de la eficiencia institucional (i.e. cumplimiento de objetivos con una maximización de los recursos disponibles) de acuerdo con las características del territorio.

Las variables que inciden para determinar la vulnerabilidad político - institucional son:

- **Responsabilidad.** Mide la eficiencia de la gestión municipal en cuanto a:
  - + Cobertura a servicios públicos en áreas urbanas y rurales (%).
    - \* acueducto
    - \* alcantarillado

- \* energía
- \* gas
- \* recolección de residuos sólidos
- + Número de personas con acceso al sistema de salud: Número de personas que pertenecen al regimen contributivo y subsidiario
- + Índice de desempeño fiscal. Índice que resume en una sola medida, con escala de 0 a 100, los siguientes indicadores: 1) Porcentaje de ingresos corrientes destinados a funcionamiento; 2) Magnitud de la deuda; 3) Porcentaje de ingresos que corresponden a transferencias; 4) Porcentaje de ingresos que corresponden a recursos propios; 5) Porcentaje del gasto total destinado a inversión; 6) Capacidad de ahorro.
- + Cobertura bruta en educación por nivel (%)
- + Nivel de cumplimiento del plan de desarrollo (%)
- + Índice de desempeño de la gestión municipal en cuanto a salud, servicios de educación y agua potable (%)
- + Organización administrativa (%). Se expresa en el nivel de profesionales de la planta de personal.
- **Capital social.** Resulta ser un factor explicativo sobre la manera de cómo la población se organiza alrededor de lo público.
  - + Porcentaje de la población que ejerce su participación en procesos electorales y audiencias públicas (%)
  - + Número de iniciativas populares legislativas. La cuales son todas aquellas iniciativas que ejercen los ciudadanos en cuanto a presentar un proyecto de acto legislativo y de ley ante el Congreso de la República, de Ordenanza ante las Asambleas Departamentales, de Acuerdo ante los Concejos Municipales o Distritales y de Resolución ante las Juntas Administradoras Locales y demás resoluciones de las corporaciones de las entidades territoriales.
  - + Número de organizaciones comunitarias
  - + Número de sindicatos
  - + Número de vocales de control social a la gestión pública
  - + Número de veedurías ciudadanas
  - + Número de organizaciones no gubernamentales
  - + Número de organizaciones ambientales
  - + Número de personas que participan en los partidos políticos

- **Capacidad existente en el sistema institucional.** Identifica las capacidades institucionales para la gestión del territorio. Cada institución bajo su rol estará(n) obligada(s) en la implementación y aplicación de las políticas sectorial, departamentales y nacionales, así como adelantar actos administrativos apropiados en beneficio del común.
  - \* Magnitud de la deuda municipal ( $\text{Saldo de la deuda total} / \text{Ingresos totales}$ ) x 100
  - \* Índice de capacidad administrativa. Compuesto por los indicadores: 1. Estabilidad del personal directivo; 2. Profesionalización de la planta de personal; 3. Disponibilidad de computadores; 4. Automatización de procesos; 5. Contratos por licitación o convocatoria; 6. Capacidad de interventoría; 7. Modelo estándar de control interno.
  - \* Gestión municipal. Mide en términos porcentuales la capacidad administrativa, financiera y sectorial del municipio.
  - \* Índice de cumplimiento de requisitos legales
  - \* Organización administrativa (%). Profesionalización de la planta

### 6.5. Vulnerabilidad urbano-regional

Colombia en los últimos años ha experimentado grandes cambios territoriales, resultado de políticas públicas sociales y económicas. Como consecuencia de dichas transformaciones la dimensión espacial juega un papel importante en cuanto a “ordenar” y “planificar” el uso del suelo.

La dimensión espacial es concebida como herramienta para propiciar un desarrollo sostenible y sustentable tanto rural como urbano. De allí que la ordenación del territorio es un proceso y un instrumento de planificación, de carácter técnico-político-administrativo, con el que se pretende configurar, en el largo plazo, una organización del uso y ocupación del territorio, acorde con las potencialidades y limitaciones del mismo, las expectativas y aspiraciones de la población y los objetivos de desarrollo.

El ordenamiento del territorio se considera desde diversos ángulos (i.e., económicos, sociales, culturales, ambientales, urbanísticos, entre otros). La intersección de dichos aspectos tiene como objetivo fundamental el mejoramiento de las condiciones de vida de la población que habita en este. Sin embargo, el ordenamiento territorial afecta (i.e., positiva o negativamente) a la región (i.e, geográfica y administrativa), de forma

que dentro de un análisis más amplio (regional) se deben reconocer las particularidades que intervienen en el ordenamiento del territorio que permitan una actuación con mayor convergencia y armonía.

Algunos ejemplos de la convergencia regional son: las corporaciones autónomas regionales -CAR y el sistema nacional de parques nacionales naturales -SNPNN en donde la territorialidad de estas instituciones supera los límites administrativos, territorialidad definida por condiciones naturales.

Adicionalmente a lo anterior, es importante tener en cuenta los componentes básicos, las condiciones, características y localización de los elementos que componen el territorio (i.e., urbano, rural y regional); de allí que estas particularidades facilita el reconocimiento de las funciones territoriales, la identificación de espacios funcionales en el territorio, así como el análisis de compatibilidad de intereses que en él convergen.

Por ende, esta investigación define como vulnerabilidad urbano-regional al grado de afectación que tiene el territorio en cuanto a su estructura física, social, económica, institucional, urbanística y ambiental, las cuales se traducen normalmente en conflictos por el uso de recursos (ya sea a escala nacional, regional o local).

Por lo anterior se consideran las siguientes variables para la determinación de la vulnerabilidad urbano-regional:

- **Características físicas de los sistemas de infraestructura.** Corresponde a un conjunto de elementos físicos que se encuentran en un espacio geográfico y que ofrecen soporte al territorio. En este conjunto se encuentran:
  - + Vocación del suelo (%).
    - \* vocación del suelo para uso agrícola (%).
    - \* vocación del suelo para uso agroforestal (%).
    - \* vocación del suelo para uso conservación (%).
    - \* vocación del suelo para uso forestal (%).
    - \* vocación del suelo para uso ganadero (%).
    - \* vocación del suelo para uso zonas urbanas (%).
    - \* vocación del suelo para uso cuerpos de agua (%).
  - + Densidad población expresada en hab/km<sup>2</sup>

- + Tipo de vivienda (%). Corresponde a la participación del tipo de vivienda a escala municipal. Se categorizan por tipo así: casa, apartamento, cuarto(s) en inquilinato, cuarto(s) en otro tipo de estructura, vivienda indígena, otro tipo vivienda com: carpa, tienda, vagón, embarcación, refugio natural, puente.
  - + Calidad de la vivienda: Factor de ponderación de las categorías (%): material predominante de los pisos de la vivienda y material predominante de las paredes de la vivienda
  - + Número de viviendas con acceso a vía vehicular
  - + Índice de deficit de vivienda (%)
  - + Equipamentos culturales y deportivos. Número de museos, número de bibliotecas, número de áreas deportivas, número de parques.
  - + Equipamentos físicos. Número de vías principales, secundarias y terciarias,
  - + Equipamentos institucionales.
    - \* número de colegios y/o centros educativos,
    - \* número de hospitales y/o centros de salud.
    - \* número de estaciones de policía
    - \* numero de comandancia de fuerzas militares (%).
    - \* número de estaciones de bomberos.
    - \* número de centros de accesos a la justicia
    - \* número de sedes del gobierno local
    - \* número de sedes del gobierno local
    - \* número terminal de transporte terrestre
    - \* número de aeropuerto (%).
  - + Cobertura a servicios públicos en áreas urbanas y rurales (%).
    - \* acueducto
    - \* alcantarillado
    - \* energía
    - \* gas
    - \* recolección de residuos sólidos
  - \* Número de hectáreas sembradas
- **Estructura del territorio.** Considera elementos estructurales naturales los cuales estan debidamente definidos como:
- + Ecosistemas estrategicos. Áreas protegidas (Ha), Número de reservas y parques naturales

- + Recursos hídricos.
  - \* Número de fuentes hídricas,
  - \* Calidad de las fuentes de agua (expresado en DBO, DQO, SST)
  - \* Calidad del agua suministrada a la población (IRCA)
- + Superficie natural (Ha)
  - \* Bosque andino fragmentado y plantado (Ha).
  - \* Bosque bazal (amazónico, fragmentado, orinoco, pacífico, plantado) (Ha).
  - \* Bosque ripario (Ha).
  - \* Ecosistema andino e interandino (Ha).
  - \* Especial pantano Caribe (Ha).
  - \* Especial rupicola amazónico (Ha).
  - \* Áreas de bosques. Número de hectáreas sembradas con bosques por municipio
  - \* Superficie glacial (km<sup>2</sup>)
  - \* Área de paramo (Ha)
- **Estructura económica.**
  - + Productividad de los diferentes sectores económicos primario, secundario, terciario (%)
  - + Producción agrícola expresada en el número de toneladas producidas por municipio. Producción de café, caña de azúcar, maíz, papa
  - + Producción minera y petrolera. expresada en toneladas y número de barriles
  - + Inversión en educación (%) discriminado por los siguientes subsectores.
    - \* construcción infraestructura (%)
    - \* mantenimiento infraestructura (%)
    - \* dotación (%)
    - \* pago servicios públicos (%)
    - \* transporte escolar (%)
    - \* alimentación escolar (%)
    - \* pago de la deuda (%)
  - \* Inversión en salud (miles de pesos)
  - \* Número de personas ocupadas
  - \* Subsidios de vivienda asignados. (Número total de subsidios / Número total de habitantes del municipio) X 1.000

– **Estructura social.**

- + Necesidades básicas insatisfechas NBI
  - + Tasa de crecimiento poblacional (%)
  - + Densidad población expresada en hab/km<sup>2</sup>
  - + Distribución poblacional
    - \* Número de población femenina
    - \* Número de población masculina
    - \* Distribución de la población según la edad
    - \* Índice de envejecimiento
  - + Pertenencia étnica: Número de población indígena, negritudes, raizal
  - + Prácticas ancestrales. Son de grupos de negritudes, indígena y campesinos.
  - + Número de asociaciones, organizaciones comunitarias
  - + Tasa de mortalidad (%)
    - \* Número de defunciones presentadas en el último año
      - \* Número de defunciones anual
  - + Porcentaje de la población que ejerce su participación en: procesos electorales (%)
  - + Número de bienes culturales y casas de la cultura

– **Convergencia regional.** Se identifica los lineamientos regionales en función de las características y condiciones del territorio.

- \* Número de políticas regionales
- \* Número de instrumentos de planificación territorial regional

## Capítulo 7

# Tratamiento de la vulnerabilidad

A continuación se explican cada uno de los pasos realizados para estandarizar las variables de tercer y segundo nivel. Posterior a ello, la incorporación del modelo AHP para vulnerabilidad, seguidamente se genera los caminos de representación para cada tipo de vulnerabilidad y por último se plantea la ecuación para determinar la vulnerabilidad total.

### 7.1. Procesamiento de la vulnerabilidad

#### 7.1.1. Estandarización

A partir de las diferentes variables que componen cada tipo de vulnerabilidad y considerando que cada una de ellas presentan heterogeneidad en sus valores, se propone a continuación la estandarización de dichas variables con el propósito de adelantar la operatividad entre ellas. Para lo cual se empleó la siguiente ecuación:

$$IE = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7.1)$$

Donde:

$X$  = Variable

$X_{min}$  = Valor mínima

$X_{max}$  = Valor máximo

Por consiguiente, el proceso de asignación de los valores corresponderá a un intervalo de:

$$X_1 = 0 \text{ y } X_n = 1$$



El proceso de asignación de los valores (mínimo y máximo) se lleva a cabo sistemáticamente de la siguiente forma:

1. Se organizaron los datos en orden de la representación de cada variable. Esto significa que no siempre el valor mínimo de la variable deba ser cero o el valor máximo deba ser 1. La asignación del orden dependerá de las características indicativas de la variable objeto de análisis.
2. Se asignó los valores de preferencia para cada valor de la variable que es objeto de análisis. Seguidamente se empleó la ecuación 7.1.
3. Por último se obtiene el escenario de representación de la vulnerabilidad a escala municipal.

## 7.2. Caminos de representación de la vulnerabilidad

Los caminos de representación de la vulnerabilidad son una herramienta que toma en consideración diferentes posibilidades de representación lineal y no lineal. El análisis de las variables empleadas para determinar la vulnerabilidad ha permitido evidenciar que el comportamiento de estas variables se representa bajo una función no lineal.

Tal y como se mencionó en el sección 5.3 la mayoría de los sistemas de la vida real tienen características no lineales. En este sentido, los caminos de representación de la vulnerabilidad permite representar la función de linealidad y no linealidad para cada variable.

El escenario de representación del factor de vulnerabilidad ERFV es una expresión matemática (tomada de Parra (2013)) que identifica diferentes comportamiento de una variable (ei.g., cada una de las variables empleadas para determinar los diferentes tipos de vulnerabilidad). Dichos comportamientos conforme con el parámetro de curva asignado el cual representa condiciones de tres caminos de comportamiento: uno lineal, dos no lineales concavo y convexo.

Se busco que la ecuación del escenario de representación del factor de vulnerabilidad ERFV cumpliera las siguientes condiciones:

- Cuando el IE = 0, ERFV = 0
- Cuando el IE = 1, ERFV = 1

- Para cualquier valor de  $\alpha$  e  $IE$ ,  $0 \geq ERFV \leq 1$ .

El escenario de representación del factor de vulnerabilidad ERFV se determina considerando la ecuación 7.2. La representación de dicha ecuación establece una relación entre el ERFV y factor de vulnerabilidad estandarizado, la cual bajo los diferentes escenarios denota el comportamiento de la variable de estudio. Como resultado se obtienen curvas ERFV que representan esta relación, la cual puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación:

$$ERFV = (1 - \alpha^{IE})^{(1-IE)} \quad (7.2)$$

Donde:

ERFV = escenario de representación del factor de vulnerabilidad ERFV  
 $\alpha$  = Factor parámetro de curva. Representa los diferentes escenarios de comportamiento de la variable estandarizada IE. Dicho factor se encuentra representado entre 0 y 1  
 IE= Valor de la variable estandarizada. La Figura 7.1 muestra escenario de representación del factor de vulnerabilidad ERFV (i.e., la relación entre el escenario de representación del factor de vulnerabilidad y la variable estandarizada).

Por tanto, en esta comparación se observa que el camino de representación del factor de vulnerabilidad ERFV varía para cada escenario propuesto. Esta variación obedece a que cada escenario representa un tipo de comportamiento del ERFV que en nuestro caso es cóncavo, lineal y convexo.

Una vez realizada la representación de los caminos para cada variable, se debe seleccionar por cada variable de cada tipo de vulnerabilidad la trayectoria que mejor representa la variable, posterior estas variables seleccionadas deben ser sometidas a la afectación del peso del experto de cada una de ellas. Para lo cual se empleó la siguiente ecuación:

$$Vpn = \frac{\sum (ERFV_i * Wv_i)}{\sum Wvd} \quad (7.3)$$

donde:

$Vpn$  = Variable de primer nivel

$ERFV_i$  = Camino de representación seleccionado de la vulnerabilidad

$Wv_i$  = Peso del experto asignado a la variable<sub>i</sub>

$Wvd$  = Peso de la variables que se cuenta con información

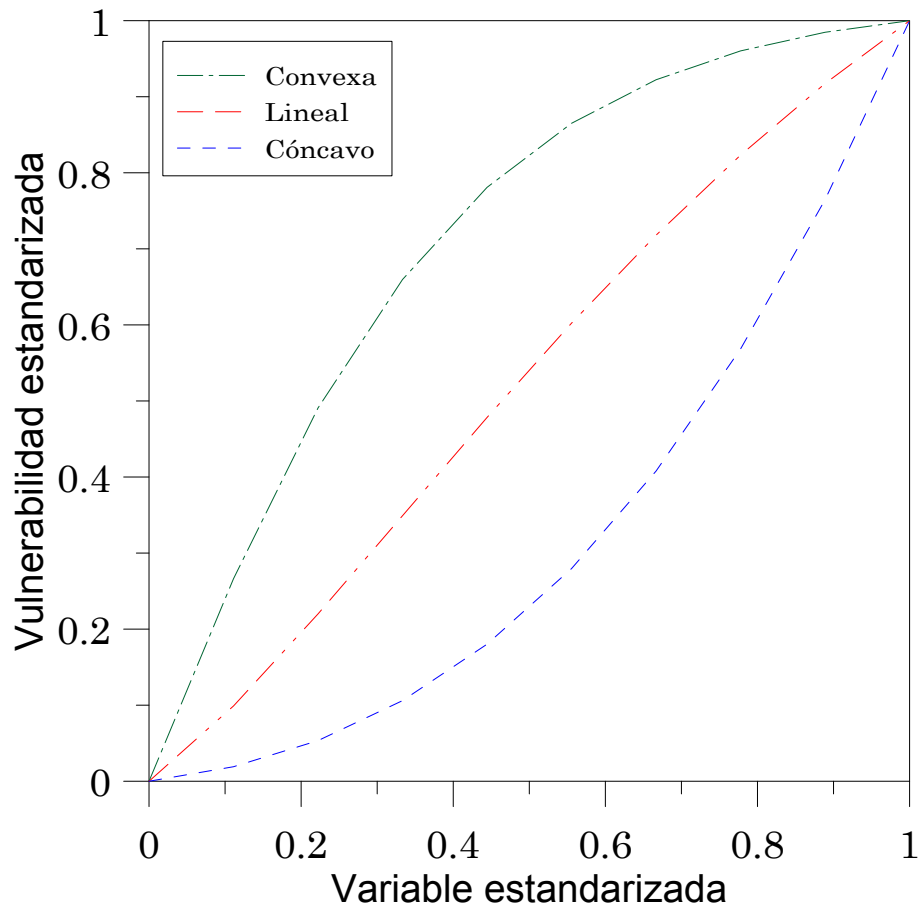


Figura 7.1: Comportamiento del índice diferencial del factor de vulnerabilidad

Una vez surtido este paso, para obtener el valor de cada tipo de vulnerabilidad (i.e., socio-cultural, natural, económico-productivo, urbano-regional, político-institucional) es necesario emplear la siguiente ecuación:

$$V_i = \sum (V_{pni} * WV_{pni}) \quad (7.4)$$

donde:

$V_i$  = Vulnerabilidad tipo

$i$  = Socio-cultural, natural, económico-productivo, urbano-regional, político-institucional

$V_{pn}$  = Variable de primer nivel

$WV_{pn}$  = Peso del experto asignado a cada variable de primer nivel  $i$

### 7.3. Determinación vulnerabilidad total

Con el fin de obtener una vulnerabilidad total se emplea la siguiente ecuación:

$$V_t = \sum (V_i * WV_t) \quad (7.5)$$

donde:

$V_t$  = Vulnerabilidad total

$V_i$  = Vulnerabilidad tipo  $WV_t$  = Peso del experto asignado a cada tipo de vulnerabilidad  $i$

Con base en lo anterior se obtiene el valor de la vulnerabilidad total, la cual será uno de los insumos para determinar el riesgo.

### 7.4. Modelo AHP para la vulnerabilidad

Tal y como se indicó en el capítulo 3, uno de los pasos es la selección de expertos, los cuales se definieron por cada una de los factores de vulnerabilidad. A continuación se detallan los perfiles profesionales, investigativos y laborales de cada uno de ellos:

- **Vulnerabilidad socio-cultural.**

- **Juan Carlos Pulido**

- **Jairo Clavijo Poveda.** Antropólogo de la Universidad de los Andes y Licenciado en Ciencias Sociales de la Universidad Pedagógica Nacional. Doctorado Université De Paris Iii (Sorbonne-Nouvelle) Doctorat en Anthropologie. Sus áreas de investigación son: Antropología Urbana, Antropología de la Enfermedad y estudios sobre riesgo. Entre sus investigaciones se destaca la publicación del Libro "Cantar bajo la anaconda" de editorial Javeriana.

- **Vulnerabilidad natural**

- **Brigitte Baptiste.** Bióloga de la Pontificia Universidad Javeriana. Doctorado Universidad de Barcelona Economía Ecológica y Manejo de Recursos Naturales. Sus áreas de investigación son: Ecología de paisajes culturales, análisis de

procesos de transformación del territorio, historia ecológico-económica de sistemas productivos, análisis multicultural de uso y manejo de biodiversidad. En la actualidad es directora del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt Colombia.

- **Luis Alberto Villa Durán.** Biólogo, Pontificia Universidad Javeriana. Candidato a Magíster en Gestión Ambiental, Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en sensores remotos y sistemas de información geográfica para el estudio y manejo integrado de zonas costeras del Instituto Internacional de Investigaciones Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra. Sus áreas de investigación son: Análisis de transformaciones de la cobertura y usos del paisaje y factores condicionantes, análisis geomorfológico para estudios del paisaje y del territorio, ecología y gestión ambiental urbana y regional.
- **Laura Marcela Vargas.** Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander. Magíster en Ingeniería Civil, Área de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental, Profundización en Aguas, Universidad de los Andes. Sus áreas de investigación son: Gestión ambiental, problemática ambiental, gestión del recurso hídrico, tratamiento de aguas residuales domésticas, manejo y disposición de residuos sólidos.

### ■ Vulnerabilidad político - institucional

- **Martha Lucía Gutiérrez Bonilla** Enfermera de la Pontificia Universidad Javeriana. Magister en desarrollo Rural de la Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Salud Internacional de la Organización Panamericana de la Salud. Actualmente es Profesora Facultad de Ciencia Política y Relaciones Internacionales y Directora del Observatorio Javeriano de Juventud.

### ■ Vulnerabilidad económico - productiva

- **Cesar Attilio Ferrari.** Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Ph. D. en Economía y Master en Desarrollo Económico de Boston University, Master en Planificación Regional y Urbana de New York. Se ha desempeñado como Director Técnico del Instituto Nacional de Planificación del Perú, Asesor del Fondo Monetario Internacional en los Bancos Centrales de Angola y de Guinea- Bissau en políticas económicas, monetarias, financieras y fiscales. Ha sido Sub-Gerente General de Retex Peruana y Gerente de Finanzas y Administración de Inversiones COFIDE de Perú. Sus áreas de investigación son: Política Económica, Regulación Económica, Economía Urbana y Regional.
- **Beatriz Eugenia Giraldo Castaño.** Administradora de Negocios y Especialista en Finanzas de la Universidad Eafit, con experiencia en el sector de servicios

públicos de acueducto y alcantarillado y en el sector financiero. Actualmente se desempeña como Directora Técnica de Gestión de Acueducto y Alcantarillado, de la Superintendencia de Servicios Públicos, ejerciendo las funciones de vigilancia y control en las empresas de servicios públicos en Colombia.

### ■ Vulnerabilidad urbano - regional

- **Nelson Obregón Neira.** Ingeniería Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta. PhD en Hidrología. University of California, Davis, USA. Docente e investigador en las áreas de Hidrología, Ambiental e Hidráulica. Profesor de los cursos Hidráulica Fluvial, Mecánica de fluidos, Hidrología Básica, Hidrología Avanzada, Elementos Finitos y Estructuras Hidráulicas. Cursos de educación continuada: Geoestadística Aplicada, Hidrología Urbana; Gestión Integral de Cuencas (para ASOCARS); Herramientas Prácticas para la concepción y desarrollo de proyectos y productos de investigación en Ingeniería; y Fundamentos y Aplicación de Sensores Remotos en el Análisis de Cuencas. Director de los dos Grupos de Investigación “Hidrocencias” (Reconocido por Colciencias, 2002) e “Informática y Métodos Matemáticos Aplicados” de la Facultad de Ingeniería. Miembro del Comité de Investigación de la Facultad de Ingeniería y del Comité Institucional de Investigación. Colaborador con el Proceso de Autoevaluación y Acreditación de la Carrera de Ingeniería Civil. Ha sido director de: La Maestría en Hidrosistemas y del Doctorado en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Actualmente es director del Instituto Geofísico de la Pontificia Universidad Javeriana.
- **Luis Alberto Jaramillo.** Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Planeación e Ingeniería Sanitaria de la Universidad Técnica de Munich, Alemania. Docente de cátedra en el campo de la Ingeniería Sanitaria y Ambiental desde 1983. Durante más de 12 años trabajó en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, donde fue Gerente de Planeamiento y Gerente General. Trabajó 6 años con la firma francesa Degremont, en el diseño, construcción y operación de la PTAR el Salitre de Bogotá. Ha trabajado en consultoría en el sector de agua y medio ambiente, principalmente en diseño y operación de plantas de tratamiento por cerca de 15 años.

#### 7.4.1. Combinación diferentes opiniones de expertos

El modelo AHP ofrece un buen recurso para establecer los pesos entre las diferentes comparaciones. Estas comparaciones nos sirven para capturar el juicio de experto como ya lo hemos mencionado. A cada juicio emitido por el experto se obtiene un vector propio, el

cual proporciona el peso de cada variable (criterio, alternativa).

Considerando que se tienen diferentes opiniones de expertos tanto para la amenaza como para la vulnerabilidad cada una de ellas con diferentes valores de opinión, se debe aplicar el método de combinación lineal de opiniones de varios expertos sobre una misma variable (López and Dolado, 2009). El objetivo es obtener un solo y único valor para cada variable para que al final se consiga un valor global tanto para los tipos de amenaza y vulnerabilidad.

Dicho método de combinación lineal de opiniones responde a la siguiente ecuación 7.6:

$$x = X_1E_1 + X_2E_2 + \dots + X_nE_n = \sum_{i=1}^n X_iE_i \quad (7.6)$$

Donde:

X= Conjunto de vectores propios.

E = Factor peso de cada experto.

Por tanto se obtendrá una valor global por cada componente

#### 7.4.2. Modelo jerárquico para la vulnerabilidad

A partir de las definiciones propuestas para describir los diferentes tipos de vulnerabilidad, se busca identificar qué tipo de vulnerabilidad presenta más relevancia cuando se comparan entre ellas. Esta relevancia se realiza para cada uno de los componente de los SAAP, la cual surge a partir de las valoraciones realizadas por los expertos tanto a la matriz de criterios como a la matriz de alternativas.

Como punto inicial se estableció la Figura 7.3 que identifica la estructura jerárquica principal. A continuación se describe cada uno de los niveles establecidos en la mencionada figura:

1. **Nivel I Identificación del problema u objetivo.** En esta fase se pretende identificar por cada componente estructural que tipo de vulnerabilidad presenta la mayor relevancia comparadas entre ellas. En este sentido, se formuló la siguiente pregunta a cada uno de los expertos: ¿En su concepto cuál de los factores de vulnerabilidad tendría mayor “pérdida directa, capacidad de recuperación, pérdida indirecta”, cuando se materializa una amenaza en el componente de (fuente de abastecimiento, captación, aducción, planta de potabilización, conducción y red de distribución)?.

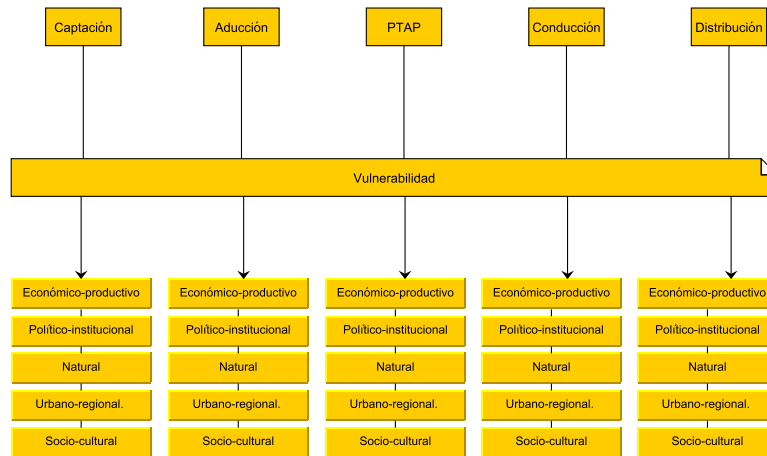


Figura 7.2: Estructura del modelo jerárquico del tipo de vulnerabilidad  
Fuente: El autor

2. **Nivel II Criterios.** Como se puede observar en la Figura 7.3 la jerarquía considera tres criterios: Pérdida directa (Asociadas a la afectación del componente), capacidad de recuperación (Relacionada con el tiempo que tarda en recuperarse el componente) y pérdida indirecta (Asociada a afectaciones que puede presentar un tercero con ocasión de una pérdida directa).
3. **Nivel III Alternativas.** Se consideraron 5 alternativas. Cada una de ellas representa las cinco categorías definidas en esta investigación para estimar la vulnerabilidad. (e.i., Urbano-regional, socio-cultural, político-institucional, natural, económico-productivo)

#### Matriz de comparación

El modelo AHP, plantea que para adelantar la calificación a través de la escala de los juicios de importancia, se debe realizar la matriz de comparación por pares de los elementos del mismo nivel de la jerarquía propuesta. Estas matrices cuadradas reflejan el predominio relativo de un elemento frente a otro respecto a un componente de los SAAP. Este proceso de comparación conduce a establecer pesos entre dichos elementos del mismo nivel.

- **Matriz de comparación de criterios**

Los criterios definidos en esta investigación (Pérdida directa, capacidad de recuperación y pérdida indirecta) se encuentran relacionados con el problema al cual afectan significativamente al momento de tomar la decisión y que a su vez resultan ser aspectos vitales en el



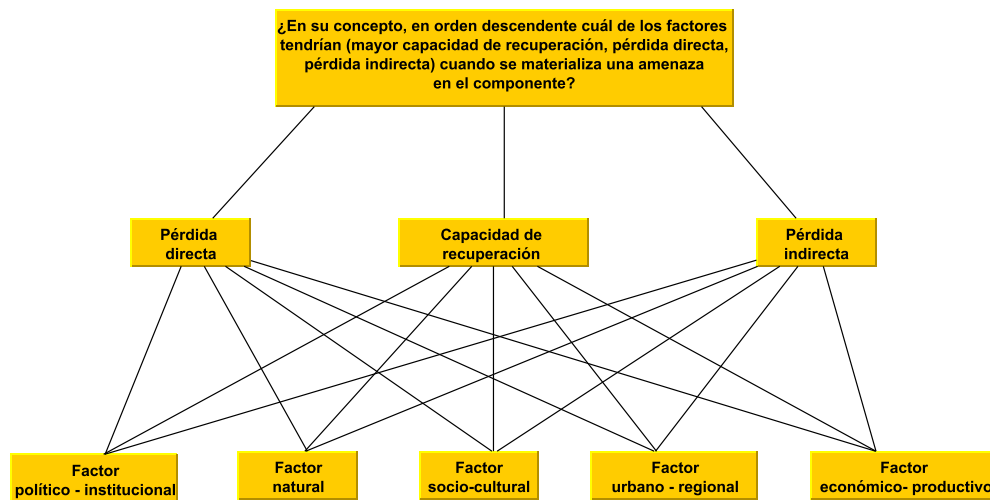


Figura 7.3: Estructura del modelo jerárquico del tipo de vulnerabilidad

análisis de la vulnerabilidad.

Dichos criterios fueron comparados mediante una matriz de comparación considerando cada uno de los componentes del SAAP (e.i., fuente de abastecimiento, captación, etc). En este sentido, se planteó una interrogante para determinar la preferencia de cada experto: ¿Para usted, considerando el componente (fuente de abastecimiento, captación, aducción, planta de potabilización, red de distribución y conducción) cual criterio (Pérdida directa, capacidad de recuperación y pérdida indirecta) presenta una mayor importancia para determinar el factor de vulnerabilidad?.

Con base en la anterior pregunta, a cada experto le fue entregado una serie de documentos los cuales contenían un documento con las definiciones de los componentes de los SAAP y definiciones de criterios y alternativas, esquema de la jerarquía (Ver Figura 7.3) y cuadros con las matrices comparativas de criterios y alternativas (Ver Tabla 7.1). Así mismo por solicitud expresa de algunos expertos se realizó un acompañamiento en el diligenciamiento de las matrices. Este tipo de veeduría se dio como parte del compromiso de los expertos para realizar la entrega de los valoraciones.

#### ▪ Matriz de comparación de alternativas

Las alternativas corresponden a propuestas viables mediante las cuales se podrá alcanzar el objetivo general. Dichas alternativas corresponden al cumplimiento del objetivo. En esta etapa se realizaron tres matrices comparativas de las alternativas, las cuales consideran

CAPÍTULO 7. TRATAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD

---

<b>Fuente de abastecimiento</b>	Pérdida indirecta	Capacidad de recuperación	Pérdida directa
Pérdida indirecta	1		
Capacidad de recuperación		1	
Pérdida directa			1
<b>Captación</b>			
Pérdida indirecta	1		
Capacidad de recuperación		1	
Pérdida directa			1
<b>Aducción</b>			
Pérdida indirecta	1		
Capacidad de recuperación		1	
Pérdida directa			1
<b>Planta de potabilización</b>			
Pérdida indirecta	1		
Capacidad de recuperación		1	
Pérdida directa			1
<b>Conducción</b>			
Pérdida indirecta	1		
Capacidad de recuperación		1	
Pérdida directa			1
<b>Red de distribución</b>			
Pérdida indirecta	1		
Capacidad de recuperación		1	
Pérdida directa			1

Tabla 7.1: Criterios Matriz principal

los tres criterios seleccionados. La evaluación se realizó para cada uno de los componentes de los SAAP.

En esta fase se busca elegir la alternativa más representativa, para lo cual fue considerado la siguiente interrogante ¿En su concepto cuál de los factores de vulnerabilidad tendría mayor “pérdida directa, capacidad de recuperación, pérdida indirecta”, cuando se mate-

## 7.4. MODELO AHP PARA LA VULNERABILIDAD

---

realiza una amenaza en el componente de (fuente de abastecimiento, captación, aducción, planta de potabilización, conducción y red de distribución)?.

La Tabla 7.4.2 muestra un ejemplo de la matriz comparativa empleada por los expertos para emitir su opinión.

<b>Pérdida directa</b>	Político-institucional	Natural	Socio-cultural	Urbano-regional	Económico-productivo
Político-institucional	1				
Natural		1			
Socio-cultural			1		
Urbano-regional				1	
Económico-productivo					1

<b>Capacidad de recuperación</b>	Político-institucional	Natural	Socio-cultural	Urbano-regional	Económico-productivo
Político-institucional	1				
Natural		1			
Socio-cultural			1		
Urbano-regional				1	
Económico-productivo					1

<b>Pérdida indirecta</b>	Político-institucional	Natural	Socio-cultural	Urbano-regional	Económico-productivo
Político-institucional	1				
Natural		1			
Socio-cultural			1		
Urbano-regional				1	
Económico-productivo					1

Tabla 7.2: Alternativas jerarquía principal

### 7.4.3. Jerarquía anidada en relación con el tipo de vulnerabilidad

Adicionalmente, por cada alternativa perteneciente a la jerarquía principal, se elaboró una jerarquía secundaria o jerarquía anidada. El objetivo de esta jerarquía es la de iden-

tificar las variables que harán posible la determinación del tipo de vulnerabilidad. Esto significó que cada tipo de vulnerabilidad tuviera su propia jerarquía anidada (Ver esquemas Figura 7.4).

La estructura de esta jerarquía anidada sigue siendo similar a lo anteriormente señalado Problema/Objetivo, criterios de decisión y alternativas. Las alternativas propuestas en esta jerarquía anidada, presentan en su interior un número de variables que dan cuenta de esta alternativa y el conjunto de alternativas darán cuenta del tipo de vulnerabilidad.

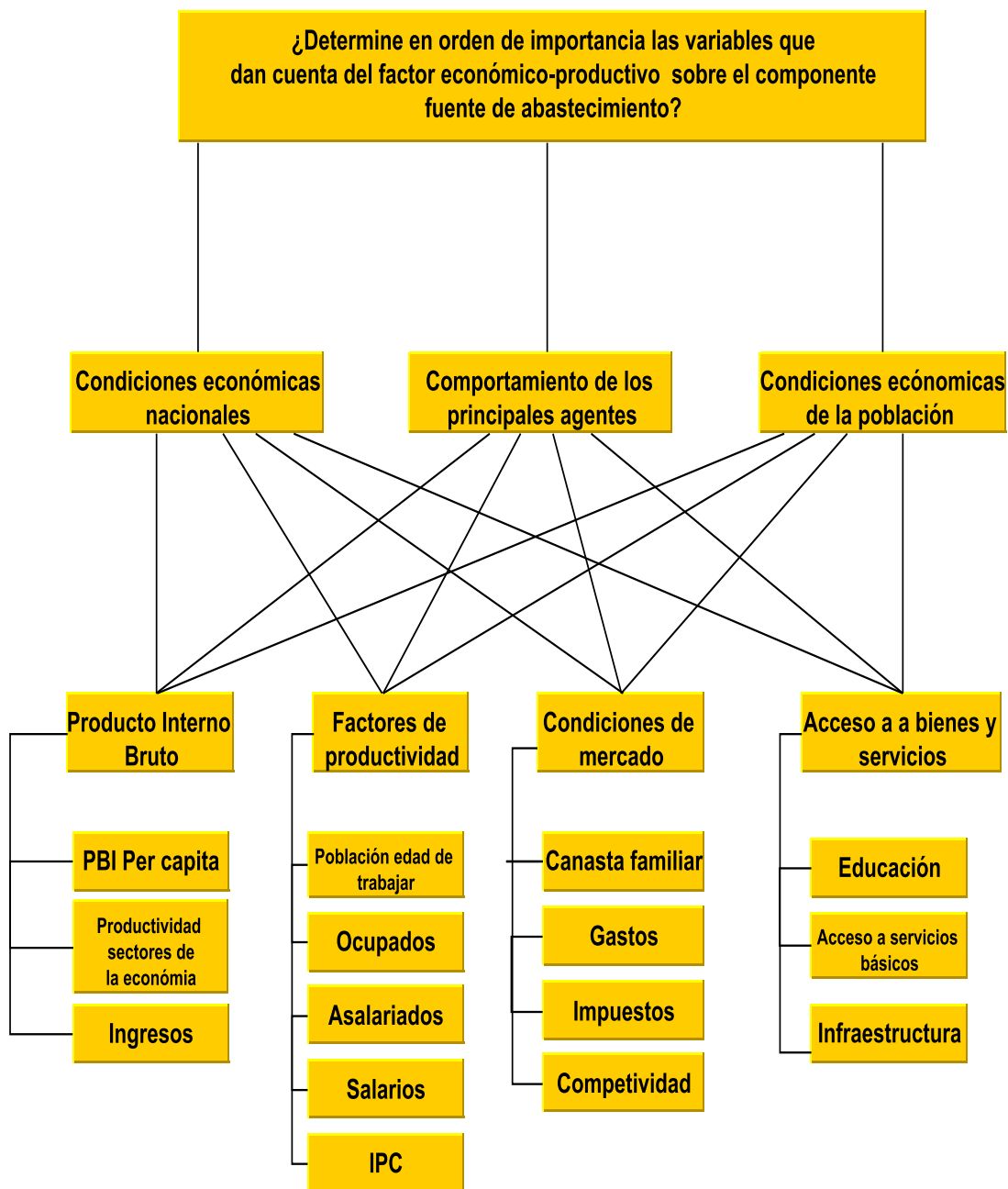
Para determinar el juicio de experto en esta jerarquía anidada, fue necesario identificar y clasificar la experticia del experto, de manera que de acuerdo con la mayor área de experiencia del experto se le asignara el tipo de vulnerabilidad para su correspondiente opinión. Esta clasificación temática por experto se encuentra descrita en la sección 3.2.

A continuación se detallan de manera genérica cada una de las diferentes matrices de comparación entre criterios y alternativas, vale la pena recordar que se realizó a cada uno de los componentes del SAAP:

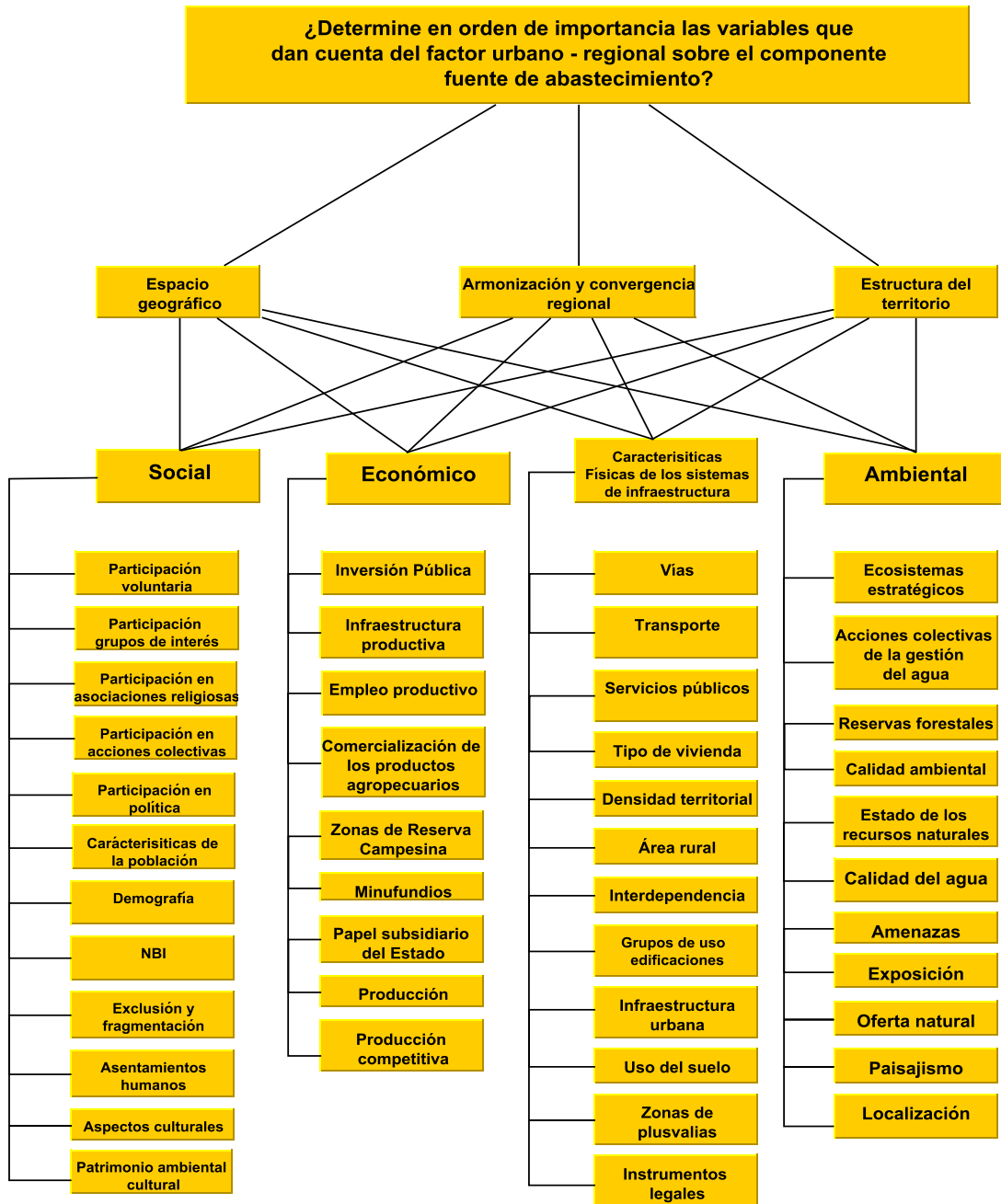
- **Vulnerabilidad urbano regional.** En la Tabla 7.3 se detalla la matriz de criterios y en la Tabla 7.4 la matriz de alternativas para la vulnerabilidad urbano - regional.
- **Vulnerabilidad económico - productiva.** En la Tabla 7.5 se detalla la matriz de criterios y en la Tabla 7.6 la matriz de alternativas para la vulnerabilidad económico - productiva.
- **Vulnerabilidad natural.** En la Tabla 7.8 se detalla la matriz de criterios y en la Tabla 7.7 la matriz de alternativas para la vulnerabilidad natural.
- **Vulnerabilidad socio - cultural.** En la Tabla 7.9 se detalla la matriz de criterios y en la Tabla 7.10 la matriz de alternativas para la vulnerabilidad socio - cultural.
- **Vulnerabilidad político - institucional.** En la Tabla 7.11 se detalla la matriz de criterios y en la Tabla 7.12 la matriz de alternativas para la vulnerabilidad político - institucional.

Considerando que al interior de cada una de las alternativas propuestas para cada tipo de vulnerabilidad, se encuentra una serie de variables las cuales proporcionan los valores

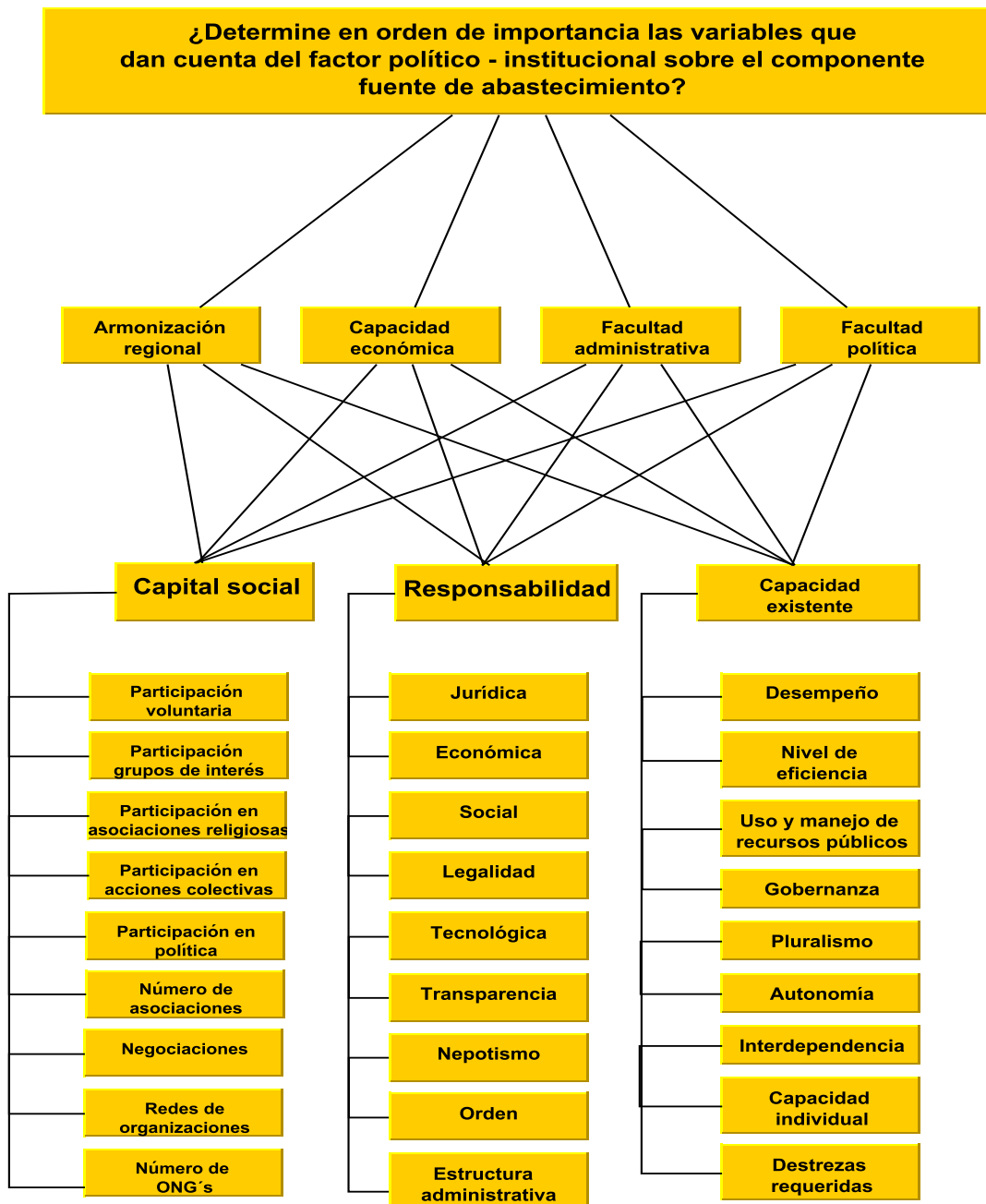
(datos, indicadores e índices) para determinar la vulnerabilidad, se solicitó al experto con base en la calificación del juicio de importancia relativa Tabla 3.1 referida con anterioridad que proporcionara una valoración de la importancia entre cada una de las variables de acuerdo con el tipo de vulnerabilidad, de manera que se obtuviera los pesos relativos por cada variable.



(a) Jerarquía económico-productiva



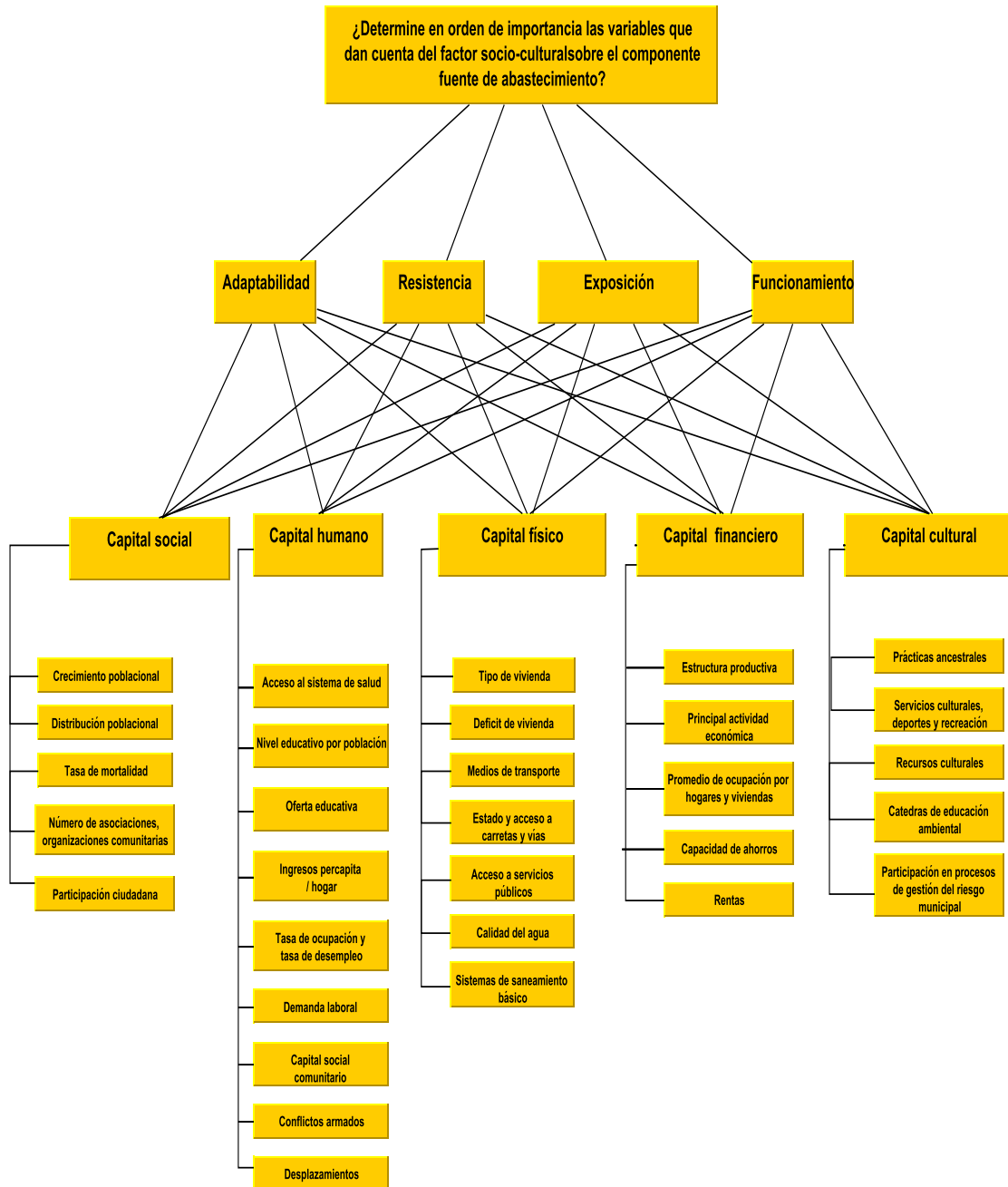
(b) Jerarquía Urbano -regional



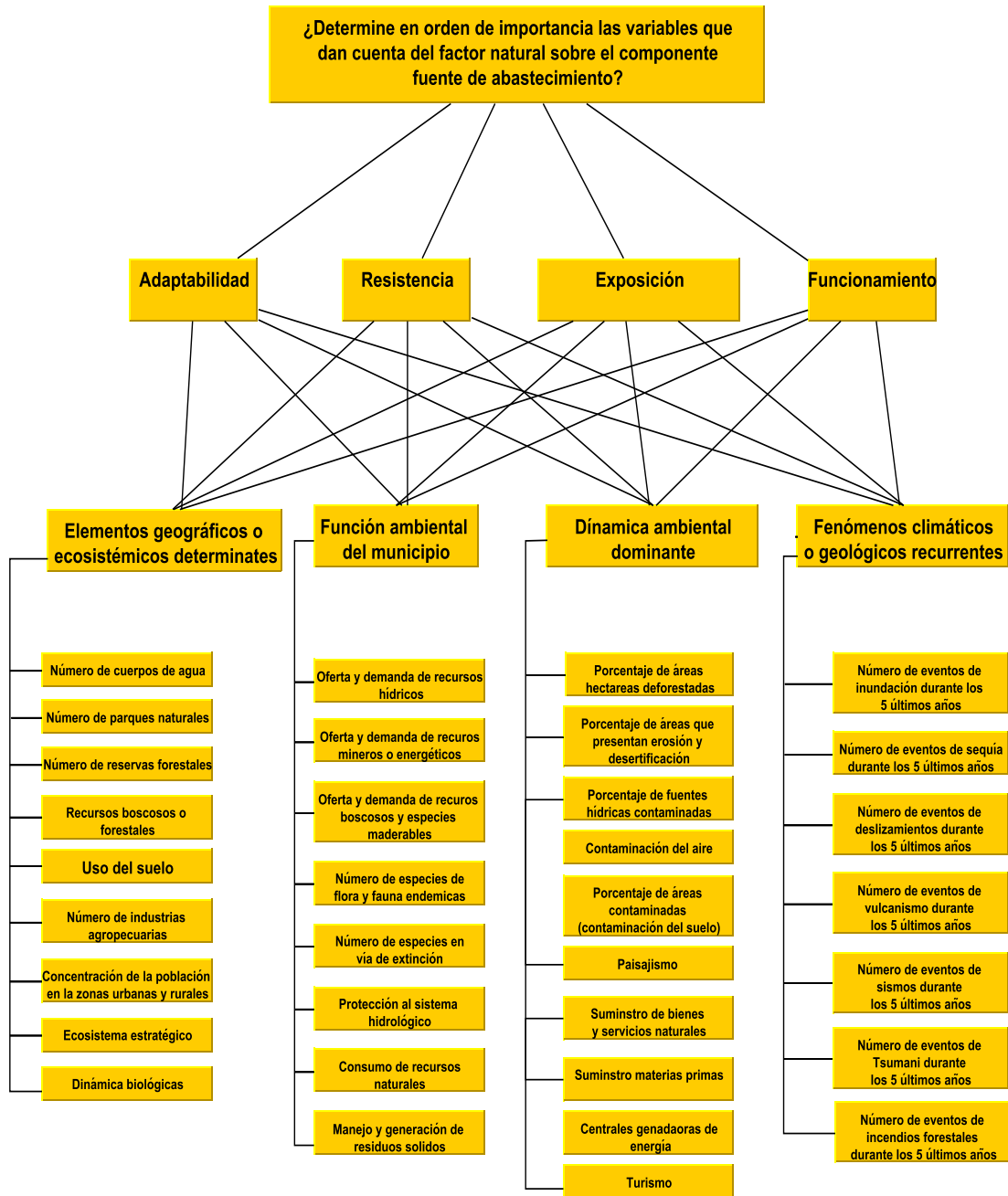
(c) Jerarquía político-institucional



7.4. MODELO AHP PARA LA VULNERABILIDAD



(d) Jerarquía socio-cultural



(e) Jerarquía natural

Figura 7.4: Esquemas de jerarquías anidadas por tipos vulnerabilidad

#### 7.4. MODELO AHP PARA LA VULNERABILIDAD

<b>Criterios matriz secundaria vulnerabilidad urbano-regional</b>			
<b>Fuente de abastecimiento</b>	Espacio geográfico	Armonización y convergencia regional	Estructura del territorio
Espacio geográfico	1		
Armonización y convergencia regional		1	
Estructura del territorio			1
<b>Captación</b>	Espacio geográfico	Armonización y convergencia regional	Estructura del territorio
Espacio geográfico	1		
Armonización y convergencia regional		1	
Estructura del territorio			1
<b>Aducción</b>	Espacio geográfico	Armonización y convergencia regional	Estructura del territorio
Espacio geográfico	1		
Armonización y convergencia regional		1	
Estructura del territorio			1
<b>Planta de potabilización</b>	Espacio geográfico	Armonización y convergencia regional	Estructura del territorio
Espacio geográfico	1		
Armonización y convergencia regional		1	
Estructura del territorio			1
<b>Conducción</b>	Espacio geográfico	Armonización y convergencia regional	Estructura del territorio
Espacio geográfico	1		
Armonización y convergencia regional		1	
Estructura del territorio			1
<b>Red de distribución</b>	Espacio geográfico	Armonización y convergencia regional	Estructura del territorio
Espacio geográfico	1		
Armonización y convergencia regional		1	
Estructura del territorio			1

Tabla 7.3: matriz criterios vulnerabilidad urbano - regional

## CAPÍTULO 7. TRATAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD

---

Alternativas matriz secundaria vulnerabilidad urbano - regional					
Componente					
<b>Espacio Geográfico</b>		Social	Económico	Características Físicas de los sistemas de infraestructura	Ambiental
Social		1			
Económico			1		
Características Físicas de los sistemas de infraestructura				1	
Ambiental					1
<b>Armonización y convergencia regional</b>		Social	Económico	Características físicas de los sistemas de infraestructura	Ambiental
Social		1			
Económico			1		
Características físicas de los sistemas de infraestructura				1	
Ambiental					1
<b>Estructura del territorio</b>		Social	Económico	Características físicas de los sistemas de infraestructura	Ambiental
Social		1			
Económico			1		
Características físicas de los sistemas de infraestructura				1	
Ambiental					1

Tabla 7.4: Matriz alternativas vulnerabilidad urbano-regional

## 7.4. MODELO AHP PARA LA VULNERABILIDAD

<b>Criterios matriz secundaria vulnerabilidad económico - productiva</b>			
<b>Fuente de abastecimiento</b>	Condiciones económicas nacionales	Comportamiento de los principales agentes	Condiciones económicas de la población
Condiciones económicas nacionales	1		
Comportamiento de los principales agentes		1	
Condiciones económicas de la población			1
<b>Captación</b>	Condiciones económicas nacionales	Comportamiento de los principales agentes	Condiciones económicas de la población
Condiciones económicas nacionales	1		
Comportamiento de los principales agentes		1	
Condiciones económicas de la población			1
<b>Aducción</b>	Condiciones económicas nacionales	Comportamiento de los principales agentes	Condiciones económicas de la población
Condiciones económicas nacionales	1		
Comportamiento de los principales agentes		1	
Condiciones económicas de la población			1
<b>Planta de potabilización</b>	Condiciones económicas nacionales	Comportamiento de los principales agentes	Condiciones económicas de la población
Condiciones económicas nacionales	1		
Comportamiento de los principales agentes		1	
Condiciones económicas de la población			1
<b>Conducción</b>	Condiciones económicas nacionales	Comportamiento de los principales agentes	Condiciones económicas de la población
Condiciones económicas nacionales	1		
Comportamiento de los principales agentes		1	
Condiciones económicas de la población			1
<b>Red de distribución</b>	Condiciones económicas nacionales	Comportamiento de los principales agentes	Condiciones económicas de la población
Condiciones económicas nacionales	1		
Comportamiento de los principales agentes		1	
Condiciones económicas de la población			1

Tabla 7.5: Matriz criterios vulnerabilidad económico - productivo

## CAPÍTULO 7. TRATAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD

Alternativas matriz secundaria vulnerabilidad económico - productiva				
Componente				
<b>Condiciones económicas nacionales</b>	Producto Interno Bruto	Factores de productividad	Condiciones de mercado	Acceso a a bienes y servicios
Producto Interno Bruto	1			
Factores de productividad		1		
Condiciones de mercado			1	
Acceso a a bienes y servicios				1
<b>Comportamiento de los principales agentes</b>	Producto Interno Bruto	Factores de productividad	Condiciones de mercado	Acceso a a bienes y servicios
Producto Interno Bruto	1			
Factores de productividad		1		
Condiciones de mercado			1	
Acceso a a bienes y servicios				1
<b>Condiciones económicas de la población</b>	Producto Interno Bruto	Factores de productividad	Condiciones de mercado	Acceso a a bienes y servicios
Producto Interno Bruto	1			
Factores de productividad		1		
Condiciones de mercado			1	
Acceso a a bienes y servicios				1

Tabla 7.6: Matriz de alternativas económico - productivo

Alternativas matriz secundaria vulnerabilidad natural				
Componente				
<b>Resistencia</b>	Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes	Función ambiental del municipio	Dinámica ambiental dominante	Fenómenos climáticos o geológicos recurrentes
Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes	1			
Función ambiental del municipio		1		
Dinámica ambiental dominante			1	
Fenómenos climáticos o geológicos recurrentes				1
<b>Adaptabilidad</b>	Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes	Función ambiental del municipio	Dinámica ambiental dominante	Fenómenos climáticos o geológicos recurrentes
Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes	1			
Función ambiental del municipio		1		
Dinámica ambiental dominante			1	
Fenómenos climáticos o geológicos recurrentes				1
<b>Funcionamiento</b>	Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes	Función ambiental del municipio	Dinámica ambiental dominante	Fenómenos climáticos o geológicos recurrentes
Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes	1			
Función ambiental del municipio		1		
Dinámica ambiental dominante			1	
Fenómenos climáticos o geológicos recurrentes				1
<b>Exposición</b>	Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes	Función ambiental del municipio	Dinámica ambiental dominante	Fenómenos climáticos o geológicos recurrentes
Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes	1			
Función ambiental del municipio		1		
Dinámica ambiental dominante			1	
Fenómenos climáticos o geológicos recurrentes				1

Tabla 7.7: Matriz de alternativas vulnerabilidad natural

#### 7.4. MODELO AHP PARA LA VULNERABILIDAD

---

**Criterios matriz secundaria vulnerabilidad natural**

<b>Fuente de abastecimiento</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Captación</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Aducción</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Planta de potabilización</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Conducción</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Red de distribución</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

Tabla 7.8: Matriz de criterios vulnerabilidad natural

CAPÍTULO 7. TRATAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD

---

<b>Criterios matriz secundaria vulnerabilidad socio - cultural</b>
--

<b>Fuente de abastecimiento</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Captación</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Aducción</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Planta de potabilización</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Conducción</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

<b>Red de distribución</b>	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Resistencia	1			
Funcionamiento		1		
Adaptabilidad			1	
Exposición				1

Tabla 7.9: Matriz de criterios vulnerabilidad socio-cultural



7.4. MODELO AHP PARA LA VULNERABILIDAD

<b>Alternativas matriz secundaria vulnerabilidad socio - cultural</b>	
<b>Componente</b>	

<b>Resistencia</b>	Capital social	Capital humano	Capital físico	Capital financiero
Capital social	1			
Capital humano		1		
Capital físico			1	
Capital financiero				1

<b>Adaptabilidad</b>	Capital social	Capital humano	Capital físico	Capital financiero
Capital social	1			
Capital humano		1		
Capital físico			1	
Capital financiero				1

<b>Funcionamiento</b>	Capital social	Capital humano	Capital físico	Capital financiero
Capital social	1			
Capital humano		1		
Capital físico			1	
Capital financiero				1

<b>Exposición</b>	Capital social	Capital humano	Capital físico	Capital financiero
Capital social	1			
Capital humano		1		
Capital físico			1	
Capital financiero				1

Tabla 7.10: Matriz de alternativas vulnerabilidad socio-cultural

## CAPÍTULO 7. TRATAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD

<b>Criterios matriz secundaria vulnerabilidad político - institucional</b>				
<b>Fuente de abastecimiento</b>	Armonización regional	Capacidad económica	Facultad administrativa	Facultad política
Armonización regional	1			
Capacidad económica		1		
Facultad administrativa			1	
Facultad política				1
<b>Captación</b>	Armonización regional	Capacidad económica	Facultad administrativa	Facultad política
Armonización regional	1			
Capacidad económica		1		
Facultad administrativa			1	
Facultad política				1
<b>Aducción</b>	Armonización regional	Capacidad económica	Facultad administrativa	Facultad política
Armonización regional	1			
Capacidad económica		1		
Facultad administrativa			1	
Facultad política				1
<b>Planta de potabilización</b>	Armonización regional	Capacidad económica	Facultad administrativa	Facultad política
Armonización regional	1			
Capacidad económica		1		
Facultad administrativa			1	
Facultad política				1
<b>Conducción</b>	Armonización regional	Capacidad económica	Facultad administrativa	Facultad política
Armonización regional	1			
Capacidad económica		1		
Facultad administrativa			1	
Facultad política				1
<b>Red de distribución</b>	Armonización regional	Capacidad económica	Facultad administrativa	Facultad política
Armonización regional	1			
Capacidad económica		1		
Facultad administrativa			1	
Facultad política				1

Tabla 7.11: Matriz criterios vulnerabilidad político - institucional

<b>Alternativas matriz secundaria vulnerabilidad político - institucional</b>	
<b>Componente</b>	

<b>Armonización regional</b>	Capital social	Responsabilidad	Capacidad existente
Capital social	1		
Responsabilidad		1	
Capacidad existente			1

<b>Capacidad económica</b>	Capital social	Responsabilidad	Capacidad existente
Capital social	1		
Responsabilidad		1	
Capacidad existente			1

<b>Facultad administrativa</b>	Capital social	Responsabilidad	Capacidad existente
Capital social	1		
Responsabilidad		1	
Capacidad existente			1

<b>Facultad política</b>	Capital social	Responsabilidad	Capacidad existente
Capital social	1		
Responsabilidad		1	
Capacidad existente			1

Tabla 7.12: Matriz de alternativas vulnerabilidad político - institucional

#### 7.4.4. Matriz principal vulnerabilidad

A continuación se muestran los resultados de los pesos obtenidos para los criterios y alternativas de la matriz principal de la vulnerabilidad.

##### 7.4.4.1. Prioridades entre los criterios y alternativas

A partir de la calificación realizada por cada uno de los expertos, se construyó una matriz con los diferentes resultados obtenidos por tipo de componente. La Tabla 7.13 y la Tabla 7.14 proporcionan las diferentes prioridades para identificar el tipo de vulnerabilidad más representativa para cada componente de los SAAP.

Componente	Pérdida indirecta	Capacidad de recuperación	Pérdida directa
Fuente	<b>0,43</b>	0,34	0,23
Captación	<b>0,48</b>	0,36	0,16
Aducción	<b>0,47</b>	0,36	0,17
PTAP	<b>0,47</b>	0,38	0,15
Conducción	<b>0,49</b>	0,37	0,14
Red Distribución	<b>0,45</b>	0,39	0,16

Tabla 7.13: Pesos para los criterios matriz principal vulnerabilidad

Vulnerabilidad	Fuente	Captación	Aducción	PTAP	Conducción	Red distribución
Político-institucional	0,20	0,20	<b>0,26</b>	<b>0,26</b>	<b>0,25</b>	<b>0,30</b>
Natural	<b>0,32</b>	<b>0,25</b>	0,21	0,15	0,17	0,20
Socio-cultural	0,18	0,22	0,19	0,22	0,21	0,20
Urbano-regional	0,13	0,15	0,14	0,15	0,15	0,12
Económico-productivo	0,17	0,20	0,21	0,22	0,22	0,18

Tabla 7.14: Pesos para las alternativas matriz principal vulnerabilidad

#### 7.4.5. Matriz secundaria vulnerabilidad - Variables de primer nivel

A continuación se presentan los resultados para cada tipo de vulnerabilidad en la que se indican las variables de primer nivel “alternativas” que obtuvieron una mayor calificación.

##### 7.4.5.1. Resultados obtenidos para criterios y variables de primer nivel “alternativas” - vulnerabilidad natural

Los resultados obtenidos para la matriz secundaria de la vulnerabilidad natural son:

Componente	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Fuente	0,35	<b>0,36</b>	0,15	0,14
Captación	<b>0,41</b>	0,27	0,19	0,13
Aducción	0,24	0,24	0,25	<b>0,27</b>
PTAP	0,36	<b>0,42</b>	0,09	0,13
Conducción	0,30	<b>0,37</b>	0,23	0,10
Red Distribución	<b>0,39</b>	0,34	0,19	0,08

Tabla 7.15: Pesos para los criterios matriz secundaria vulnerabilidad natural

#### 7.4. MODELO AHP PARA LA VULNERABILIDAD

Alternativas	Fuente	Captación	Aducción	PTAP	Conducción	Red distribución
Elementos geográficos/ecosistémicos determinantes	0,38	0,30	0,40	0,37	0,30	<b>0,43</b>
Función ambiental del municipio	<b>0,41</b>	<b>0,50</b>	<b>0,40</b>	<b>0,38</b>	0,41	0,32
Dinámica ambiental dominante	0,21	0,19	0,19	0,25	0,29	0,25

Tabla 7.16: Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad natural

#### 7.4.5.2. Resultados obtenidos para criterios y variables de primer nivel “alternativas” - vulnerabilidad económico-productiva

Los resultados obtenidos para criterios y variables de primer nivel para la vulnerabilidad económico-productiva son los siguientes:

Componente	Condiciones económicas nacionales	Comportamiento de los principales agentes	Condiciones económicas de la población
Fuente	<b>0,41</b>	<b>0,41</b>	0,17
Captación	0,42	<b>0,45</b>	0,13
Aducción	<b>0,46</b>	0,40	0,14
PTAP	<b>0,55</b>	0,31	0,13
Conducción	<b>0,44</b>	0,36	0,20
Red Distribución	<b>0,54</b>	0,31	0,15

Tabla 7.17: Pesos para los criterios matriz secundaria vulnerabilidad económico-productivo

## CAPÍTULO 7. TRATAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD

Alternativa	Fuente	Captación	Aducción	PTAP	Conducción	Red distribución
Producto Interno Bruto	<b>0,39</b>	<b>0,37</b>	<b>0,36</b>	<b>0,42</b>	<b>0,42</b>	<b>0,39</b>
Factores de productividad	0,22	0,30	0,31	0,23	0,20	0,21
Condiciones de mercado	0,18	0,16	0,15	0,15	0,16	0,18
Acceso a bienes y servicios	0,21	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23

Tabla 7.18: Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad económico-productivo

### 7.4.5.3. Resultados obtenidos para criterios y variables de primer nivel “alternativas” - vulnerabilidad socio-cultural

Los resultados obtenidos para la matriz secundaria son:

Componentes	Resistencia	Funcionamiento	Adaptabilidad	Exposición
Fuente	<b>0,60</b>	0,20	0,08	0,12
Captación	<b>0,51</b>	0,26	0,04	0,19
Aducción	<b>0,64</b>	0,19	0,06	0,10
PTAP	<b>0,40</b>	0,32	0,05	0,24
Conducción	<b>0,38</b>	0,38	0,06	0,18
Red Distribución	<b>0,59</b>	0,18	0,05	0,18

Tabla 7.19: Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad socio-cultural

Alternativa	Fuente	Captación	Aducción	PTAP	Conducción	Red distribución
Capital social	<b>0,57</b>	<b>0,56</b>	<b>0,53</b>	<b>0,52</b>	<b>0,48</b>	<b>0,58</b>
Capital humano	0,24	0,25	0,20	0,21	0,21	0,23
Capital físico	0,15	0,15	0,21	0,21	0,27	0,15
Capital financiero	0,04	0,04	0,06	0,06	0,04	0,04

Tabla 7.20: Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad socio-cultural

7.5. SELECCIÓN ESCENARIOS DE REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VULNERABILIDAD

---

**7.4.5.4. Resultados obtenidos para criterios y variables de primer nivel “alternativas” - vulnerabilidad urbano-regional**

Para la matriz secundaria de la vulnerabilidad urbano-regional los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

Componentes	Espacio geográfico	Armonización y convergencia regional	Estructura del territorio
Fuente	<b>0,59</b>	0,26	0,14
Captación	<b>0,56</b>	0,29	0,15
Aducción	<b>0,39</b>	0,33	0,28
PTAP	<b>0,36</b>	0,36	0,28
Conducción	<b>0,39</b>	0,33	0,28
Red Distribución	0,23	<b>0,51</b>	0,26

Tabla 7.21: Pesos para los criterios matriz secundaria vulnerabilidad urbano-regional

Alternativa	Fuente	Captación	Aducción	PTAP	Conducción	Red distribución
Social	0,21	0,20	0,18	0,24	0,21	0,25
Económico	0,21	0,22	0,20	0,34	0,28	0,29
Características Físicas de los sistemas de infraestructura	0,16	0,19	0,20	<b>0,43</b>	<b>0,37</b>	<b>0,35</b>
Ambiental	<b>0,42</b>	<b>0,39</b>	<b>0,41</b>	0,14	0,15	0,11

Tabla 7.22: Pesos para las alternativas matriz secundaria vulnerabilidad urbano-regional

**7.5. Selección escenarios de representación de los diferentes tipos de vulnerabilidad**

Antes de calcular la vulnerabilidad total, se debe seleccionar variable por variable de cada tipo de vulnerabilidad la trayectoria lineal o no lineal que se representa mejor de la variable. A continuación se describe la selección.

Este trabajo se planteó identificar y seleccionar que trayectoria (i.e., parámetro de curva) representaría mejor cada una de las variables de tercer nivel, de manera que sirviera de insumo para la ecuación 7.3. De tal forma que a continuación se presentan las trayectorias

seleccionadas por cada variables para cada tipo de vulnerabilidad.

### 7.5.1. Vulnerabilidad natural

- Elementos geográficos o ecosistémicos determinantes

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Porcentaje de área agrícola sembrada			X
Número de especies de flora y fauna	X		
Áreas protegidas	X		
Número de fuentes hídricas	X		
Número total de personas que residen en área rural		X	
Número total de personas que residen en área urbana		X	
Número de reservas forestales	X		
Bosques naturales	X		
Parques naturales	X		

Tabla 7.23: Selección de trayectorias - variables elementos geográficos o ecosistémicos determinantes

- Función ambiental del municipio

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Demanda de agua clima cálido			X
Demanda de agua clima frío			X
Índice de vulnerabilidad hídrica	X		
Consumo distritos de riego	X		
Número de especies animal			
Número de especies vegetal	X		
Interconexión eléctrica			X
Producción minera	X		
Producción petrolera	X		

Tabla 7.24: Selección de trayectorias - variables función ambiental del municipio

- Dinámica ambiental dominante



7.5. SELECCIÓN ESCENARIOS DE REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VULNERABILIDAD

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Demanda de agua clima cálido			X
Demanda de agua clima frío			X
Consumo distritos de riego	X		
Calidad hídrica	X		
Calidad del agua suministrada a la población (IRCA)	X		
Conflictos por el uso del suelo	X		
Número de hectáreas de bosques sembradas	X		

Tabla 7.25: Selección de trayectorias - variables dinámica ambiental dominante

**7.5.2. Vulnerabilidad socio-cultural**

A continuación se identifican las trayectorias para cada variable de la vulnerabilidad socio-cultural.

- Capital social

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Tasa de crecimiento poblacional		X	
Población masculina			X
Población femenina			X
Número de hectáreas de bosques sembradas	X		
Número de defunciones	X		
Densidad poblacional		X	
Participación electoral	X		

Tabla 7.26: Selección de trayectorias - variables capital social

- Capital humano
- Capital financiero
- Capital físico

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Afiliados régimen contributivo			X
Afiliados régimen subsidiado	X		
Cobertura Bruta en Educación por Nivel	X		
Nivel Educativo Técnico y Profesional	X		
Capital social comunitario			X
Desempleados	X		
Ocupados-trabajadores	X		

Tabla 7.27: Selección de trayectorias - variables capital humano

- Capital cultural

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Practicas ancestrales			X
Casas de cultura			X
Bienes culturales	X		
Eventos culturales			X
Registros culturales			X

Tabla 7.30: Selección de trayectorias - variables capital cultural

### 7.5.3. Vulnerabilidad económica-productiva

A continuación se identifican las trayectorias para cada variable de la vulnerabilidad económica-productiva. Estas se organizan conforme con el modelo AHP.

- Producto interno bruto

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Necesidades básicas insatisfechas	X		
PBI	X		
Actividad económica	X		
Capacidad de ahorro	X		

Tabla 7.28: Selección de trayectorias - variables capital financiero

7.5. SELECCIÓN ESCENARIOS DE REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VULNERABILIDAD

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Cobertura Rural de Acueducto	X		
Cobertura Rural de Alcantarillado	X		
Cobertura Rural de Energía Eléctrica	X		
Cobertura Rural de Gas Natural	X		
Cobertura Total de Telefonía			X
Cobertura Urbana de Acueducto	X		
Cobertura Urbana de Alcantarillado	X		
Cobertura Urbana de Energía Eléctrica	X		
Cobertura Urbana de Gas Natural	X		
Calidad del agua potable	X		
Pasajeros Movilizados por Aeropuerto			X
Pasajeros Movilizados por Terminal			X
Calidad de la vivienda	X		
viviendas con acceso a vías			X
Deficit de Vivienda	X		

Tabla 7.29: Selección de trayectorias - variables capital físico

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
PIB	X		
Producción agrícola	X		
Producción café	X		
Producción caña de azúcar	X		
Producción de maíz	X		
Producción minera	X		
Producción papa	X		
Producción petrolera	X		

Tabla 7.31: Selección de trayectorias - variables Producto interno bruto

- Condiciones de mercado

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Impuestos			X
Gastos de funcionamiento del estado	X		

Tabla 7.32: Selección de trayectorias - variables condiciones de mercado

- Factores de producción

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Ocupados-trabajadores	X		
Desempleados	X		
Población en edad de trabajar			X

Tabla 7.33: Selección de trayectorias - variables factores de producción

- Accesos a bienes y servicios

#### 7.5.4. Vulnerabilidad político-institucional

A continuación se identifican las trayectorias para cada variable de la vulnerabilidad político-institucional.

- Capital social

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Participación colectiva			X
Participación política			X
Participación voluntaria	X		

Tabla 7.35: Selección de trayectorias - variables capital social

- Responsabilidad

7.5. SELECCIÓN ESCENARIOS DE REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VULNERABILIDAD

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Cobertura Rural de Acueducto	X		
Cobertura Rural de Alcantarillado	X		
Cobertura Rural de Energía Eléctrica	X		
Cobertura Rural de Gas Natural	X		
Cobertura Total de Telefonía			X
Cobertura Urbana de Acueducto	X		
Cobertura Urbana de Alcantarillado	X		
Cobertura Urbana de Energía Eléctrica	X		
Cobertura Urbana de Gas Natural	X		
Afiliados régimen contributivo			X
Afiliados régimen subsidiado	X		
Calidad de la vivienda	X		
viviendas con acceso a vías			X
Deficit de Vivienda	X		
Casas de cultura			X
Museos			X
Cobertura Bruta en Educación por Nivel	X		

Tabla 7.34: Selección de trayectorias - variables accesos a bienes y servicios

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Cobertura Rural de Acueducto	X		
Cobertura Rural de Alcantarillado	X		
Cobertura Rural de Energía Eléctrica	X		
Cobertura Rural de Gas Natural	X		
Cobertura Total de Telefonía			X
Cobertura Urbana de Acueducto	X		
Cobertura Urbana de Alcantarillado	X		
Cobertura Urbana de Energía Eléctrica	X		
Cobertura Urbana de Gas Natural	X		
Afiliados régimen contributivo			X
Afiliados régimen subsidiado	X		
Índice de desempeño fiscal	X		
Cobertura Bruta en Educación por Nivel	X		
Nivel de cumplimiento del plan de desarrollo	X		
Índice de desempeño	X		
Organización administrativa	X		

Tabla 7.36: Selección de trayectorias - variables responsabilidad

- Capacidad existente sistema institucional

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Índice de desempeño fiscal	X		
Nivel de cumplimiento del plan de desarrollo	X		
Organización administrativa	X		
Índice de cumplimiento de requisitos legales	X		
Gestión municipal	X		

Tabla 7.37: Selección de trayectorias - variables capacidad existente sistema institucional

### 7.5.5. Vulnerabilidad urbano-regional

A continuación se identifican las trayectorias para cada variable de la vulnerabilidad urbano-regional.

- Características físicas de los sistemas de infraestructura

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Área agrícola sembrada	X		
Casas de cultura			X
Museos			X
Número de bibliotecas			X
Calidad de la vivienda	X		
viviendas con acceso a vías			X
Deficit de Vivienda	X		
Equipamentos deportivos	X		
Cobertura Rural de Acueducto	X		
Cobertura Rural de Alcantarillado	X		
Cobertura Rural de Energía Eléctrica	X		
Cobertura Rural de Gas Natural	X		
Cobertura Total de Telefonía			X
Cobertura Urbana de Acueducto	X		
Cobertura Urbana de Alcantarillado	X		
Cobertura Urbana de Energía Eléctrica	X		
Cobertura Urbana de Gas Natural	X		
Continuidad del servicio de agua	X		
Vocación suelo agrícola	X		
Vocación suelo agroforestal	X		
Vocación suelo cuerpos de agua	X		
Vocación suelo de conservación	X		
Vocación suelo forestal	X		
Vocación suelo para ganadería	X		
Vocación suelo urbano	X		
Pasajeros Movilizados por Aeropuerto			X
Pasajeros Movilizados por Terminal			X
Densidad poblacional		X	

Tabla 7.38: Selección de trayectorias - variables Características físicas de los sistemas de infraestructura

## 7.5. SELECCIÓN ESCENARIOS DE REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VULNERABILIDAD

---

- Estructura del territorio

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Calidad del agua suministrada a la población (IRCA)	X		
Áreas protegidas	X		
Número de fuentes hídricas	X		
Número de hectáreas de bosques sembradas	X		
Calidad hídrica	X		
Número de reservas forestales	X		
Bosques naturales	X		
Parques naturales	X		
Superficie glaciar			X
Páramo	X		
Agroecosistema Basal	X		
Bosque Andino fragmentado	X		
Bosque Andino plantado	X		
Bosque Andino	X		
Bosque Basal amazónico	X		
Bosque Basal fragmentado	X		
Bosque Basal Orinoco	X		
Bosque Basal pacífico	X		
Bosque Basal plantado	X		
Bosque ripario	X		
Ecosistema Andino	X		
Ecosistema Interandino	X		
Especial Pantano caribe	X		
Especial Pantano caribe	X		

Tabla 7.39: Selección de trayectorias - variables estructura del territorio

- Estructura económica

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Actividad económica	X		
Producción agrícola	X		
Producción café	X		
Producción caña de azúcar	X		
Producción de maíz	X		
Producción minera	X		
Producción papa	X		
Producción petrolera	X		
Inversión en educación total	X		
Inversión en salud	X		
Ocupados-trabajadores	X		
Subsidios de vivienda asignados	X		

Tabla 7.40: Selección de trayectorias - variables estructura económica

- Estructura económica

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Necesidades básicas insatisfechas	X		
Practicadas ancestrales			X
Casas de cultura			X
Bienes culturales	X		
Eventos culturales			X
Registros culturales			X
Tasa de crecimiento poblacional		X	
Población masculina			X
Población femenina			X
Número de hectáreas de bosques sembradas	X		
Número de defunciones	X		
Densidad poblacional		X	
Participación electoral	X		

Tabla 7.41: Selección de trayectorias - variables estructura económica

- Convergencia regional

Variable	Trayectoria		
	No lineal convexo	lineal	No lineal concavo
Número de políticas regionales			X
Número de instrumentos de planificación territorial regional			X

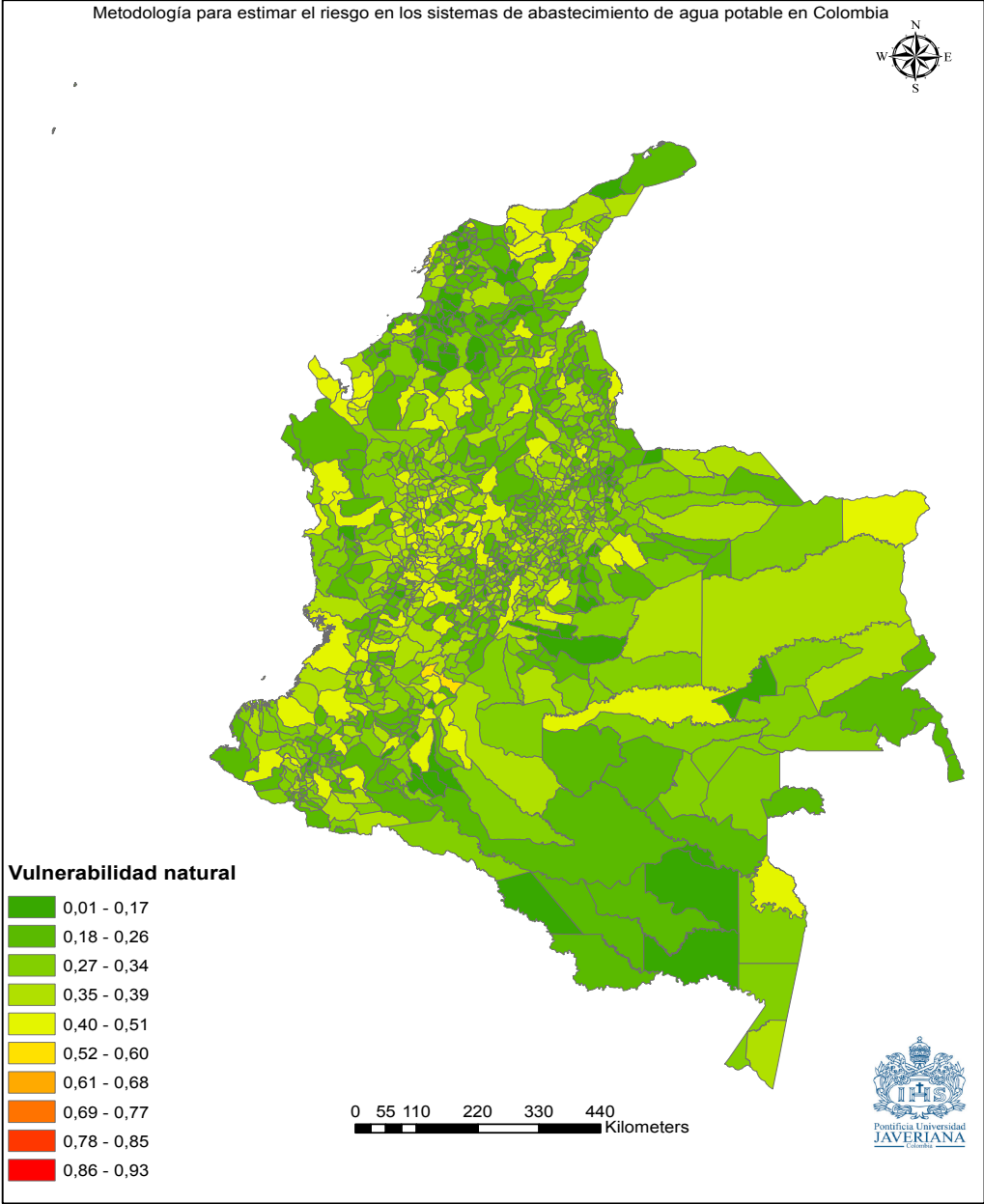
Tabla 7.42: Selección de trayectorias - variables convergencia regional

Una vez que se obtuvo las trayectorias de cada variable, el paso siguiente fue el de aplicar las ecuaciones 7.3 y 7.4 que fueron descritas en el capítulo 7.

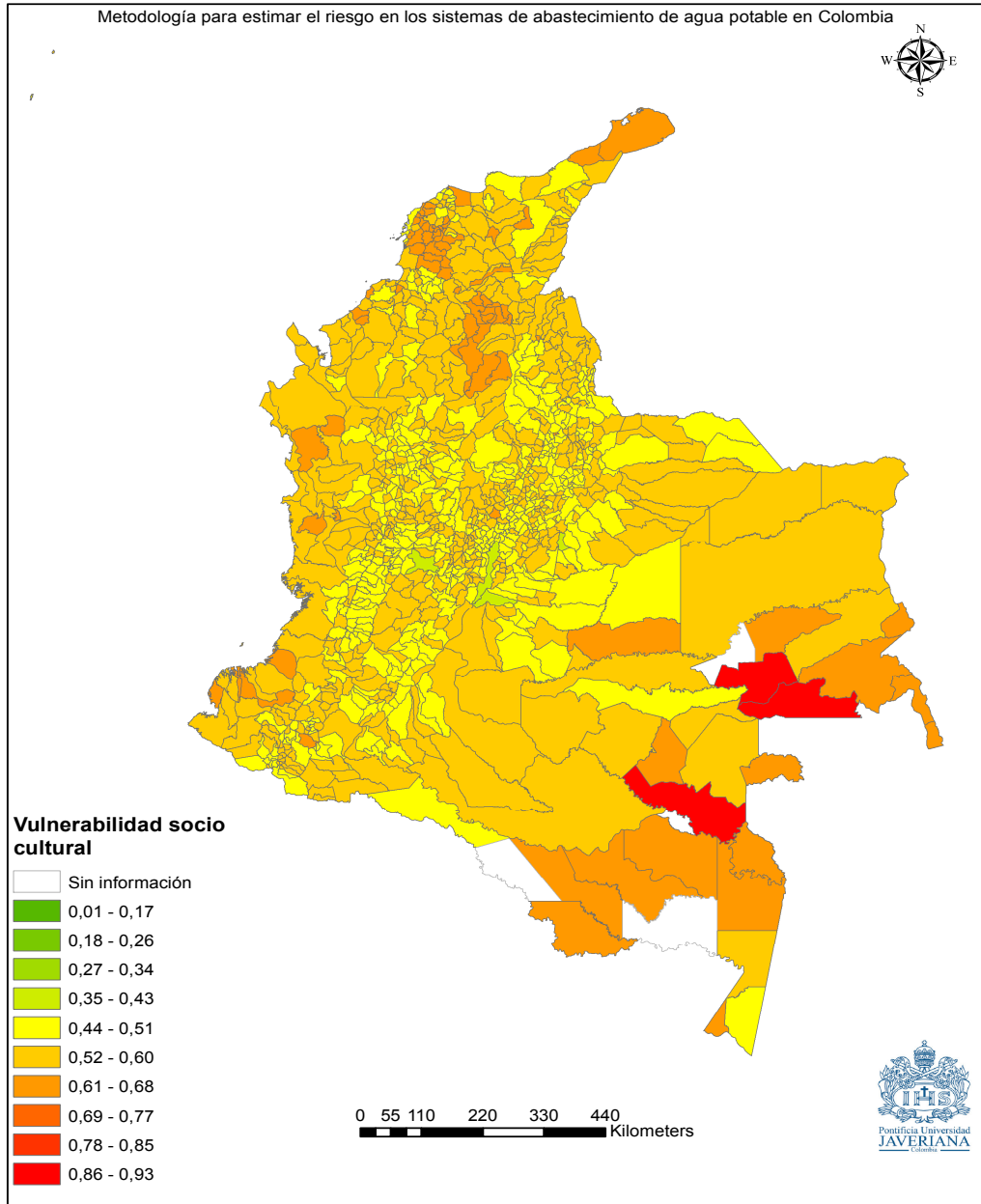
El resultado de estas ecuaciones permitieron determinar los tipos de vulnerabilidad. La Figura 7.5 muestra por cada tipo de vulnerabilidad los diferentes niveles para cada municipio.



7.5. SELECCIÓN ESCENARIOS DE REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VULNERABILIDAD

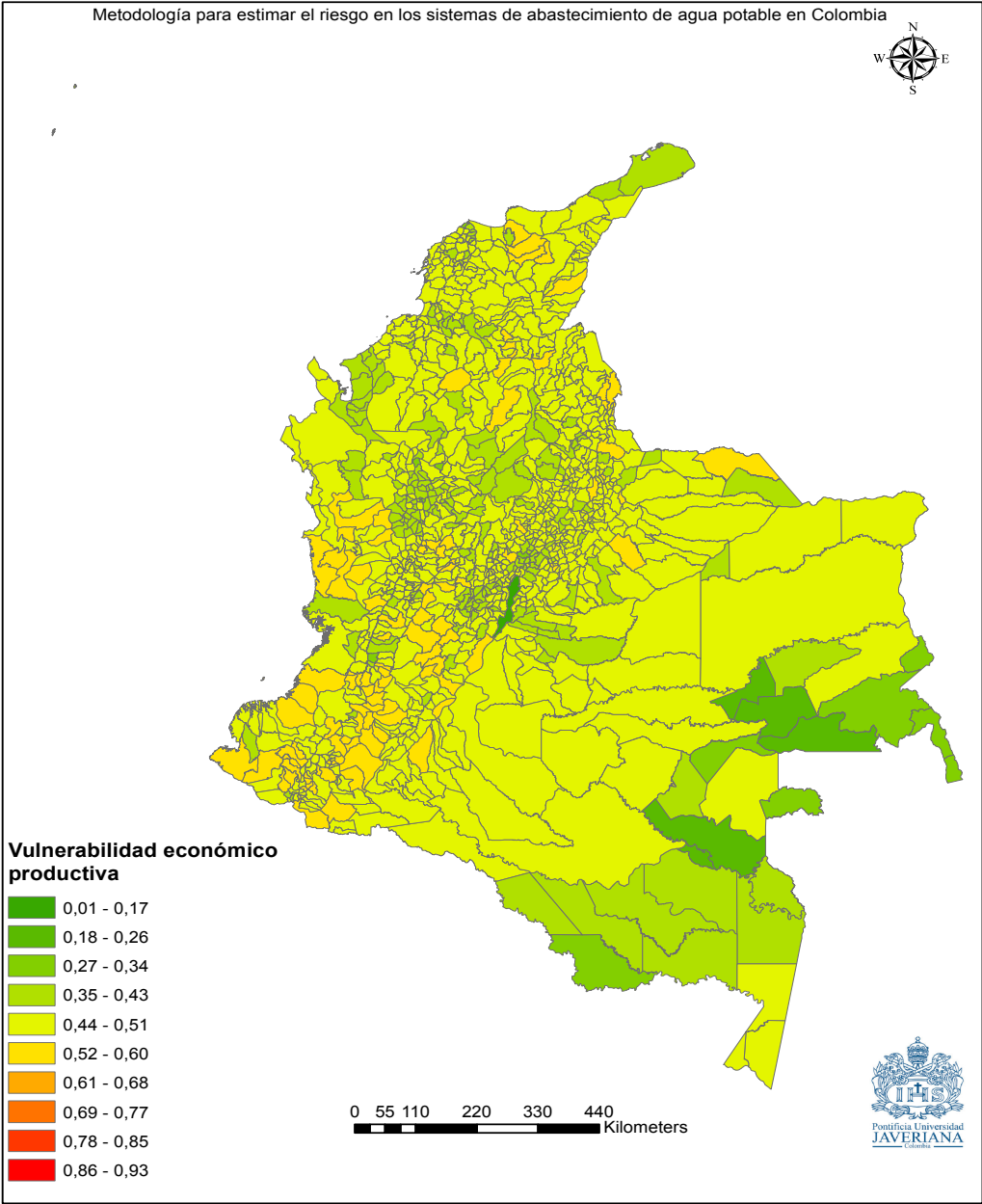


(a) Vulnerabilidad natural

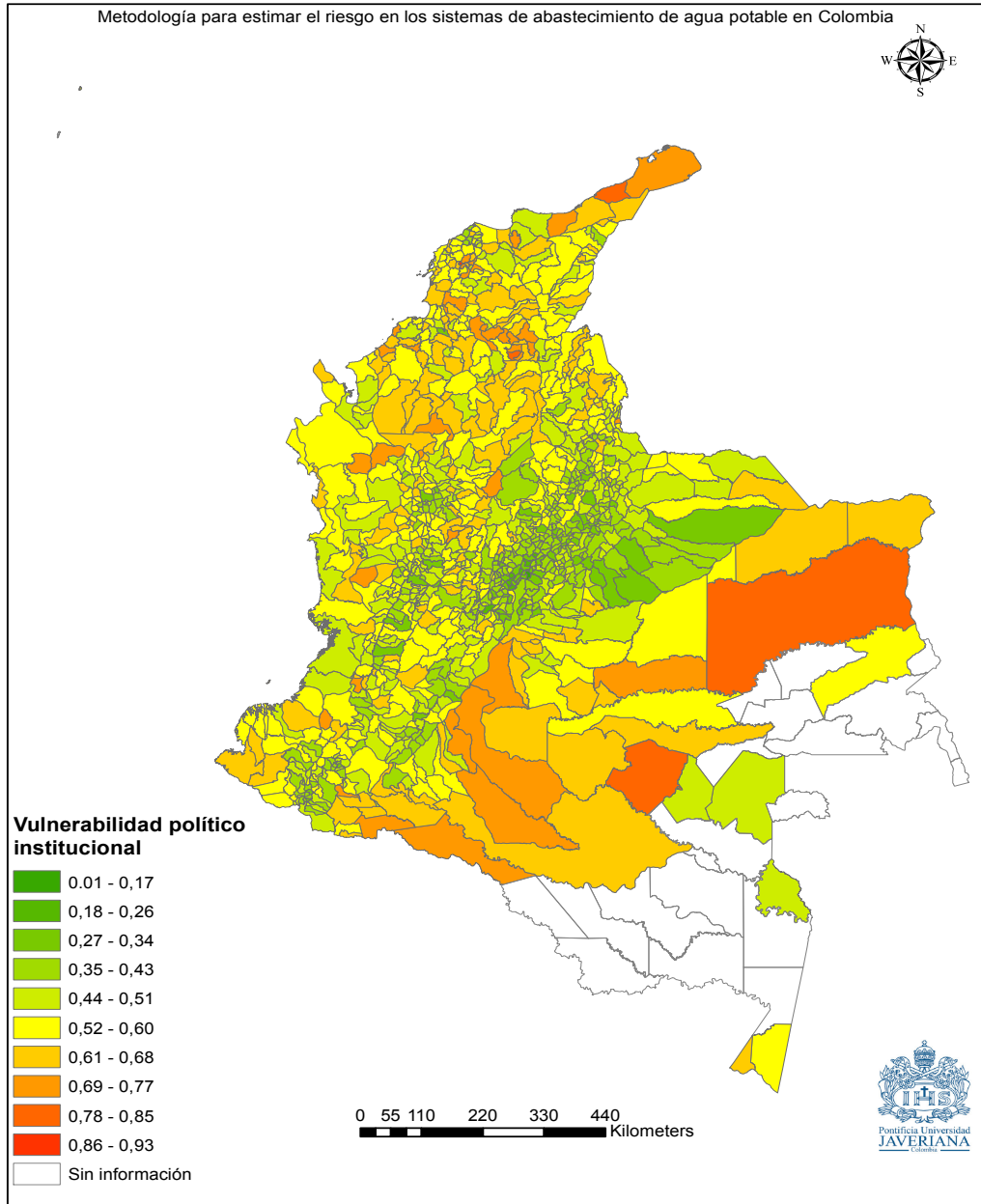


(b) Vulnerabilidad socio cultural

7.5. SELECCIÓN ESCENARIOS DE REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VULNERABILIDAD

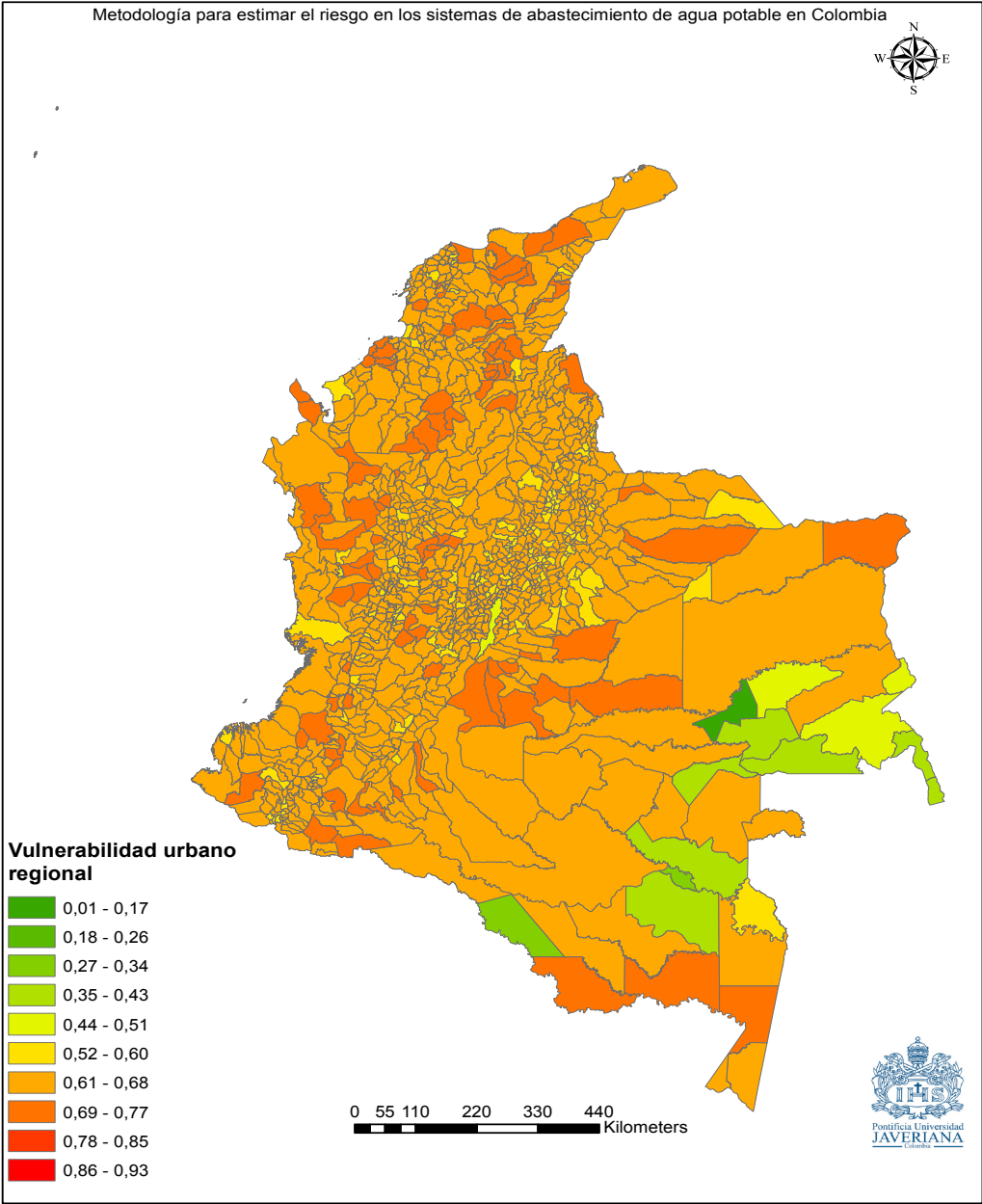


(c) Vulnerabilidad económico productiva



(d) Vulnerabilidad político institucional

7.5. SELECCIÓN ESCENARIOS DE REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VULNERABILIDAD



(e) Vulnerabilidad urbano regional

Figura 7.5: Mapas tipo de vulnerabilidad

## 7.6. Vulnerabilidad total

### 7.6.1. Determinación de la vulnerabilidad total

De forma que para determinar la vulnerabilidad total fue necesario emplear la ecuación 7.5, la cual es el resultado entre los pesos obtenidos de la valoración realizada por los expertos en el modelo AHP de la matriz principal de vulnerabilidad (ver capítulo 7.4.4 y los valores de obtenidos de cada tipo de vulnerabilidad. De esta forma el resultado fue la vulnerabilidad total (ver Figura 7.6).

Los resultados permiten evidenciar que el 93 % del total de los municipios del país se encuentran entre un nivel de vulnerabilidad del 40 y 54 %. En este rango se encuentran los departamentos de Antioquía, Boyacá, Cundinamarca, Santander, Nariño, Tolima, Norte de Santander, Valle del Cauca. Sin embargo, departamentos como Amazonas, Guaviare, Vaupés, Vichada y el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina no presentan un número alto de municipios por lo que la totalidad de estos municipios se encuentran en este nivel de vulnerabilidad.

A escala regional, las regiones Pacífica, Orinoquía y Amazonia y la parte alta y central de la costa Atlántica presenta valores entre 0.45 y 0.53 de vulnerabilidad, La región Andina presenta pequeños nodos de vulnerabilidad. Uno de ellos es el nodo de Bogotá, en el cual Bogotá presenta un nivel bajo de vulnerabilidad muy similar al de sus vecinos del Noroccidente (i.e., Chía, Cota, Funza y Mosquera). Sin embargo, al sur de la ciudad de Bogotá, registra valores de vulnerabilidad por encima del 45 % (i.e., Soacha, San Antonio del Tequendama).

Nivel de vulnerabilidad (%)	Número de municipios	Participación (%)
30 - 35	36	3 %
36 - 40	252	22 %
41 - 45	511	45 %
46 - 50	282	25 %
51 - 55	39	3 %
>0,6	4	0 %
<b>Total</b>	<b>1123</b>	<b>100</b>

Tabla 7.43: Número de municipios en nivel de vulnerabilidad total

En cuanto al número de empresas que se encuentra en cada uno de los niveles de vulnerabilidad, la Tabla 7.44 refleja que en total se registran 2750 empresas.

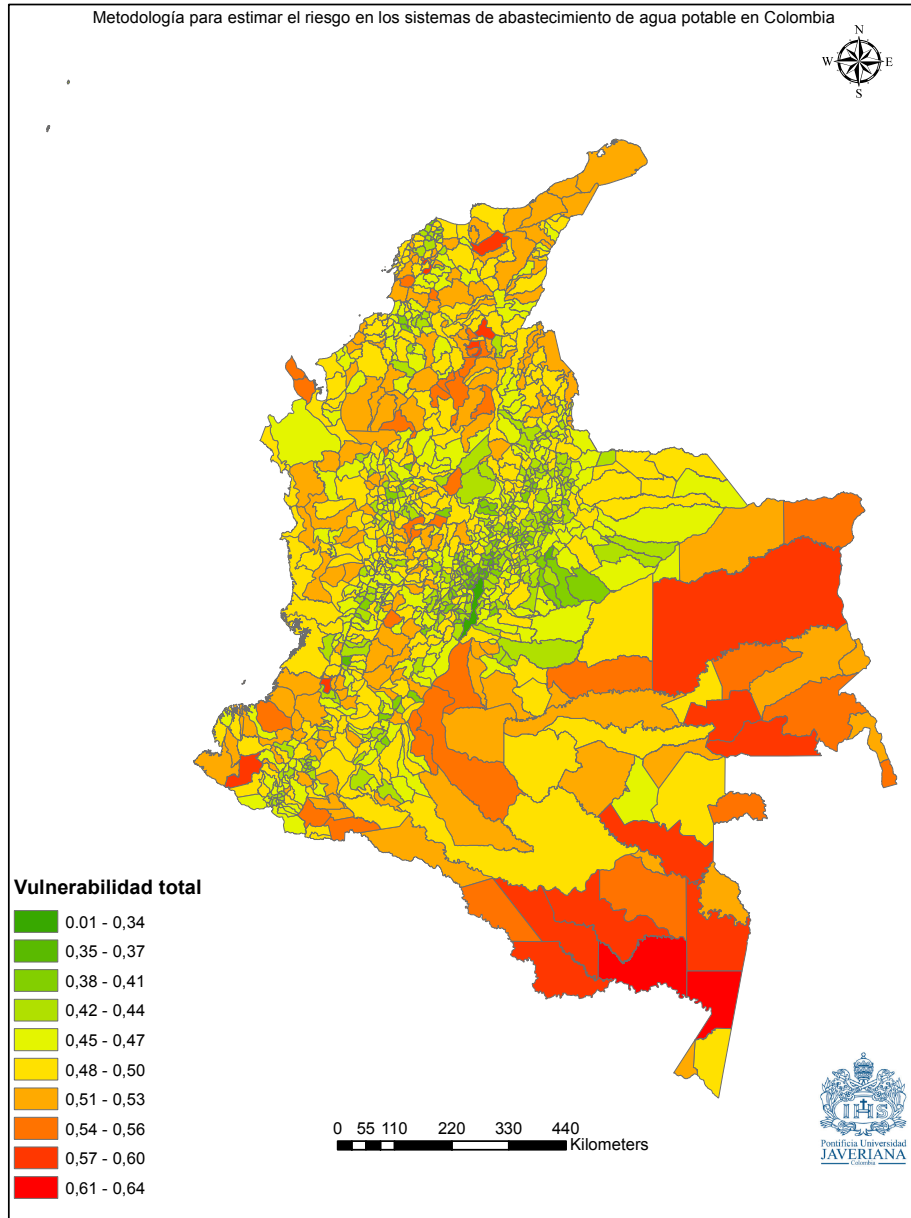


Figura 7.6: Mapa de representación de la vulnerabilidad total

En el rango comprendido entre el 41 y 45 % se registran 1305 empresas que operan los SAAP, siendo este valor 2.5 veces más grande que el número de municipios reportados para este rango. Situación que obedece a que en algunos municipios ubicados en este rango presentan más de una empresa prestadora del servicio de acueducto (i.e., Medellín registra 21 empresas). Situación similar sucede en el rango comprendido entre 36 y 40 % registra 757

empresas.

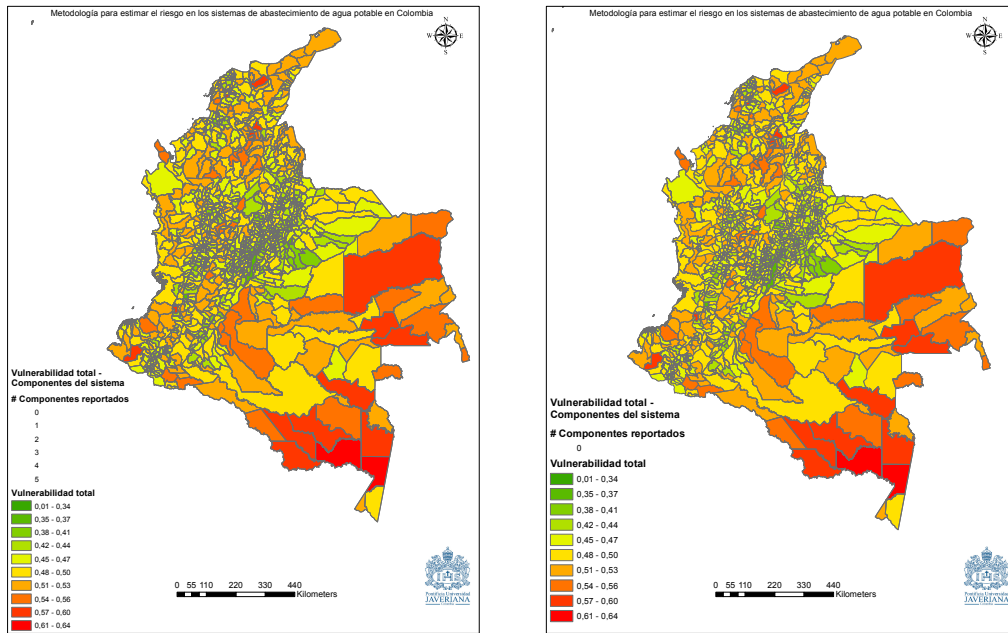
Nivel de vulnerabilidad (%)	Número de municipios	Número de empresas (%)
30 - 35	36	160
36 - 40	252	757
41 - 45	511	1305
46 - 50	282	492
51 - 55	39	33
>0,6	4	3
<b>Total</b>	<b>11 23</b>	<b>2750</b>

Tabla 7.44: Número de empresas en nivel de vulnerabilidad total

A partir del análisis adelantado en el capítulo 2 relacionado con el número de elementos reportados, se adelantó una integración con la vulnerabilidad total. En esta integración se pudo determinar que los 127 municipios que reportaron información consistente, principalmente se ubican en la zona centro de la región Andina, allí en nivel de vulnerabilidad varía entre 0.1 % y 50 %. La región de la Orinoquia y Pacífica dos a cuatro municipios registran información de la totalidad de los elementos de los SAAP y el nivel de vulnerabilidad se encuentra entre el 48 y 64 %.

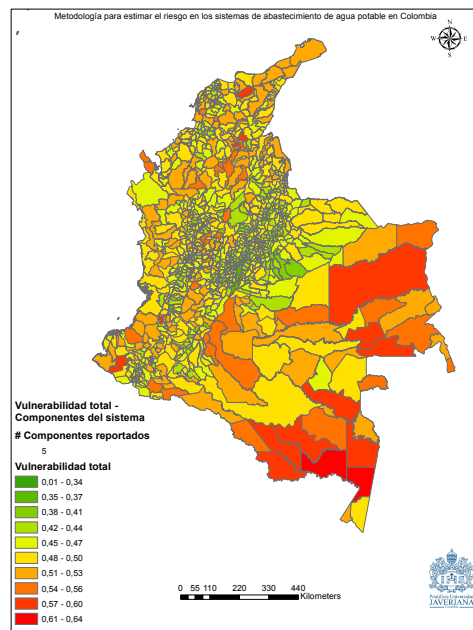


## 7.6. VULNERABILIDAD TOTAL



(a) Información reportada elementos SAAP

(b) 0 elementos SAAP reportados



(c) 5 elementos SAAP reportados

Figura 7.7: Información del número de elementos de los SAAP en relación con la vulnerabilidad total

## Capítulo 8

# Resultados - Aspectos metodológicos para estimar el riesgo en los SAAP

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en este trabajo y con el propósito de estimar el riesgo en los SAAP fue necesario adelantar previamente una serie de pasos metodológicos que permitieran ir construyendo los resultados definitivos. A continuación se describe cada uno de ellos.

### 8.1. Metodología para la determinación de la amenaza

La Figura 8.1 presenta el diagrama de flujo empleado para el cálculo de la amenaza total. Los pasos principales a tener en cuenta en el desarrollo de esta metodología son:

- Escala municipal. Se emplean los modelos determinados por las oficinas generadoras de la información de amenazas en Colombia. Cada una de las amenazas presentan diferentes escalas, para lo cual se definió el municipio como escala de referencia, en consecuencia se calcula la amenaza a nivel municipal.
- Estandarización. Las amenazas presentan parámetros diferentes asociados a su determinación. Por consiguiente se homogenizan los valores de cada tipo de amenaza. Este valor oscila entre 0 y 1. Siendo 0 el valor mínimo y 1 el máximo.
- Representación lineal y no lineal de la amenaza. Se representa cada amenaza en función de la trayectoria de la curva. Esta trayectoria representa la linealidad y la no linealidad del tipo de amenaza evaluado. Para lo cual se obtienen tres representaciones: una lineal y dos no lineales (cóncava y convexa). Se selecciona el comportamiento que representa mejor la amenaza (lineal y no lineal).

## 8.1. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA

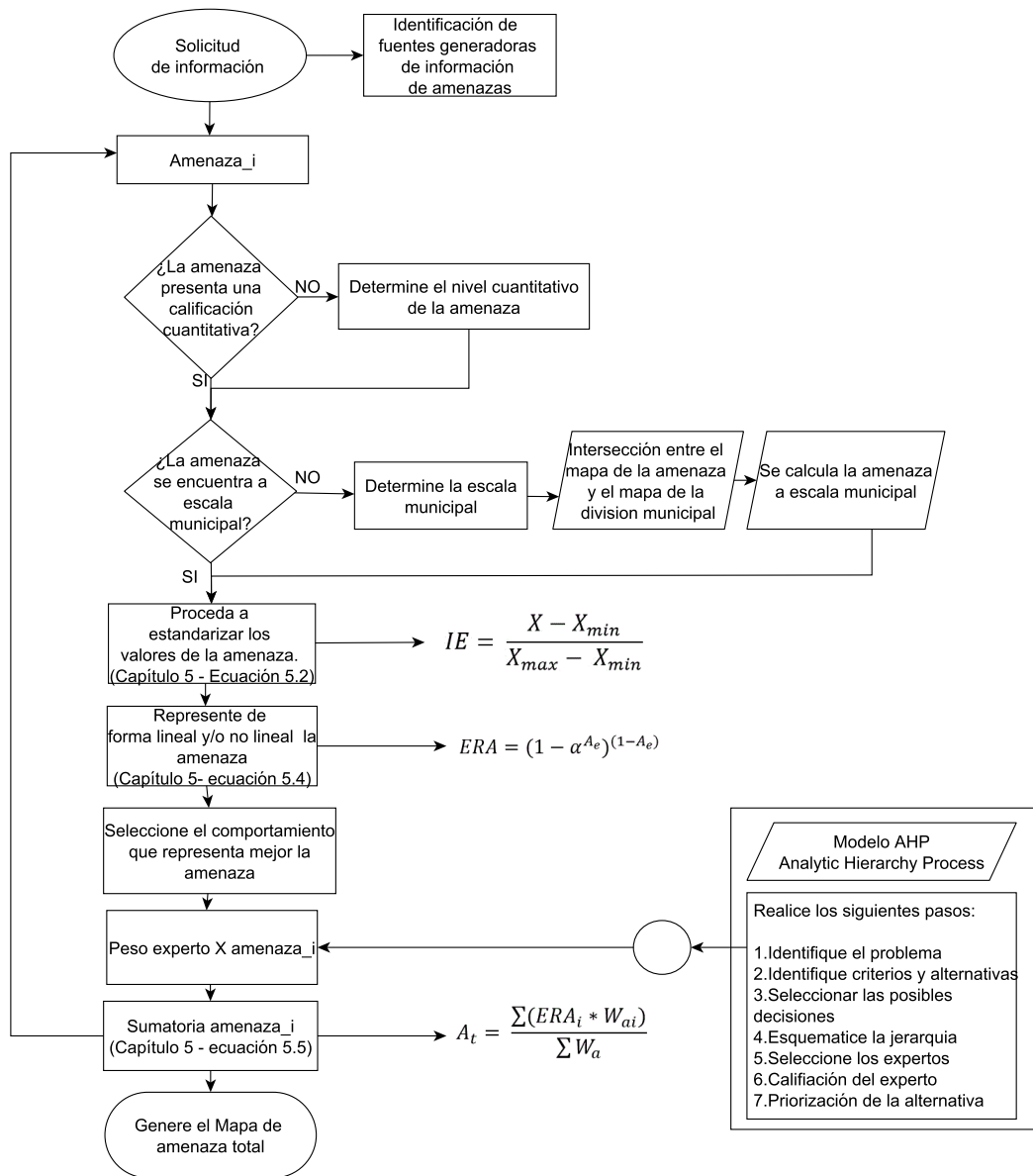


Figura 8.1: Diagrama de flujo de la metodología para la amenaza

- Incorporación AHP. La amenaza total se obtiene a partir del producto entre los resultados de la matriz principal del modelo AHP y la trayectoria seleccionada del comportamiento de la amenaza.
- Acople al sistema de información geográfica. Una vez obtenido los resultados finales de la amenaza son integrados a la plataforma de ArcGis para el tratamiento de la

información geográfica obtenida para la generación del mapa de amenaza.

## 8.2. Metodología para la determinación de la vulnerabilidad

En la Figura 8.2 se presenta un diagrama de flujo con los elementos principales de la metodología para la vulnerabilidad aplicado.

Los pasos principales para el desarrollo de la metodología son los siguientes:

- Definición de los tipos de vulnerabilidad. A partir de las dimensiones del territorio se establecieron cinco tipos de vulnerabilidad, por lo que fue necesario definir cada tipo en función del grado de pérdida o de propensión a ser afectado y/o sufrir un daño. Cada tipo representa diferentes aspectos asociados al desarrollo de un territorio y cada vulnerabilidad tiene su propia acepción e información. Esta perspectiva holística incorpora aspectos sociales e ingenieriles los cuales a su vez se encuentran enmarcados en un territorio.
- Identificación de variables. Definido los tipos de vulnerabilidad se identifica las variables que permitan cuantificar cada una ellas. Teniendo en cuenta que entre las variables empleadas presenta se presentan niveles de importancia, estas fueron agrupadas en tres niveles. El primer nivel son las que en el modelo AHP se conocen como alternativas. Al interior de cada alternativa se agrupan una subseries de variables conocidas como variables de segundo nivel. Por último las variables de tercer nivel proporcionan la información clave para el cálculo (i.e., dato, índice e indicador).
- Estandarización. El conjunto de variables presentan unidades de medida diferentes. Por consiguiente, es indispensable homogenizarlas con el propósito de adelantar la operatividad entre ellas. Una vez estandarizadas el valor de cada variable oscila entre 0 y 1. Siendo 0 el valor mínimo y 1 el máximo.
- Representación lineal y no lineal de la vulnerabilidad. Cada variable se representa en función de la trayectoria de la curva. Esta trayectoria representa la linealidad y la no linealidad de cada variable. Se obtiene como resultado tres representaciones: una lineal y dos no lineales (cóncava y convexa). Se selecciona por cada una de las variables el mejor comportamiento que representa la trayectoria.

## 8.2. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

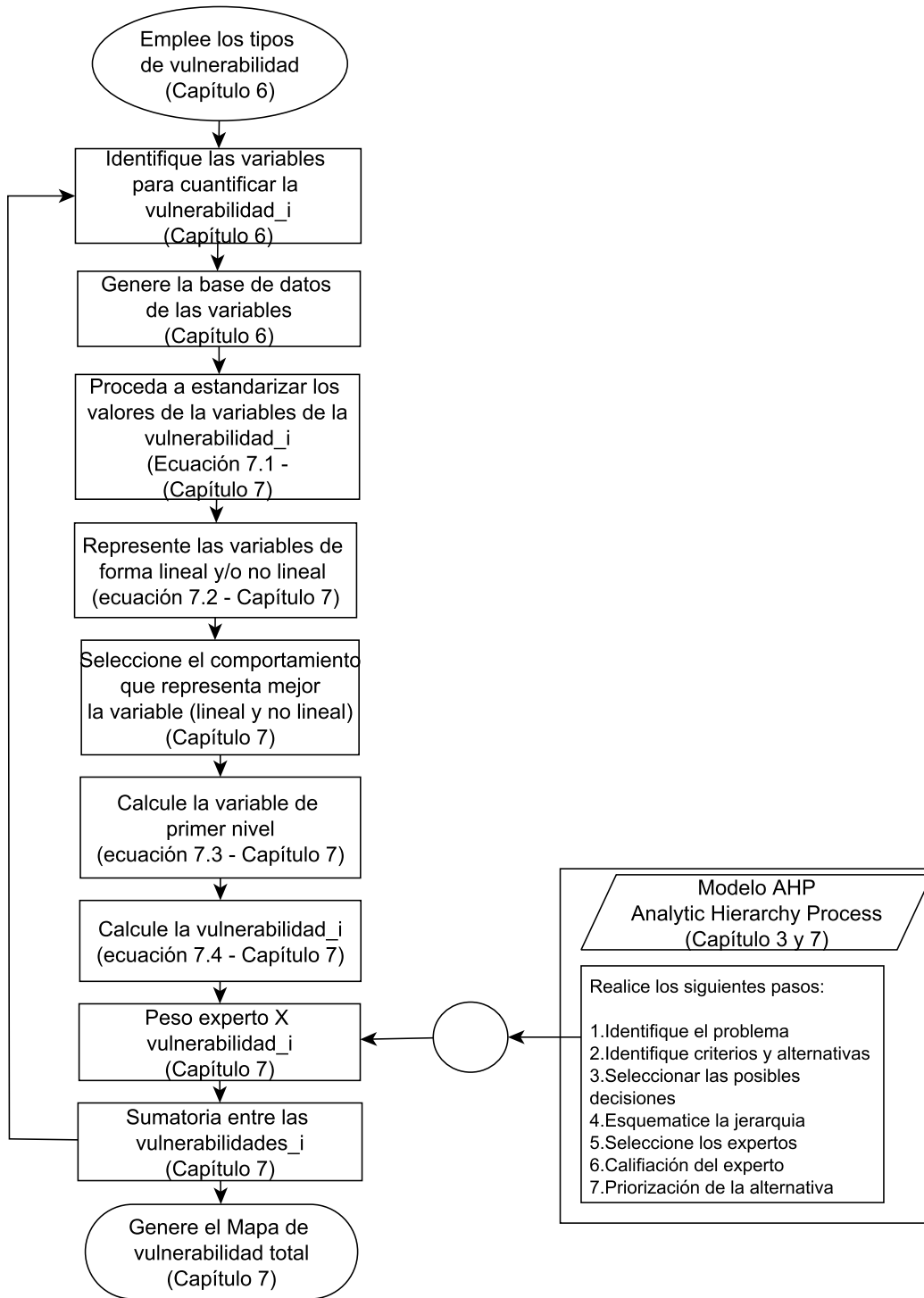


Figura 8.2: Diagrama de flujo de la metodología para la vulnerabilidad

- Incorporación AHP. Cada tipo de vulnerabilidad se obtiene a partir del producto en-

tre los resultados de la matriz secundaria del AHP y la trayectoria seleccionada del comportamiento de la variable. Una vez obtenido el valor de cada tipo de vulnerabilidad, este se multiplica con los resultados de la matriz principal del modelo AHP para vulnerabilidad total.

- Acople al sistema de información geográfica. Una vez obtenido los resultados finales de los tipos de vulnerabilidad y total estos son integrados a la plataforma de ArcGis para el tratamiento de la información geográfica obtenida para la generación del mapa de vulnerabilidad total y por tipo.

### 8.3. Metodología para la determinación del riesgo

Para determinar el riesgo se ha tenido en cuenta la necesidad de contar con los resultados de la amenaza y la vulnerabilidad total. Para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$R = A_t * V_t \quad (8.1)$$

donde:

$R$  = Riesgo

$A_t$  = Amenaza total  $V_t$  = Vulnerabilidad total

En la Figura 8.2 se presenta un diagrama de flujo con los elementos principales de la metodología para determinar riesgo. Se observa la integración de las metodologías de la amenaza y vulnerabilidad, las cuales fueron tratados en los capítulos 8.1 y 8.2.

Los pasos principales para el desarrollo de la metodología son los siguientes:

- Integración entre la amenaza total y vulnerabilidad. La información de la amenaza y de la vulnerabilidad es integrada por la ecuación 8.1.
- Acople al sistema de información geográfica. Una vez obtenido los resultados finales de la amenaza y vulnerabilidad, el producto es integrado a la plataforma de ArcGis para la generación del mapa de riesgo. A este acople se sobrepone la información relacionado con los sistemas de abastecimiento de agua, con el propósito de identificar sistemas se encuentran en riesgo.

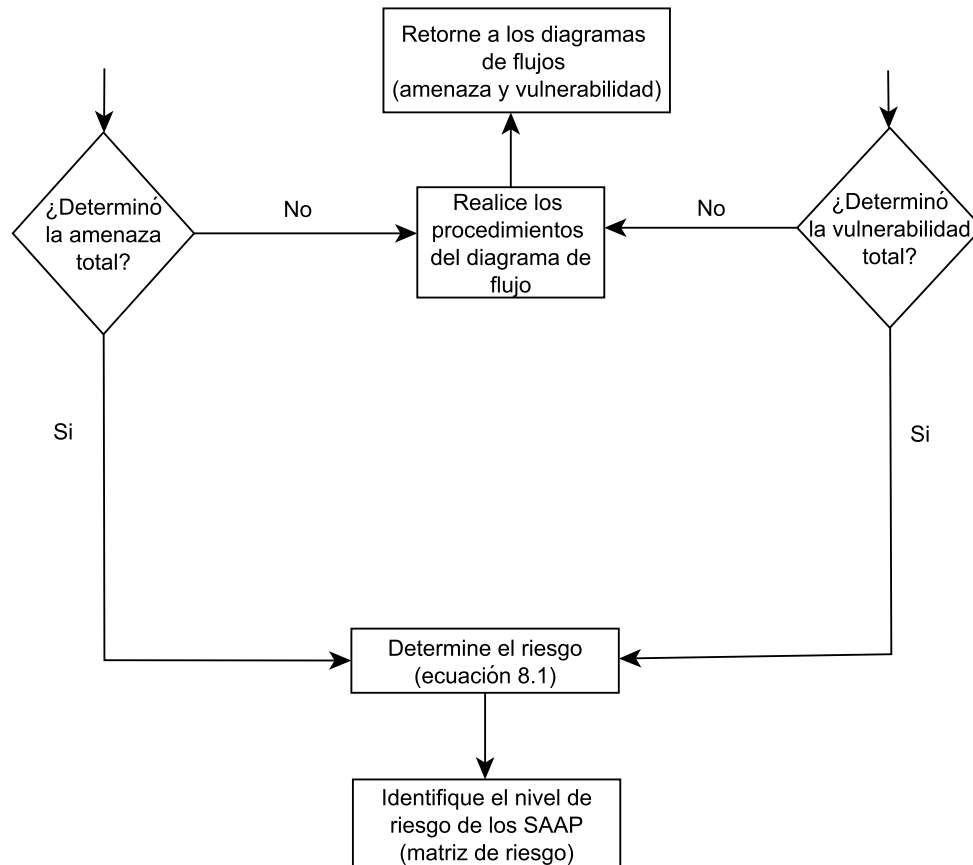


Figura 8.3: Diagrama de flujo de la metodología para determinar riesgo

- Matriz de riesgo. Se establece el nivel de riesgo para cada municipio y SAAP

## 8.4. Matriz de riesgo

La matriz de riesgo constituye una herramienta de control a través de la cual se puede identificar el nivel de riesgos a los que se pueden ver avocados los SAAP. Comúnmente la matriz de riesgo maneja en el eje horizontal la amenaza y en la vertical la vulnerabilidad. Obtenidos los números matriciales de la amenaza y vulnerabilidad, finalmente se multiplican para obtener un nuevo valor denominado “número matricial del riesgo”. Este valor tiene un intervalo numérico entre 0,0 y 0,35 (ver Figura 8.4) el cual surgen a partir de los valores mínimos y máximos de la amenaza y vulnerabilidad total.

La determinación de cada intervalo se realizó de un modo uniforme considerando las pérdidas probables y las consecuencias que se generaría ante la materialización. Para indicar

CAPÍTULO 8. RESULTADOS - ASPECTOS METODOLÓGICOS PARA ESTIMAR EL RIESGO EN LOS SAAP

Amenaza \ Vulnerabilidad	0	0,11	0,22	0,32	0,43	0,54
0,107	0,00	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06
0,213	0,00	0,02	0,05	0,07	0,09	0,12
0,320	0,00	0,03	0,07	0,10	0,14	0,17
0,427	0,00	0,05	0,09	0,14	0,18	0,23
0,533	0,00	0,06	0,12	0,17	0,23	0,29
0,640	0,00	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35

(a) Matriz de riesgos cuantitativa

Amenaza \ Vulnerabilidad	0	0,11	0,22	0,32	0,43	0,54
0,107						
0,213	<b>Bajo</b>					
0,320						
0,427						
0,533						
0,640						

**Bajo**
**Medio**
**Alto**

(b) Matriz de riesgos cualitativa

Figura 8.4: Matriz de Riesgo



el nivel de riesgo se agrupó en tres intervalos los cuales presentan la siguiente connotación:

- Nivel bajo. En este intervalo no se esperan impactos potenciales sobre los SAAP. Los escenarios ubicados en esta área de la matriz no representan un riesgo significativo, por lo que no amerita la inversión de recursos para reducción de riesgos y no se requieren de acciones específicas sobre los elementos vulnerables considerados en este intervalo. Sin embargo sí se deben adelantar sistemas de control en la calidad de los procesos y monitoreo a las operaciones rutinarias de los SAAP. El número matricial del riesgo corresponde a un valor entre 0 y 0,04.
- Nivel medio. En este intervalo se esperan impactos sobre algún o algunos componentes de los SAAP. Se deben tomar medidas para reducir el riesgo, a partir de identificar detalladamente que variable de la amenaza o vulnerabilidad lo está afectado. Los escenarios agrupados en esta área implican el desarrollo de actividades que disminuyan el riesgo, aunque tienen un nivel de prioridad de segundo nivel, se deben establecer acciones de intervención inmediata y acciones oportunas en caso de presentarse la materialización del mismo. Así mismo requiere de la identificación de componentes críticos. El número matricial del riesgo para este nivel se encuentra entre 0,5 y 0.13.
- Nivel alto. Los escenarios ubicados en esta área amerita que se desarrollen acciones prioritarias e inmediatas de protección y prevención debido al alto impacto que tendrían sobre el entorno. Deben buscarse alternativas para garantizar la continuidad en la operación del sistema, así como implementar previamente un tratamiento especial en cuanto al nivel de control (demostrar control de riesgo). Las acciones deben encaminarse en identificar cual o cuales variables representan un mayor peso en la determinación del riesgo y establecer los impactos. Valores de número matricial de riesgo superiores 0,14 se ubican en el nivel alto.

## Capítulo 9

# Análisis de resultados

### 9.1. Amenazas

La amenaza total se construyó a partir de tres grandes pilares:

- La amenaza a escala municipal
- Estandarización y selección de caminos de representación de cada tipo de amenaza, Este último hace notar que la representación de cada tipo de amenaza es de la forma no lineal (concavo y convexo).
- Obtención de los pesos relativos por cada tipo de amenaza bajo el modelo AHP

Bajo estas consideraciones se pudo evidenciar que los resultados obtenidos pueden no representar la situación específica de amenazas en un municipio, dado que los anteriores ítem afectan de manera directa su resultado. Sin embargo, esta situación puede reflejar que las amenazas no se encuentran concentradas en un solo punto en específico sino que se encuentran dispersas en todo el territorio nacional; además el criterio del experto en este punto juega un papel fundamental en la obtención de pesos que influyen de forma directa en el nivel final de amenaza.

Así mismo el resultado que se obtuvo de la amenaza total permite tener una aproximación a escala municipal del nivel de amenaza. Este resultado es un primer indicador para adelantar estudios con una resolución más detallada.

A partir de la selección de caminos de representación por tipo de amenaza, fue posible identificar que las amenazas naturales analizadas en este trabajo tienen un comportamiento no lineal, esto significa que el nivel de amenaza no se incrementa de forma proporcional que los valores de la amenaza estandarizada.

Se adelantó la construcción de mapas de amenaza bajo las consideraciones de estandarización, selección de comportamiento lineal o no lineal y aplicación del peso relativo del modelo AHP, esto permitió identificar por cada tipo de amenaza los municipios que presentan niveles de amenaza significativos. Es importante aclarar que dicho nivel de amenaza esta a escala municipal.

## 9.2. Vulnerabilidad

Se obtuvo la vulnerabilidad total a una escala municipal, para su determinación se adelantó la construcción de una metodología para estimar la vulnerabilidad. La cual depende principalmente de:

- Interacción de factores que determinan la vulnerabilidad, específicamente en los ámbitos Natural, urbano -regional, político -institucional, económico -productivo y socio-cultural
- Estandarización y selección de caminos de representación de cada una de las variables que dan cuenta del tipo de vulnerabilidad.
- Obtención de los pesos relativos de los factores de vulnerabilidad a partir del modelo AHP

Se determinaron cinco tipos de vulnerabilidad que se relacionan con las dimensiones del territorio, estas son: Natural, urbano -regional, político -institucional, económico -productivo y socio-cultural. Tomando en cuenta las anteriores definiciones, se reconocieron las variables a escala municipal que dan cuenta de cada tipo de vulnerabilidad de forma que como resultado de procesar cada una de las variables se obtuvo los niveles de vulnerabilidad para los cinco factores propuestos en este trabajo.

Esta metodología permite reconocer por cada tipo de la vulnerabilidad la variable(s) que esta impactando su resultado. Este esfuerzo de desagregación presenta algunas utilidades adicionales. Por un lado cual variable requiere de un espacio a desarrollar y fortalecer. De igual forma, nos muestra cuál variable hay que intervenir de manera prioritaria.

Se puede evidenciar algunas simetrías entre los tipos de vulnerabilidad, esto es por ejemplo la vulnerabilidad político institucional, urbano regional y socio cultural, las cuales presentan niveles similares de vulnerabilidad..

### 9.3. Riesgo

Previo a describir y analizar los resultados, es preciso retomar la matriz de riesgo, la cual fue descrita en el capítulo 8.4.

#### 9.3.1. Acople de la matriz de riesgo

Para llevar a cabo la asignación del nivel de riesgo se hace necesario adelantar la siguiente clasificación con base en la matriz definida en el capítulo 8.4.

Valor del riesgo	Nivel de riesgo
0,01 - 0.04	Bajo
0.05 - 0.13	Medio
0.14 - 0.35	Alto

Tabla 9.1: Identificación del nivel de riesgo

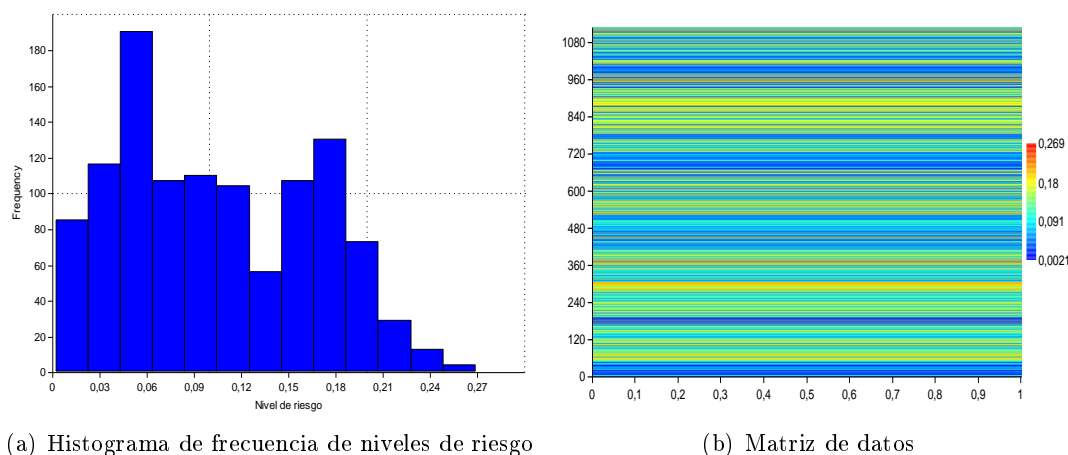
El resultado de esta valoración será el de identificar el nivel de riesgo de los municipios y SAAP.

#### 9.3.2. Determinación del riesgo

El nivel de riesgo se obtuvo a escala municipal, siendo el municipio, a través de las personas prestadoras de los servicios públicos de acueducto, las que tienen el conocimiento con un detalle mayor sobre las condiciones de riesgo en donde se encuentra asentada la infraestructura de los SAAP.

Para Sanchez-Silva (2005) el análisis de riesgo es la herramienta más importante para la toma de decisiones. Esta permite medir los efectos adversos sobre un sistema. Se expresa a través de niveles de daño o índices de riesgo. Este trabajo, permite identificar los niveles de riesgo a los cuales están sometidos los SAAP. La determinación de los niveles de riesgo, surge a partir de la convolución entre las diferentes amenaza y los tipos de vulnerabilidad (ver ecuación 8.1).

Como resultado se obtuvo, que el riesgo presenta un valor de máximo 0.27 y un mínimo el 0.01. En la Figura 9.1 se observa tres grupos principales. El primero concentra el nivel 0.06 con una frecuencia de 195 veces. El segundo concentra el nivel 0.18 con 132 repeticiones. Y el último grupo es un poco más homogéneo en cuanto a su frecuencia, en estos la concentración es entre los niveles 0.03 y 0.15.



(a) Histograma de frecuencia de niveles de riesgo

(b) Matriz de datos

Figura 9.1: Concentración de los valores de nivel de riesgo

Para representar la matriz de datos (ver Figura 9.1b), se procedió a ordenar los datos (menor a mayor) a partir de la identificación del código DANE del municipio. Una vez ordenados se pudo evidenciar la movilidad que tienen los niveles de riesgo sobre los municipios. Esto permite identificar franjas similares del nivel de riesgo o zonas homogéneas del riesgo.

Un claro ejemplo se presenta en los municipios de Segovia, Remedios y El Bagre ubicados en el departamento de Antioquía, que dada su cercanía geográfica presenta un mismo nivel de riesgo. Esta situación puede obedecer a la presencia de factores vulnerables en común, que en este caso en particular son sociales, políticos y económicos.

Caso similar ocurre con Bogotá y los municipios de Tenjo, Chía, Madrid, Cota, Mosquera y Funza del departamento de Cundinamarca, pero allí el factor de vulnerabilidad en común es el político, sin embargo, al retirar a Bogotá de este grupo, los demás municipios presentan más de un factor en común, pero estos resultan ser de mayor nivel que los de Bogotá.

Para una mejor visualización la Figura 9.2 puede dar cuenta de la existencia de algún tipo de sinergias.

Retomando los niveles de riesgo arrojados, se evidencia con claridad zonas con el nivel máximo, las cuales se ubican en los departamentos del Casanare, Arauca, sur de Bolívar, Chocó, oriente de Risaralda, Caldas y el centro de Nariño.

La determinación del riesgo utiliza un conjunto de variables de entrada, que el presen-

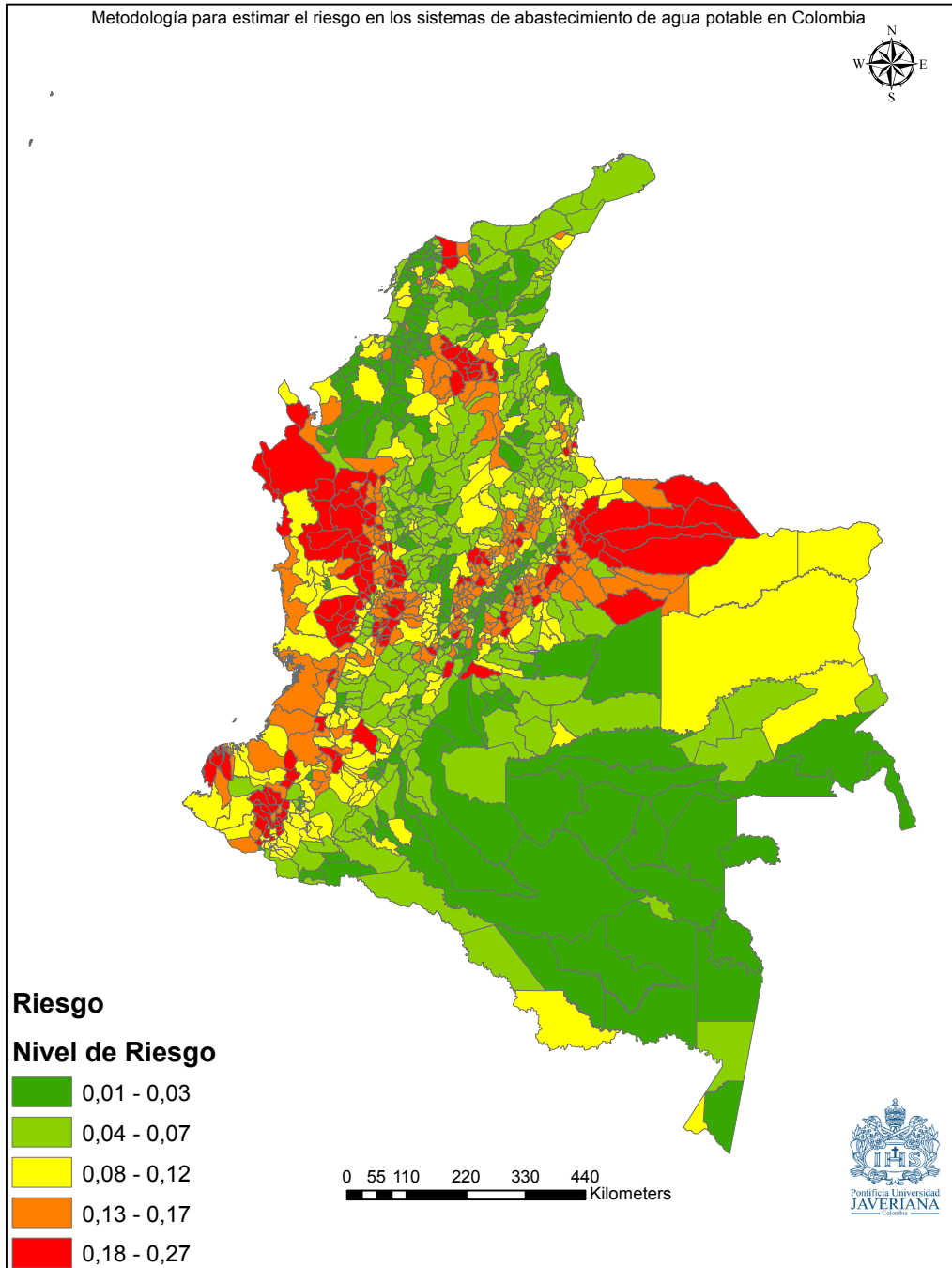
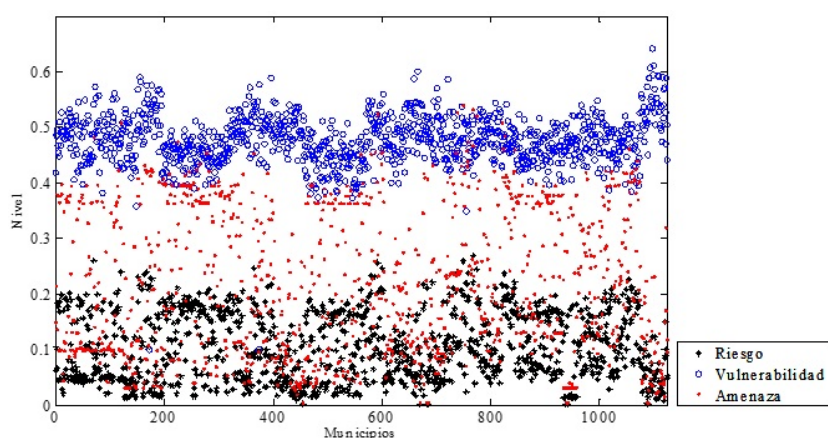


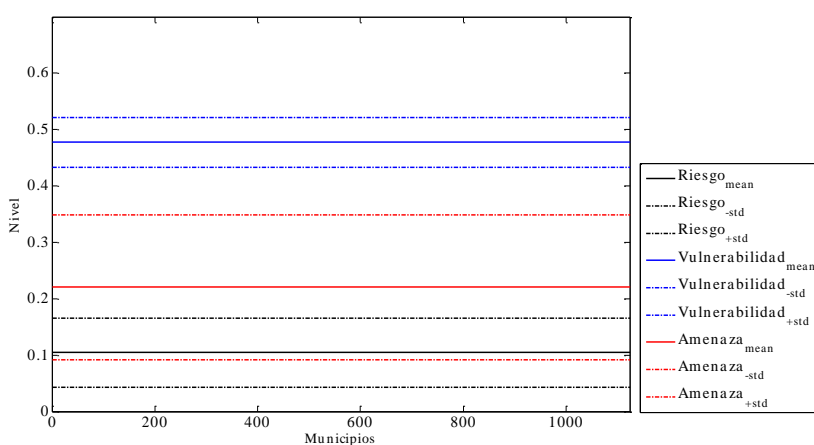
Figura 9.2: Mapa de determinación del nivel de riesgo

te caso en particular resultan ser dos. La primera relacionada con los diferentes tipos de amenaza que posteriormente se conjugan en la amenaza total. La segunda corresponde a la vulnerabilidad total construida a partir de las diferentes trayectorias de las variables que componen cada clasificación de vulnerabilidad.

Por tanto, el ejercicio de comparar cada una de las dos variables (i.e., amenaza y vulnerabilidad), permite comprender los resultados y el comportamiento y del riesgo (ver Figura 9.4).



(a) Comportamiento de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo



(b) Análisis estadísticos básicos para la amenaza, vulnerabilidad y riesgo

Figura 9.3: Comportamiento variables de entrada Riesgo

En la Figura 9.4a, se evidencia que la vulnerabilidad tiene mayor peso que la amenaza en el riesgo, esto puede ser tomado como un reflejo del comportamiento espacial que tiene cada variable de la vulnerabilidad al interior de los municipios.

Se observa también que existe un comportamiento simétrico en la distribución de los datos de la vulnerabilidad y el riesgo. Sin embargo, la amenaza presenta una mayor dispersión en los datos y a su vez se detallan algunos valores “atípicos” o muy alejados del comportamiento general.

La simetría hace pensar que existen zonas en donde las condiciones de vulnerabilidad y riesgo son bastante similares. Los valores alejados pueden estar representando las condiciones de lugares en específico.

Se observa en la Tabla 9.2 que bajo la determinación de la media y desviación estándar, la amenaza presenta una mayor desviación de un orden de magnitud en relación con la vulnerabilidad y el riesgo.

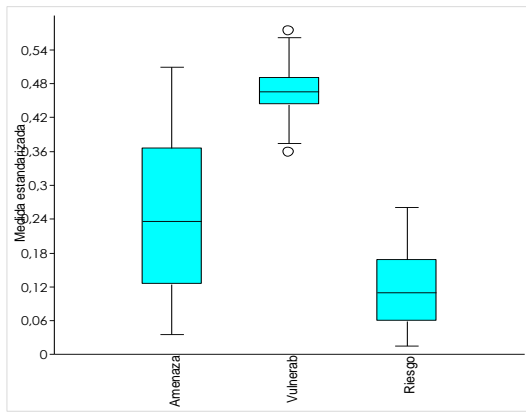
Parámetro	Amenaza	Vulnerabilidad	Riesgo
N	1123	1123	1123
Min	0,00477239	0,1	0,00210009
Max	0,540444	0,641956	0,268853
Mean	0,220208	0,477313	0,104573
Stand. dev	0,128192	0,0443042	0,0612597

Tabla 9.2: Análisis estadísticos básicos para la amenaza, vulnerabilidad y riesgo

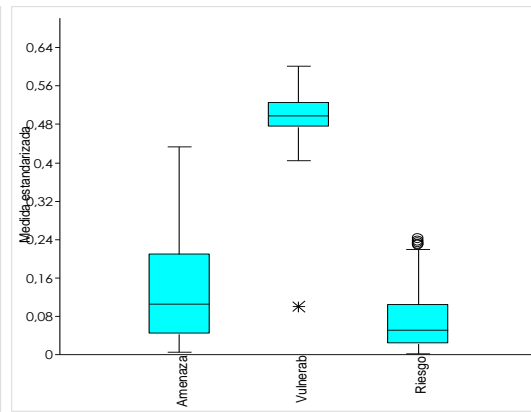
En la Tabla 9.2 es posible afirmar que el producto entre la amenaza y la vulnerabilidad no supera el 50 %. Para que se presente un nivel de riesgo superior al 50 %, los valores de la amenaza y de la vulnerabilidad deben ser superiores al 70 %, situación que representaría las condiciones desfavorables en un municipio. Dicho escenario no se ve reflejado con los resultados obtenidos.

A través de un diagrama de caja se presenta un análisis descriptivo de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo para las cinco zonas geográficas del país.

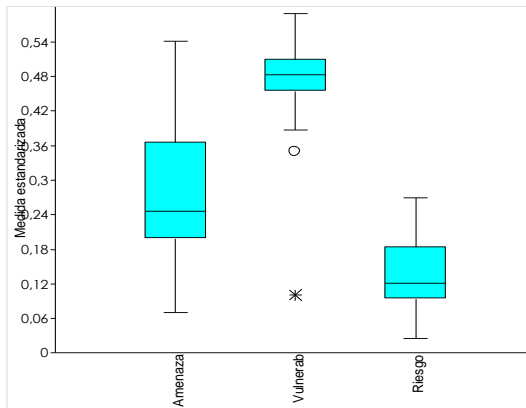




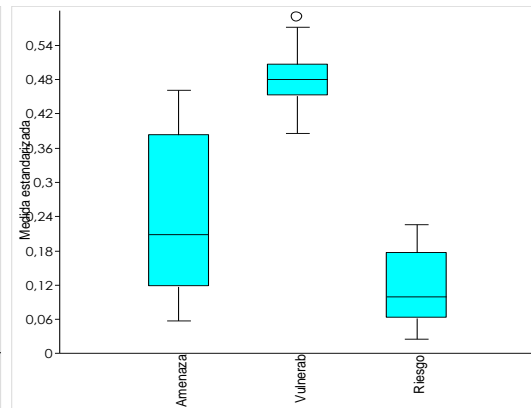
(a) Diagrama de caja para la región Andina



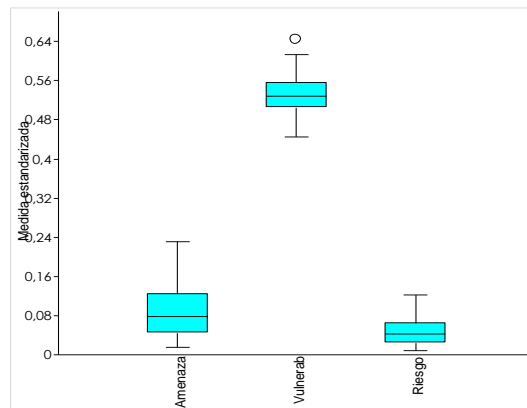
(b) Diagrama de caja para la región Caribe



(c) Diagrama de caja para la región Pacífica



(d) Diagrama de caja para la región Orinoquia



(e) Diagrama de caja para la región Amazonía

Figura 9.4: Diagrama de caja de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo para las cinco zonas geográficas

Con información de las cinco regiones, los resultados encontrados permiten evidenciar

que la amenaza en la región Andina y Amazonía presentan un comportamiento simétrico. Mismo comportamiento sucede con la vulnerabilidad de las zonas Andina, Amazonía, Pacífica y Orinoquía. Se observa la existencia de valores atípicos en todas las regiones, siendo la región Caribe las que mayor número presenta. En cuanto al riesgo, la dispersión de los puntos de la región Andina y Amazonia son simétricos.

Sin embargo en la región Caribe no se observa simetría en los valores de riesgo, además presenta valores atípicos lo que supone que el valor medio en toda la región no es constante. Por último, analizando de manera individual cada diagrama de caja, se evidencia que el mejor comportamiento presentado entre la amenaza, vulnerabilidad y riesgo lo tiene la región Andina y Amazónica.

A partir de una análisis del nivel de riesgo a escala departamental, se observa que los departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío presentan los niveles más altos de riesgo. En la región Pacífica los departamentos de Nariño, Cauca y Chocó y en la región de la Orinoquía los departamentos de Casanare y Arauca (ver Figura 9.5).

En cuanto a los niveles bajos de riesgo se encuentra la ciudad de Bogotá y los departamentos de Archipiélago de San Andrés, providencia y Santa Catalina, Guaviare y Vaupés.

De acuerdo con el nivel de riesgo la Tabla 9.3 se relaciona el número de municipios que se encuentran en cada nivel, así mismo la participación de estos.

Nivel de riesgo (%)	Número de municipios	Participación (%)
0-5	282	25
6-10	349	31
11-15	153	14
16-20	304	27
21-25	34	3
>26	2	0
<b>Total</b>	<b>1123</b>	<b>100</b>

Tabla 9.3: Número de municipios en nivel de riesgo

De la Tabla 9.4 se puede afirmar que las empresas se concentra en el nivel de riesgo entre 0-5, 6-10 y 16-20. Las empresas prestadoras del servicio de acueducto en los municipios de Samaniego - Nariño y Murindó - Antioquía registran valores superiores al 26 %.

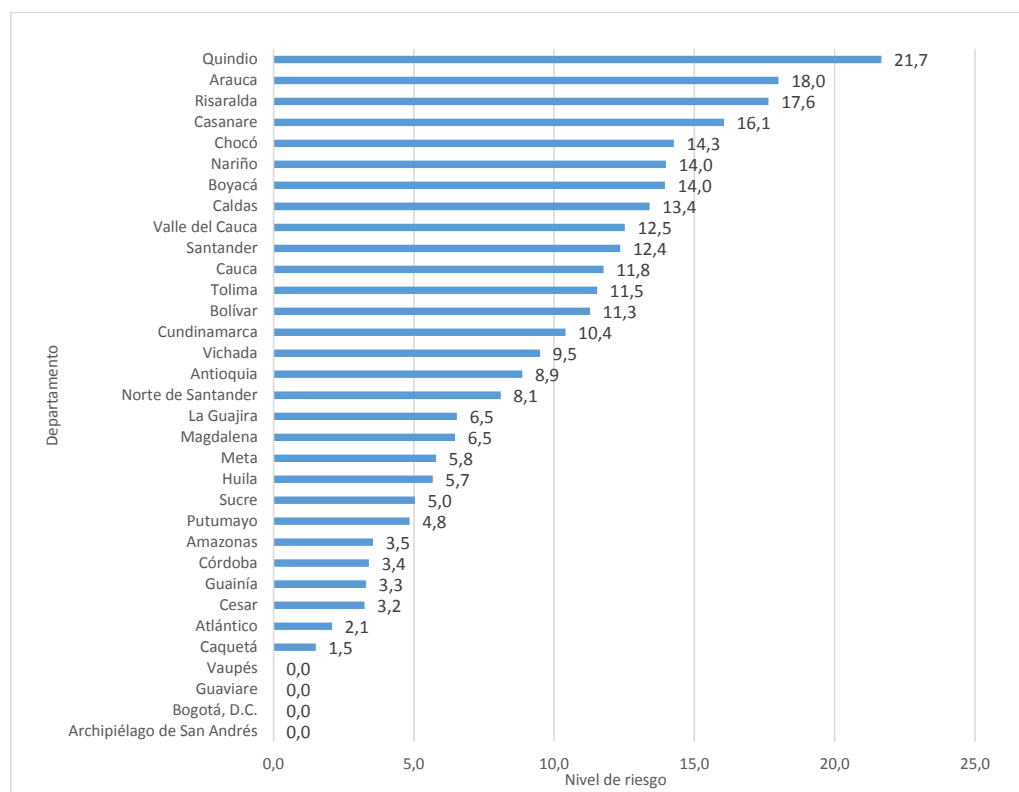


Figura 9.5: Comportamiento de los departamentos en relación con el nivel de riesgo

Nivel de riesgo (%)	Número de municipios	Número de empresas
0-5	282	655
6-10	349	775
11-15	153	451
16-20	304	807
21-25	34	60
>26	2	2
<b>Total</b>	<b>1123</b>	<b>2750</b>

Tabla 9.4: Número de empresas en nivel de riesgo

### 9.3.3. Relaciones entre el nivel de riesgo y los SAAP

Con el fin de identificar en que nivel de riesgo se encuentran cada uno de los elementos de los SAAP, se procedió a desarrollar la Tabla 9.5. En ella se precisan el número de elementos que se encuentran en cada nivel. Vale recordar que este número de elementos es menor al número de empresas registradas y que algunos de los elementos de los SAAP no se guarda relación debido a las inconsistencias en los valores de caudales, longitudes entre

otros reportados al SUI (ver capítulo 2.3.1).

Riesgo	Número Fuentes	Número Captaciones	Número Aducciones	Número Ptap	Número Conducción	Número Redes
0-5	137	82	97	92	107	33
6-10	183	127	143	119	139	42
11-15	83	54	66	42	51	20
16-20	176	122	133	105	105	34
21-25	18	7	13	6	5	3
>26	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>597</b>	<b>392</b>	<b>452</b>	<b>364</b>	<b>407</b>	<b>132</b>

Tabla 9.5: Nivel de riesgo de cada componente de los SAAP

Como resultado se obtuvo que se tiene información de 2344 elementos que componen los sistemas de abastecimiento de agua potable en Colombia para las 2750 empresas. Dicha información del número total de elementos lleva a considerar que por cada empresa fue registrado al SUI tan solo 1 componente de las infraestructuras.

El número de elementos que se deberían reportar al SUI es de alrededor 16.500 componentes estructurales, por lo que bajo este escenario ideal solo se cuenta con información del 14 %, porcentaje que resulta ser bajo. Sin duda alguna se presenta un alto desconocimiento en cuanto al conocimiento de los sistemas de acueducto que el país presenta.

De los 2344 elementos estructurales de los SAAP, el 32 % de estos se ubican en el nivel de riesgo 6-10. El 29 % en el nivel 16-24 y el 23 % de los SAAP entre el 0-5 %.

### 9.3.3.1. Ranking municipal riesgo

Este trabajo a través de una relación entre el nivel de riesgo y la información de los SAAP (bajo la condición del registro del conjunto total de los componentes estructurales) quiso mediante un ranking clasificar a los municipios en función del nivel de riesgo, cuyo criterio empleado es pertenecer al nivel 15 y 27 %. Como resultado de esta clasificación la Tabla 9.6 se presenta el listado de 29 municipios ordenados de acuerdo a los resultados del nivel de riesgo.

Ranking	Municipio	Departamento
1	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
2	Calarca	Quindio
3	Campohermoso	Boyacá
4	Espinal	Tolima
5	La Tebaida	Quindio
6	Ciudad Bolívar	Antioquia
7	Viotá	Cundinamarca
8	Salamina	Magdalena
9	Gachala	Cundinamarca
10	Guavatá	Santander
11	Flandes	Tolima
12	Olaya	Antioquia
13	Turbo	Antioquia
14	Socorro	Santander
15	Gachantivá	Boyacá
16	La Mesa	Cundinamarca
17	Barbosa	Santander
18	Pereira	Risaralda
19	Guamo	Tolima
20	Anapoima	Cundinamarca
21	Aguazul	Casanare
22	Chinácota	Norte de Santander
23	La Calera	Cundinamarca
24	Líbano	Tolima
25	Lérida	Tolima
26	Girardot	Cundinamarca
27	Caldas	Boyacá
28	Ibagué	Tolima
29	La Estrella	Antioquia

Tabla 9.6: Ranking de municipios según resultados del nivel de riesgo y que adicionalmente hayan registrado todos los elementos de los SAAP

Así mismo se realizó el Ranking para aquellos municipios que no tienen registro de los elementos estructurales de los SAAP, pero se mantuvo el criterio en cuanto al nivel de riesgo superior al 15 % . Como resultado se obtuvo que 172 municipios se encuentran en este nivel. A continuación se muestran los primeros 30.

Ranking	Municipio	Departamento
1	Samaniego	Nariño
2	Murindó	Antioquia
3	Leiva	Nariño
4	Santacruz	Nariño
5	Guachucal	Nariño
6	Vigía del Fuerte	Antioquia
7	El Peñón	Bolívar
8	Altos del Rosario	Bolívar
9	El Carmen de Atrato	Chocó
10	Regidor	Bolívar
11	San Fernando	Bolívar
12	Mosquera	Nariño
13	Olaya Herrera	Nariño
14	Hatillo de Loba	Bolívar
15	Remolino	Magdalena
16	Barranco de Loba	Bolívar
17	Puracé	Cauca
18	Riosucio(2)	Chocó
19	Sitionuevo	Magdalena
20	Cicuco	Bolívar
21	Mompós	Bolívar
22	Sipí	Chocó
23	La Florida	Nariño
24	El Tambo	Nariño
25	San José de Pare	Boyacá
26	Bagadó	Chocó
27	Juradó	Chocó
28	Heliconia	Antioquia
29	San Miguel	Santander
30	Dabeiba	Antioquia

Tabla 9.7: Ranking de municipios según resultados del nivel de riesgo y que adicionalmente no han registrado elementos de los SAAP

La anteriores consideraciones (Tablas 9.6 y 9.7) permitieron evidenciar la existencia de zonas geográficas homogéneas.

### 9.3.4. Zonas geográficas homogéneas en el nivel de riesgo

En el desarrollo de la descripción de los resultados se ha podido evidenciar que existe similitud en los niveles de riesgo que pueden tener los municipios. Un primer reflejo de esto fue lo tratado en el capítulo 9.3.2 específicamente en la Figura 9.1 que evidenció dicha homogeneidad.

Considerando esta situación presentada y a partir de ordenar los niveles de riesgo a los cuales se encuentran asociado un municipio, se empleó la matriz de datos que permite evidenciar la existencia de zonas homogéneas en el nivel de riesgo. El resultado fue el de obtener la siguiente Figura 9.6:

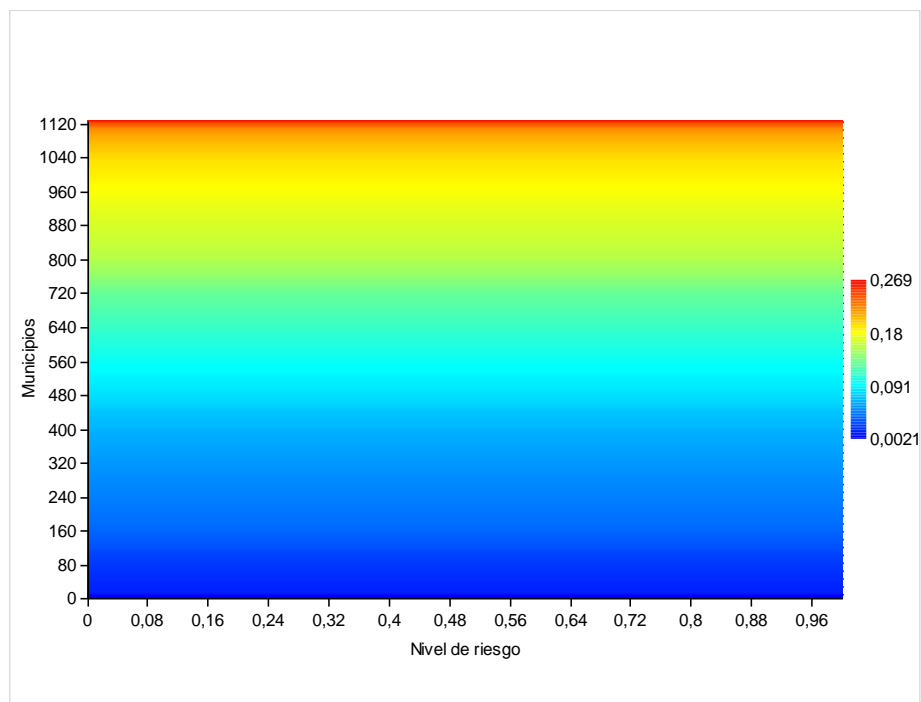
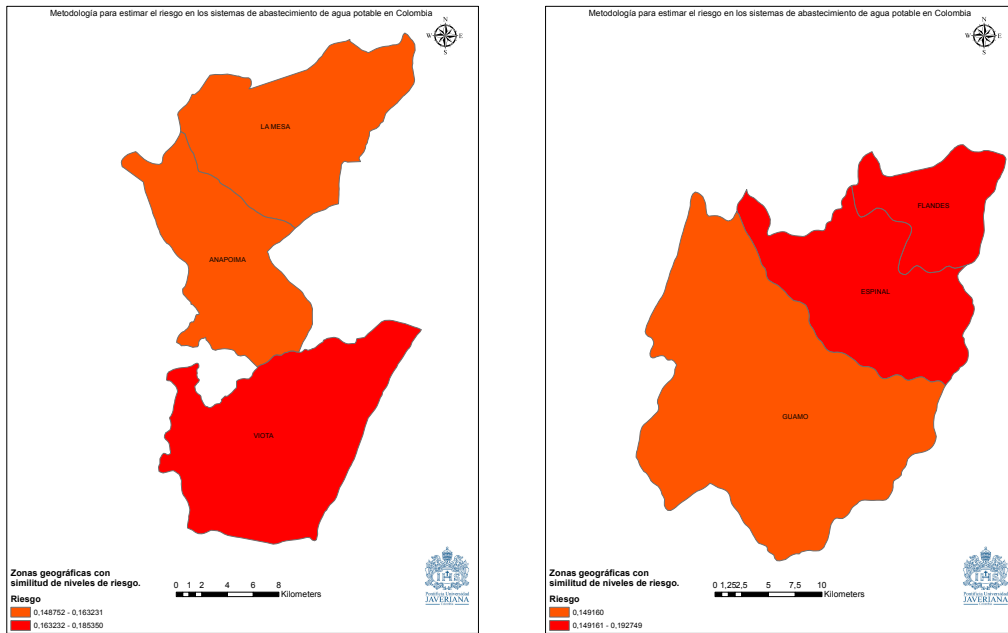


Figura 9.6: Matriz de datos relacionada con zonas de similitud en el nivel de riesgo

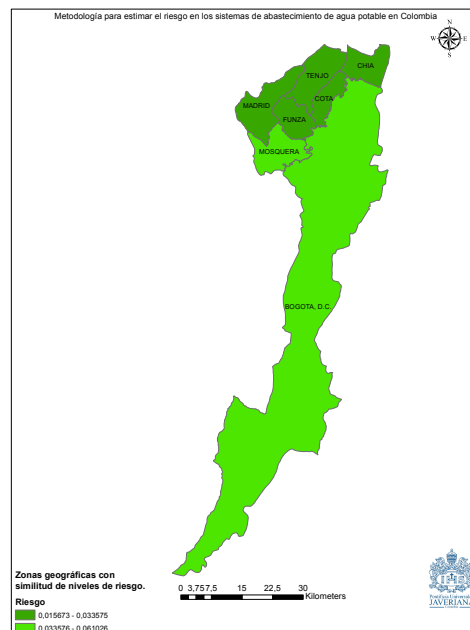
Se observa en la Figura 9.6 seis (6) grandes zonas en donde las condiciones de los niveles de riesgo aparenta tener una similitud. Razón por la cual se extrajeron tres ejemplos de zonas homogéneas (ver Figura 9.7) con el propósito de identificar la similitud.

## CAPÍTULO 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS



(a) Área homogénea 1

(b) Área homogénea 2



(c) Área homogénea 3

Figura 9.7: Comportamiento

La zona homogénea 1, la componen tres municipios de Cundinamarca: Anapoima, La



Mesa y Viota. Geográficamente se encuentran cerca y una característica para considerarla como zona homogénea es en función del nivel de riesgo. Pues entre los tres municipios presentan un nivel de 14 a 18 %. El nivel de amenaza que presentan los tres municipios es de 0.36. La vulnerabilidad igual que la amenaza presentan un comportamiento similar. Siendo la vulnerabilidad económico-productiva, socio-cultural y urbano regional las de mejor similitud.

Municipio	Nivel de amenaza	V. Económico productiva	V. Socio cultural	V. Urbano regional
Anapoima	0,36	0,42	0,52	0,65
La Mesa	0,36	0,44	0,52	0,66
Viotá	0,38	0,47	0,55	0,68

Tabla 9.8: Características unificadoras área homegénea 1

La zona homogénea 2, tres municipios del departamento del Tolima, Flandes, Espinal y Guamo. Su ubicación geográfica es cercana y el nivel de riesgo varia entre el 17 al 19 %.

Municipio	Nivel de amenaza	V. Natural	V. Socio-cultural	V. Urbano-regional
Espinal	0,42	0,41	0,52	0,61
Flandes	0,41	0,31	0,52	0,62
Guamo	0,31	0,32	0,53	0,65

Tabla 9.9: Características unificadoras área homegénea 2

La zona homogénea 3, presenta 6 municipios. La principal característica es su ubicación geográfica, ya que ella resulta ser un factor de impulso regional.

Municipio	Nivel de amenaza	V. económico productiva	V. Natural	V. Socio cultural	V. Urbano regional	V. Político institucional
Bogotá	0,12	0,09	0,48	0,43	0,46	0,37
Chía	0,06	0,45	0,24	0,50	0,63	0,29
Cota	0,04	0,45	0,23	0,46	0,63	0,30
Funza	0,08	0,46	0,24	0,50	0,63	0,32
Madrid	0,05	0,46	0,34	0,51	0,65	0,25
Mosquera	0,16	0,44	0,24	0,50	0,61	0,25
Tenjo	0,05	0,44	0,24	0,49	0,63	0,31

Tabla 9.10: Características unificadoras área homegénea 3

Para esta zona homogénea 3, Bogotá, resulta ser un área nodal en la que jalona y vincula a sus vecinos dadas las características que como capital subyacen. En cuanto a los valores de amenaza y vulnerabilidad para Bogotá resulta ser menores a los de su entorno, sin embargo los 5 municipios que rodean a la capital presentan entre ellos valores homogéneos.

Una característica de Bogotá es presentar una serie de capacidades (técnica, administrativa, social y financiera) que le permite responder ante cualquier situación (adversas y no adversas). Esto resulta ser llamativo para los de su entorno, pues recurren a estrategias para ofrecer soporte de servicios a la ciudad; un ejemplo de ello ha sido la construcción de vivienda.

Sin embargo existen relaciones de sinergia de Bogotá con el entorno. Una de ellas es la venta de agua potable a los municipios de Chía, Mosquera y Funza. Esto explica por qué el concepto de área nodal resulta atractivo para establecer sinergia que permitan reducir las condiciones de riesgo, como en este ejemplo asegurar la calidad del agua potable.

## Capítulo 10

# Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- Se desarrolló una metodología para estimar el riesgo en los sistemas de abastecimiento de agua potable (SAAP) desde una perspectiva holística, esta permite identificar con un único valor a escala municipal información sobre condiciones específicas de riesgo en un determinado territorio.
- Este trabajo es el primero que reporta el uso del método AHP para determinar el riesgo en sistemas de abastecimiento de agua en Colombia con una aproximación holística. Dicho método desde hace algunos años en Colombia se vienen aplicando en casos de estudios específicos Galarza Molina (2011), sin embargo este modelo no se ha empleado para considerar los factores con un único valor de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo.
- El presente trabajo consideró la determinación del riesgo como un indicador de las condiciones en un municipio. Por lo que para el tomador de decisiones le resulta ser un insumo para adelantar actividades concernientes a identificar que variable (s) le esta impacto su territorio a fin de adelantar estudios con un mayor nivel de detalle para así reducir la amenaza o vulnerabilidad.
- Dado que actualmente en Colombia existen pocos estudios que permitan determinar el riesgo de manera holística sobre los sistemas de abastecimiento de agua potable, esta propuesta metodológica es la primera en tener esta aproximación y en ella se reconocen las condiciones de riesgo a escala municipal, por lo que su aplicación se puede desarrollar a nivel en cualquier parte del territorio nacional.
- Cada uno de los resultados de la amenaza y vulnerabilidad y sus indicadores han sido comentados en su respectiva sección. De manera que esta metodología permite

de manera general indicar una realidad de un municipio. Sin embargo, es importante desagregar las variables objeto de análisis e identificar los aspectos en los cuales los gobiernos locales puede adelantar estudios con un mayor detalle en el animo de adelantar mejoras mediante acciones, proyectos y actividades específicas en la gestión del riesgo.

- Los resultados de la amenaza y vulnerabilidad resultan ser indicadores que ofrecen un análisis situacional del cual se pueden extraer una serie de mensajes, una de ellas es formular recomendaciones generales sobre indicador de riesgo en un municipio.
- Considerando que existen diferentes enfoques conceptuales y metodologías para evaluar la vulnerabilidad, este trabajo propuso cinco tipos de vulnerabilidad, definiciones que tienen en cuenta diferentes perspectivas (Natural, socio-cultural, político-institucional, económico-productivo y urbano-regional), así mismo se emplearon variables que dieran cuenta de cada uno de ellos y que permitiera su determinación a fin de que se puedan identificar que variable(s) afecta(n) el estado de vulnerabilidad en un determinado territorio.
- Dado que para determinar cada factor de vulnerabilidad fue necesario el empleo de variables para su determinación, esta metodología puede reconocer cual(es) variable(s) puede estar causando un mayor nivel de vulnerabilidad. De forma tal, la metodología aporta para que un tomador de decision pueda emprender políticas relacionadas con su intervención permitiéndole desagregar e identificar las causas por las cuales un municipio presenta mayor nivel de vulnerabilidad que otro.
- El Proceso Analítico Jerárquico (Analytical Hierarchy Process - AHP) facilita el análisis multicriterio basado en importancias relativas. Esta técnica permitió que bajo un juicio de expertos se asignaran los pesos a la variables de la amenaza y vulnerabilidad.
- El método de evaluación aquí descrito está basado en una serie de variables, las cuales presentan un carácter dinámico, esto significa que a medida que cambia el valor de una variable, el modelo también cambia. Este dinamismo permite mantener actualizadas las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, de forma que se oriente la toma de decisiones en la planeación, preparación y definición de acciones preventivas.
- Los resultados obtenidos presentan el riesgo con una aproximación holística a escala municipal. El modelo permite estimar el riesgo de forma desagregada por cada componente de los SAAP, por cada amenaza y por tipo de vulnerabilidad; de manera que se pueden tener análisis de riesgos relativos de acuerdo con las características de las variables de entrada.

- 
- Es importante mencionar que herramientas como los sistemas de información geográfica SIG facilitan la elaboración de mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo mediante superposiciones, valoración de variables y que adicionalmente permiten identificar zonas geográficas con niveles altos.
  - El uso generalizado en este modelo de los sistemas de información geográfica permitió la representación espacial de variables sociales, económicas, políticas, ambientales, las cuales se encuentra a una escala municipal.
  - Este trabajo brinda una aproximación en la incorporación del riesgo en los sistema de abastecimiento de agua en Colombia, que permiten de manera general ser empleados como indicador para minimizar los efectos adversos y asegurar la prestación del servicio público de acueducto y mejorar la toma de decisiones.

## Capítulo 11

# Recomendaciones

A continuación se señalan algunas recomendaciones para fortalecer la gestión en materia del riesgo en los SAAP. En este sentido, si bien el alcance del presente trabajo es bastante amplio, las dimensiones del tema no han permitido una evaluación más exhaustiva y detallada de los diferentes procesos de la gestión del riesgo (e.i., mitigación y prevención, transferencia del riesgo, respuesta a la emergencia), de los diversos fenómenos (geológicos e hidrometeorológicos) y de las realidades sectoriales y territoriales (municipios y departamentos por categorías). Por consiguiente a continuación se presentan algunas recomendaciones:

- La anterior metodología es un punto de partida para fortalecer el conocimiento del riesgo en los SAAP. Sin embargo a medida que se reduzca la escala de análisis se irán requiriendo estudios más específicos que se adapten a cada territorio y a las especificaciones técnicas de los SAAP como de las amenazas. Por tanto, es importante que dichos estudios no pierdan el enfoque integral y holístico de la temática.
- Continuar con los avances conceptuales sobre la relación entre gestión del riesgo y territorio. Dichos avances deben ser desarrollados desde dos ambientes académicos. El primero de ellos a nivel de pregrado, el cual permita identificar las amenazas que se encuentran asociadas a los SAAP y un segundo, es a nivel de maestría, dicha contribución debe ser en la construcción de modelos que permitan mejorar el conocimiento de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo.
- Se sugiere en trabajos futuros incluir análisis de sensibilidad para reducción de variables.

# Bibliografía

- Acuña, D. (2011). Metodología para identificar y analizar condiciones de vulnerabilidad de las edificaciones en el centro histórico de la serena. Master's thesis, Universidad de Chile.
- Aritstizábal, E.; Martínez, H. y o. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados porción lluvias. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131):209–227.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes, . (1996). Estudio general de amenaza sísmica de colombia. Technical report, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.; Ingeominas. y Universidad de los Andes,.
- Banco Mundial, . (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá.
- Barcia, G. and Trujillo, J. (2011). Análisis de disfrazado de fallas y recuperación usando redundancia física en sistemas distribuidos. *Universidad Católica Andrés Bello, Ingeniería en Informática*.
- Bartram, J., Corrales, L., Davison, A., Deere, D., Drury, D., Gordon, B., Howard, G., Rinehold, A., and Stevens, M. (2009). Manual para el desarrollo de planes de seguridad del agua: metodología pormenorizada de gestión de riesgos para proveedores de agua de consumo. Technical report, Ginebra.
- Benito, Belén. y Cabañas, L. (1999). Peligrosidad sísmica. *Física de la Tierra*, 11(11):13.
- Bernreuter, D. e. a. (1989). Seismic hazard characterization of 69 nuclear plant sites east of the rocky mountains. Technical report, U.S. Nuclear Regulatory Commission. Office of Nuclear Regulatory Research. US Nuclear Regulatory Commission.
- Brito, V. and Perez, P. (2011). Diseño de un sistema de almacenamiento y distribución de agua potable para el sector “guire” municipio bolívar caripito estado monagas.

- Brody, R., Brickner, Z., Carey, J., Denzer, F., Korga, I., DragHaigh, T., Harrick, M., Romero, V., Tablante, A., and Wong, L. (2008). Everybody's an expert. *Online*, 32(3):24 – 30.
- Cardona, O. and Yamín, L. (2007a). Información para la gestión de riesgo de desastres. estudio de caso de cinco países: Colombia. *Comisión Económica para América Latina Latina y Caribe (CEPAL)*.
- Cardona, O. and Yamín, L. (2007b). Información para la gestión de riesgo de desastres. estudio de caso de cinco países: Informe ejecutivo. *Comisión Económica para América Latina Latina y Caribe (CEPAL)*.
- Cardona, O. D. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo “una crítica y una revisión necesaria para la gestión”. *Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos CEDERI*.
- Castaño Mesa, L. M. (2007). Una aproximación a la vulnerabilidad. Technical report, Dirección de desarrollo Social. Departamento Nacional de Planeación.
- Celidoni, M. (2013). Vulnerability to poverty: An empirical comparison of alternative measures. *Applied Economics*, 45(12):1493–1506.
- Centre of Advanced Engineering, . (1991). Lifelines in earthquakes - wellington case study.,. Technical report, New Zealand.
- Chambers, R. (1989). *Vulnerability: How the Poor Cope*. IDS bulletin. Institute of Development Studies, University of Sussex.
- Chaudhuri, S., Jalan, J., and Suryahadi, A. (2002). Assessing household vulnerability to poverty from cross-sectional data: A methodology and estimates from indonesia.
- Cutter, S. L. (2003). The vulnerability of science and the science of vulnerability. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(1):1–12.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, . (2005). *Proyecciones de población municipales por área*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE, Bogotá, Colombia.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, . (2012). *Conceptos básicos*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE, Bogotá, Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación, . (2011). Orientaciones conceptuales y metodológicas para la formulación de visiones de desarrollo territorial. Technical report.



- Dirección de Gestión del Riesgo, . (2010). Guía municipal para la gestión del riesgo. Technical report.
- Escobar Pérez, J. and Cuervo Martínez, A. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. *Avances en medición*, 6:27–36.
- Fernández, M. A. (1996). *Ciudades en riesgo: degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres en América Latina*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- Fischer, E. P. (2010). *El gato de schrödinger en el árbol de Mandelbrot*. Editorial Crítica, Barcelona, 2 edition.
- Fonade. and Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, . (2012). Consultoría para la realización del título k. manual de prácticas de buena ingeniería, sobre gestión del riesgo en sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo, conforme al reglamento técnico de agua y saneamiento ras. Technical report, Fonade,. y Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio,.
- Forigua, S. P. and Ballesteros, O. A. (2006). Propuesta de un modelo de análisis para estimación del tamaño del software y gestión de costos y riesgos a partir de requerimientos funcionales.
- Galarza Molina, S. L. (2011). Desarrollo de una herramienta de análisis multi-criterio para el soporte de toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la pontificia universidad javeriana, sede bogotá. Master's thesis, Pontificia Universidad Javeriana.
- Garzón, P. A. (2011). Evaluación de la amenaza sísmica de colombia mediante análisis de valores extremos históricos. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, I. (2006). *Diseño de sistemas de acueducto y alcantarillado basados en la norma técnica Colombiana RAS-2000*. Pontificia Universidad Javeriana, Santiago de Cali, 2 edition.
- González, L. A. (2000). Fragilidad institucional y proceso de democratización. *Revista Probidad*, 2(6):46–51.
- Hernández, R. A. (2007). Algoritmo genético para analizar la confiabilidad de redes de distribución. Master's thesis, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

- Hurtado, T. and Bruno, G. (2005). El proceso de análisis jerárquico (ahp) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. *Trabajo de grado (Licenciado en Investigación Operativa), Universidad Nacional de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas. EAP de Investigación Operativa., Lima.*
- Infantozzi, B. (2012). Propuestas para combatir la fragilidad institucional dealianza republicana nacionalista (arena). Master's thesis, Escuela de alta política y gobierno - Goberna América Latina.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, . (2012). Programa nacional de monitoreo y seguimiento de la degradación de suelos y tierras en colombia. Technical report, Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM].
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, . (2013). Criterios para identificar y delimitar las zonas inundables a escala 1:25000. Technical report, Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM].
- Instituto de Investigación en Geociencias Minería y Química, . (1997). Mapa de amenaza volcánica del galeras. Technical report, INGEOMINAS.
- Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados, I. (2011). *Guía para la reducción de la vulnerabilidad en sistemas de agua potable y saneamiento*. Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INNA), Managua, 1 edition.
- Jain, R. (2002). *environmental assessment*. McGraw-Hill, 2002, London, second edition.
- Jalote, P. (1994). *Fault tolerance in distributed systems*. PTR Prentice Hall Englewood Cliffs.
- Jamal, H. and Policy, S. (2009). *Assessing vulnerability to poverty: evidence from pakistan*. Social Policy and Development Centre.
- Jimenez, J. and Hernandez, S. (2002). Marco conceptual de la cadena de suministro: Un nuevo enfoque logístico. *Publicación técnica. Secretaria de comunicaciones y trnsportes. Instituto Mexicano del transporte*, 1(215):1-272.
- Lavell, A. (1994). *Viviendo en riesgo. Comunidades vulnerables y prevención de desastres en America Latina*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Colombia, 1 edition.
- López, J. E. and Dolado, J. J. (2009). Combinación de distribuciones de probabilidad con ahp. *Actas de los Talleres de las Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos*, 3(1).

- Lumsden, J., Hopkins, D., and Norton, J. (1992). Lifelines in earthquakes: A case study based on wellington. In *IPENZ Annual Conference 1992, Proceedings of: Economic growth, a professional engineer's contribution: Volume 1, General and civil; Papers presented in the technical programmes of the institutions Annual Conference, Christchurch, February 16-19*, page 497. Institution of Professional Engineers New Zealand.
- Marigorta, E., Suárez, S., and Francos, J. (1994). *Sistemas de Bombeo*. Universidad de Oviedo, Departamento de Energía.
- Martinez, S. L. A. (2012). La vulnerabilidad cultural: el caso de la zona de amenaza volcánica alta (zava) del galeras. In *III Congreso Nacional de Investigación en Educación en ciencias y Tecnología y II Congreso Iberoamericano de Investigación en Enseñanza de las Ciencias*. Universidad de Nariño.
- Melo González, R., Lara H, C., and Jacobo, F. (2009). Estimación de la confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad mediante una simulación tipo monte carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 24(2):93–104.
- Metcalf, L. and Eddy, H. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: redes de alcantarillado y bombeo*. Mc Graw Hill, Madrid, 2 edition.
- Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de agua potable y saneamiento básico, . (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (ras2000).. Technical report, Bogotá, Colombia.
- Ministerio del Medio Ambiente, . (2002). *Sistema de gestión ambiental municipal*. Dirección General Ambiental Sectorial, Colombia, 1 edition.
- Moreno Jiménez, J. (2002). El proceso analítico jerárquico (ahp). fundamentos, metodología y aplicaciones. *Departamento Métodos Estadísticos. Facultad de Económicas. Universidad de Zaragoza*.
- Moreno Jiménez, J., Aguaron, J., Cano, F., and Escobar, M. (1998). Validez, robustez y estabilidad en decisión multicriterio. análisis de sensibilidad en el proceso analítico jerárquico. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 92(4):387–397.
- MPS. and MVDT. (2010). Mapa de riesgo de calidad de agua. resolución 4716 de 2010 ministerio de protección social -mps. ministerio de vivienda desarrollo territorial -mvdt. Technical report, Bogotá, Colombia.

- Naciones Unidas, U. (2006). *Overcoming Economic Vulnerability and Creating Employment: Report of the Committee for Development Policy on the Eighth Session, 20-24 March 2006*. Department of Economic and Social Affairs. United Nations Economic and Social Council. Committee for Development Policy and United Nations. Dept. of Economic and Social Affairs.
- Naciones Unidas, U. (2011). *El derecho al agua*. Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos, New York.
- Naranjo, S. M. (2009). En colombia los niños todavía mueren por hambre. *Revista Semana*. Disponible en <http://www.semana.com/nacion/articulo/en-colombia-ninos-todavia-mueren-hambre/107521-3>.
- Nyman, D. (1984). Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud, . (1997). Estudio de caso: Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable frente a deslizamientos.,. Technical report, Washington, D.C.
- Parra, E. A. (2013). Metodología para la evaluación del riesgo por inundación. Master's thesis, Pontificia Universidad Javeriana.
- Pietri, D., Dietrich, P., Mayo, P., and Carcagno, A. (2011). Multicriteria evaluation of environmental risk exposure using a geographic information system in argentina. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 30(4):377–387.
- Pizarro, R. (2001). La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde américa latina. Technical report, CEPAL NACIONES UNIDAS.
- Ramos, A. (2014). Análisis de vulnerabilidad territorial para el diseño de un sistema soporte de decisiones, caso colombiano. *Documento de trabajo*.
- Ramírez Gómez, J. (2011). Régimen jurídico del servicio público domiciliario de aseo. *Revista de Derecho*, 23(23).
- Ratzinger, J. B. X. (2012). *El credo, hoy*. Salterrae, 2 edition.
- Rodríguez Castellanos, A., Araujo de la Mata, A., and Urrutia Gutiérrez, J. (2001). La gestión del conocimiento científico-técnico en la universidad: un caso y un proyecto.
- Ríos, D. and Murgida, A. (2004). Vulnerabilidad cultural y escenarios de riesgos por inundaciones. *GEOUSP-Espaço e Tempo*, 16:181–192.

- 
- Saaty, T. L. (1988). *What is the analytic hierarchy process?* Springer.
- Saaty, T. L. (1994). *Fundamentals of decision making*.
- Saaty, T. L. (1999). *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*, volume 2. RWS publications.
- Saavedra, G. F. (2000). Vulnerabilidad externa, fragmentación social, fragilidad política: la reforma del estado en américa latina. *Quórum: revista de pensamiento iberoamericano*, (1):63–73.
- Sanchez-Silva, M. (2005). *Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos. Teoría y aplicaciones en ingeniería*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, 1st edition.
- Schmidtlein, M. C., Deutsch, R. C., Piegorsch, W. W., and Cutter, S. L. (2008). Un análisis de sensibilidad del índice de vulnerabilidad social. *Risk Analysis*, 28(4):1099 – 1114.
- Servicio Geológico Colombiano SGS, . (2011). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Technical report, Servicio Geológico Colombiano -SGS,. Bogotá D.C.
- Sánchez, R. (2001). La toma de decisiones con múltiples criterios. un resumen conceptual y teórico. *Centro de Planificación y Gestión. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia*.
- Sánchez, R. e. a. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. *Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM*.
- Superintendencia de Servicios Públicos, . (2011). *Diagnóstico de la calidad del agua suministrada por las empresas prestadoras del servicio de acueducto en Colombia 2009 -2010*. Superintendencia de Servicios Públicos, SSPD, Bogotá, Colombia. Disponible en [www.superservicios.gov.co](http://www.superservicios.gov.co) recuperado: 31 de octubre de 2013.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, . (2011). *Lineamientos para la revisión de los planes de contingencia para la sostenibilidad en la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado*. Superintendencia de Servicios Públicos, SSPD, Bogotá, Colombia. Disponible en <http://www.superservicios.gov.co/home/web/guest/inicio>, recuperado: 1 de junio de 2012.
- Uribe, E. (2009). Consideraciones preliminares para la regionalización del servicio público de acueducto. *Presentación congreso de facultades de medio ambiente*. Disponible en [http://200.69.103.48/comunidad/dependencias/facultades/medioambiente/Documentos/Eventos/SeminarioInternacional/Mesa servicio acueducto.pdf](http://200.69.103.48/comunidad/dependencias/facultades/medioambiente/Documentos/Eventos/SeminarioInternacional/Mesa%20servicio%20acueducto.pdf).
-

- Vargas, D. E. (2011). Metodología para estimar el riesgo en los sistemas de abastecimiento de agua potable en Colombia. formulación de anteproyecto. Master's thesis, Maestría en Hidrosistemas.
- Wang, S., Hong, L., and Chen, X. (2012). Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: A methodological framework. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(11):3323–3335.
- Wilches Chau, G. (1988). Pensar globalmente, sección iii: La vulnerabilidad mundial. Bogotá. *En lo Que se refiere a la participación comunitaria y locales*.
- Wilson, B. (1984). *Systems, concepts, methodologies, and applications*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Zhang, Y. and Wan, G. (2008). Can we predict vulnerability to poverty? Technical report, Research paper/UNU-WIDER.