



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Modelo de decisión para la priorización y selección de medidas de adaptación al cambio climático

Diana Carolina Ríos Echeverri

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Decisión y la Computación

Medellín, Colombia

2016

Modelo de decisión para la priorización y selección de medidas de adaptación al cambio climático

Diana Carolina Ríos Echeverri

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería – Ingeniería de Sistemas

Directora:

Ph.D. Patricia Jaramillo Álvarez

Codirector:

Ph.D. Santiago Arango Aramburo

Línea de Investigación:

Investigación de operaciones

Grupo de Investigación:

Ciencias de la Decisión

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2016

En honor al amor y la alegría.

A mis queridos abuelos:

María Ernestina Monsalve y José Ricardo Echeverri.

Agradecimientos

De forma especial agradezco a la Universidad Nacional de Colombia, el lugar donde he tenido la oportunidad de aprender, investigar y ser mejor personal y profesionalmente.

A los profesores Patricia Jaramillo, Santiago Arango y Jaime Ignacio Vélez, por su acompañamiento y valiosos aportes en la realización de esta tesis.

A mis queridísimos abuelos, María Ernestina Monsalve y José Ricardo Echeverri, quienes aún en la distancia me inspiran y acompañan; a mi tía Rosa Echeverri por su incansable esfuerzo en mi cuidado, educación y formación.

A mis padres, amigos y compañeros, especialmente a Jessica Arias, Natalia Soto, Christian Ortiz y Laura Cano, por su amistad y valioso apoyo durante la realización de esta tesis, muchas gracias.

Agradezco también al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Proyecto de *Desarrollo de Herramientas de Educación y Formación para la implementación de la Estrategia de Educación, Formación y Sensibilización de Públicos sobre Cambio Climático en 2015*, el cual dio origen a muchas de las reflexiones que se plasman en este documento durante el diseño del videojuego Aventura Climática.

Resumen

El cambio climático está provocando alteraciones en los sistemas naturales, económicos y sociales. Ante esto, hay una necesidad de los gobiernos locales por adaptarse a las nuevas condiciones del clima con la implementación de medidas que pueden ser de diverso tipo: estructurales, sociales e institucionales; las cuales tienen costos de inversión asociados y diferentes grados de efectividad para la reducción de impactos, ya sea en el corto o el largo plazo. Esta tesis propone un modelo de decisión para seleccionar las medidas a implementar, se desarrolla en dos etapas: la primera es un análisis territorial para identificar necesidades de adaptación según las amenazas naturales que pueden ocurrir en un territorio y sus impactos asociados en cuanto a infraestructura, ambiente, economía y sociedad. De acuerdo con las necesidades territoriales, se lista el conjunto de medidas sujeto a análisis. La segunda etapa es de formulación y desarrollo del modelo, para tal fin se exploraron dos estrategias de modelización, la primera con el método de análisis multicriterio ANP y la segunda con optimización combinatoria. La estrategia que mejor recogió los requerimientos del problema fue la segunda, en tanto integra en un solo modelo de decisión las preferencias de un decisor respecto a los criterios de evaluación, asimismo, permite elegir las medidas que maximizan la efectividad para reducir impactos por riesgo climático e incorporar restricciones asociadas a la disponibilidad de recursos locales y a las relaciones que puede haber entre las medidas, como precondición, facilitación, sinergia y contradicción.

Palabras clave: adaptación al cambio climático, selección, priorización, modelo de decisión, ANP - BCR, optimización.

Abstract

Climate change is causing alterations in the natural, economic and social systems. Given this, there is a need for local governments to adapt to the new climate conditions with the implementation of measures that can be of different types: structural, social and institutional; which have associated investment costs and different degrees of effectiveness to reduce impacts, either in the short or the long term. This thesis proposes a decision model to select adaptation measures, it is developed in two stages: the first is a territorial analysis to identify adaptation needs according to the natural hazards that can occur in a territory and its associated impacts in terms of infrastructure, environment, economy and society. According to the territorial needs, the set of measures subject to analysis is listed. The second stage is the formulation and development of the decision model, for this purpose, two modeling strategies were explored, the first one with ANP multicriteria analysis method and second one with combinatorial optimization. The strategy that best captured the requirements of the problem was the second one, since it integrates in a single decision model the preferences of a decision maker with respect to the evaluation criteria, it also allows choosing the measures that maximize the effectiveness to reduce impacts by climatic risk, and incorporating constraints associated with the availability of local resources and the relationships that may exist between the measures, such as precondition, facilitation, synergy and contradiction.

Keywords: climate change adaptation, selection, prioritization, decision model, ANP-BCR, optimization.

Contenido

	Pág.
1. Descripción del problema de investigación	5
1.1 Antecedentes	5
1.1.1 El contexto de la adaptación al cambio climático	5
1.1.2 Métodos y herramientas para la toma de decisiones en adaptación al cambio climático	8
1.2 Problema de investigación	14
1.3 Objetivos de investigación	15
2. Marco conceptual sobre la adaptación al cambio climático	17
2.1 La reducción del riesgo como determinante de la adaptación	18
2.2 Enfoques y medidas de adaptación al cambio climático	23
3. Metodología	27
3.1 Etapa 1: análisis territorial	27
3.1.1 Definición de tipologías de territorios	28
3.1.2 Identificación de amenazas y de impactos potenciales según el territorio	30
3.1.3 Identificación de medidas de adaptación	34
3.2 Etapa 2: formulación e implementación de estrategias de modelización	34
3.2.1 Definición de requerimientos del modelo de decisión	35
3.2.2 Estudio de métodos y herramientas para priorización y selección de medidas	41
3.2.3 Marco teórico sobre modelos AHP y ANP	45
4. Modelo de decisión para la priorización y selección de medidas de adaptación al cambio climático	49
4.1 Estrategia 1: Modelo de análisis multi-criterio ANP-BCR	50
4.2 Estrategia 2: Modelo de optimización con variables binarias	54
5. Caso de aplicación	61
5.1 Estrategia 1: Modelo de análisis multi-criterio ANP-BCR	61
5.1.1 Construcción del modelo	61
5.1.2 Resultados	66
5.2 Estrategia 2: Modelo de optimización binaria	67
5.2.1 Construcción del modelo	67
5.2.2 Resultados	72
6. Conclusiones y recomendaciones	77
6.1 Conclusiones	77

6.2	Recomendaciones	80
Anexos		
Anexo A.	Medidas de adaptación identificadas	87
Anexo B.	Valoración de la alternativas respecto a los criterios	91
Anexo C.	Gravedad de los impactos según la amenaza	99
Anexo D.	Construcción del modelo BCR (Estrategia 1)	101
Anexo E.	Relaciones entre las medidas	103
Anexo F.	Resultados de la Estrategia 1: modelo BCR en SuperDecisions	108
Anexo G.	Resultados de la Estrategia 2: modelo de optimización.....	109
Anexo H.	Análisis de sensibilidad del presupuesto	111

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Planeación de la adaptación	6
Figura 2-1: Esquema de la interacción entre el sistema climático, la exposición y la vulnerabilidad en la generación del riesgo.....	19
Figura 2-2: Esquema orientador para identificación de medidas de adaptación y reducción del riesgo	21
Figura 3-1: Proceso metodológico para el análisis territorial.....	27
Figura 3-2: Eventos climáticos desastrosos y cantidad de registros, Colombia 1970-2007	30
Figura 3-3: Proceso metodológico para la formulación del modelo.....	34
Figura 3-4: Requerimientos del modelo de decisión	35
Figura 3-5: Criterios de análisis del proceso de priorización y selección	36
Figura 3-6: Estructura básica de los modelos AHP y ANP	45
Figura 3-7: Modelo de dos capas ANP-BOCR.....	46
Figura 4-1: Estrategias de modelización.....	50
Figura 4-2: Estructura de la red ANP del modelo de decisión.....	51
Figura 4-3: Ejemplo de ranking comparaciones pareadas	53
Figura 4-4: Jerarquía (pesos) de preferencias del modelo de optimización	55
Figura 5-1: Red principal del modelo BCR	62
Figura 5-2: Subred de efectividad – Modelo BCR.....	63
Figura 5-3: Subred de efectividad en el corto plazo – Modelo BCR.....	64
Figura 5-4: Subredes de costos y riesgos – Modelo BCR.....	65
Figura 5-5: Jerarquía de pesos del modelo de optimización.....	69
Figura 5-6: Frontera de Pareto del modelo de optimización	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Revisión bibliográfica de métodos y herramientas para la priorización y selección de medidas de adaptación	9
Tabla 2-1: Enfoques de adaptación al cambio climático y ejemplos.....	24
Tabla 3-1: Propuesta de categorización de territorios	29
Tabla 3-2: Listado de amenazas según la tipología del territorio.....	31
Tabla 3-3: Identificación de impactos según la amenaza	33
Tabla 3-4: Valoración de la gravedad de las amenazas respecto a la generación de impactos en la dimensión social (territorio de ladera en pueblo)	41
Tabla 3-5: Métodos de Análisis Multi-Criterio.....	43
Tabla 4-1: Matrices de comparación y cálculo de proporciones	51
Tabla 4-2: Ejemplo de ranking por ratings	53
Tabla 5-1: Resultados de las 10 primeras alternativas priorizadas en el modelo ANP-BCR.....	67
Tabla 5-2: Alternativas facilitadoras y facilitadas.....	71
Tabla 5-3: Resultados del modelo de optimización binaria	72

Lista de símbolos y abreviaturas

Subíndices

Subíndice	Término
i	Medida de adaptación al cambio climático
n	Número total de medidas de adaptación al cambio climático
k	Impactos asociados a las amenazas naturales
m	Número total de Impactos asociados a las amenazas naturales

Abreviaturas

Abreviatura	Término
B	Beneficios
C	Costos
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas
I	Inundación
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IF	Incendio forestal
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
M	Movimientos en masa
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NAPAs	<i>National Adaptation Programmes of Action</i> – Programa Nacional de Acción para la Adaptación
O	Oportunidades
O	Selección óptima de medidas
P	Presupuesto
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
R	Riesgos
S	Sequía
U	Conjunto de todas las posibles medidas a implementar
UKCIP	<i>United Kingdom Climate Impacts Programme</i> – Programa de Impactos Climáticos del Reino Unido
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> - Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático

Introducción

La cantidad de emisiones de gases efecto invernadero aumentó casi un 90% entre los años 1970 y 2011 (EPA, 2015). Dichas emisiones son la causa principal del calentamiento global y de los efectos del cambio climático que está experimentando el planeta, como la disminución de los niveles de hielo y nieve y el aumento del nivel del mar (IPCC, 2014b).

Si bien hay incertidumbre sobre los impactos potenciales del cambio climático, se espera que haya un aumento en la frecuencia, intensidad y duración de eventos asociados al clima (Revi et al., 2014), lo cual puede significar, por ejemplo, temporadas de invierno o de sequía más intensas y duraderas, que pueden ocasionar pérdidas económicas, ecosistémicas y humanas. Con el fin de reducir consecuencias como éstas, se ha hecho un llamado en la agenda internacional por la adaptación al cambio climático, para ajustar o preparar los territorios a las nuevas condiciones.

El proceso de adaptación involucra la implementación de acciones o medidas que pueden ser de diverso tipo, ya sea estructural, con la construcción de obras de infraestructura o la disposición de tecnologías y arreglos ecosistémicos; social, mediante programas de educación, generación de información y modificación de conductas en la población; o institucional, con la puesta en marcha de normativas, reglamentaciones y programas gubernamentales (Noble et al., 2014). El qué hacer según las necesidades particulares de un territorio y los recursos locales disponibles es el objetivo que se persigue en esta tesis.

Los resultados de selección de medidas pueden variar según las características y restricciones propias de los territorios, esto se explica porque: 1) la adaptación es un proceso local (Mimura et al., 2014), que depende de condiciones particulares como la topografía y la vulnerabilidad ante ciertas amenazas climáticas; 2) está limitado por la capacidad financiera local (Measham et al., 2011), luego, unos territorios podrán hacer más y mejores inversiones que otros. En este sentido, es de utilidad contar con herramientas de toma de decisiones que permitan buen uso de los recursos.

En la literatura se reporta una amplia variedad de métodos y herramientas para la identificación, selección y priorización de medidas, sin embargo, existen limitaciones respecto a la inclusión de restricciones como la disponibilidad de recursos locales para inversión y las relaciones entre alternativas; sobre estas últimas se tienen las sugeridas por Taeihagh et al. (2013): de precondición, cuando se requiere de la implementación previa de una alternativa A para que una alternativa B funcione exitosamente; de facilitación, cuando una alternativa B funcionaría mejor si una alternativa A se hubiera implementado; de sinergia, cuando dos alternativas funcionarían mejor si ambas se implementaran; de contradicción, cuando son conflictivas.

La presente tesis busca proponer un modelo de decisión para la priorización y selección óptima de medidas de adaptación al cambio climático en un territorio, teniendo en cuenta los siguientes requerimientos: 1) los impactos climáticos que deben ser reducidos según unas condiciones territoriales particulares y 2) restricciones establecidas por los decisores, como la disponibilidad de recursos y las relaciones entre medidas antes mencionadas. Para tal fin, se hizo una revisión de métodos empleados en toma de decisiones para la selección de alternativas y se encontró una amplia utilización del análisis multicriterio, particularmente de los modelos de Proceso de Análisis Jerárquico (Analytic Hierarchy Process – AHP) y Proceso de Análisis en Red (Analytic Network Process - ANP), éste último fue explorado de forma inicial para dar respuesta al objetivo propuesto.

Estos modelos permiten evaluar las alternativas de decisión según una preferencia o importancia dada a un conjunto de criterios establecidos por el decisor, que en ocasiones pueden resultar conflictivos, como por ejemplo los beneficios económicos y los ambientales; asimismo, permiten incorporar criterios de evaluación que no necesariamente se miden en términos monetarios, sino también, en escalas cualitativas.

Debido a que el método de análisis multicriterio ANP presentó limitaciones para abordar los requerimientos establecidos (estrategia 1), se consideró la formulación del problema de selección como un problema de optimización, combinado con una estructura de criterios ANP (estrategia 2), los análisis, ventajas y limitaciones encontradas en cada estrategia de modelización se reportan en este documento. La segunda estrategia permite incorporar las restricciones asociadas al presupuesto disponible y a las relaciones entre medidas,

asimismo, permite obtener el conjunto óptimo con el que se logra la mayor efectividad posible para la reducción de los impactos asociados al clima, según sean las preferencias de un decisor en dimensiones como la infraestructura, el ambiente, la economía y la sociedad.

El documento se estructura en seis capítulos: el primero expone los antecedentes y las limitaciones reportadas en la literatura que dan origen al problema de investigación. El segundo presenta un marco conceptual sobre adaptación al cambio climático, con conceptos relacionados como riesgo, vulnerabilidad y capacidad adaptativa. El tercero presenta las dos etapas metodológicas seguidas para el desarrollo de esta tesis. El cuarto capítulo presenta la propuesta del modelo de decisión, con las dos estrategias de modelización exploradas para la formulación del problema de selección. El quinto capítulo presenta un caso de aplicación de las dos estrategias en un territorio de ladera con configuración de pueblo. Finalmente, el capítulo sexto expone las principales conclusiones y los aportes logrados.

1. Descripción del problema de investigación

Este capítulo presenta una revisión sobre métodos y herramientas para la selección y priorización de medidas de adaptación al cambio climático. A partir de las conclusiones de la revisión de literatura, se identifica y delimita el problema de investigación y se plantean los objetivos a abordar.

1.1 Antecedentes

1.1.1 El contexto de la adaptación al cambio climático

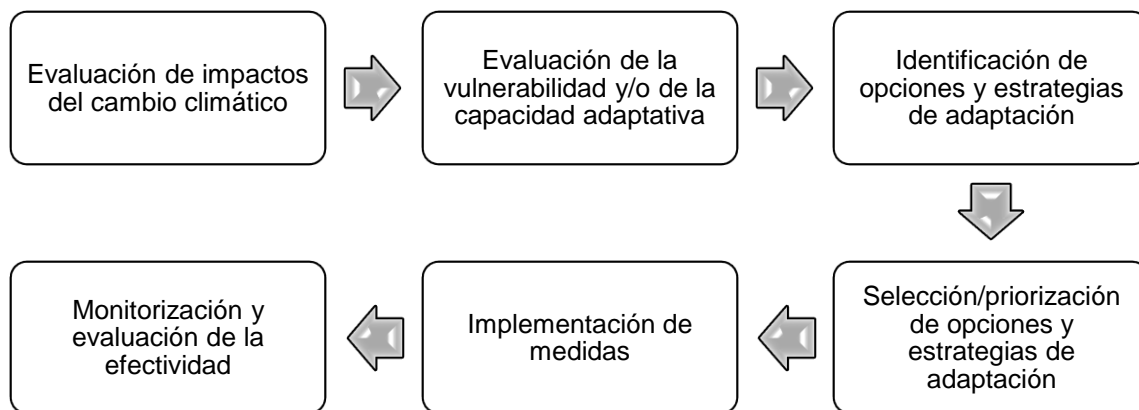
El calentamiento global es inequívoco y es un fenómeno de escala global. En los últimos años se ha registrado un incremento de la temperatura promedio global del aire y del océano, el derretimiento de glaciares y el aumento del nivel del mar. Este calentamiento es causado principalmente por actividades antropogénicas y ha provocado alteraciones en los sistemas naturales, económicos y sociales, como por ejemplo (IPCC, 2014a):

- Alteraciones en los sistemas hidrológicos en cuanto a cantidad y calidad del recurso hídrico, debido a variaciones en lluvias y al derretimiento de hielo y nieve.
- Cambios en la distribución geográfica, actividades e interacciones de especies terrestres y marinas.
- Afectaciones en el rendimiento de los cultivos, como el trigo y el maíz, lo cual podría ocasionar problemas futuros de seguridad alimentaria.
- Afectaciones en la salud humana y en las tasas de mortalidad como consecuencia de cambios de temperatura.
- Impactos ocasionados por fenómenos extremos conexos al clima (olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones, incendios), como la alteración de ecosistemas, daños en la infraestructura, afectaciones en el suministro de agua, entre otros.

- Afectaciones en la población pobre; de forma directa por impactos en los medios de subsistencia, disminución de los rendimientos de los cultivos o destrucción de hogares; y de forma indirecta con el aumento en los precios de los alimentos y de la inseguridad alimentaria.

En aras de reducir impactos ocasionados por el cambio climático como los mencionados, se llevan a cabo procesos de adaptación o ajuste a las nuevas condiciones del clima, cuya planeación involucra varias fases: se hace una evaluación de impactos ocasionados por el cambio climático, se evalúan las condiciones de vulnerabilidad y/o de capacidad adaptativa y conforme a esto se seleccionan las mejores estrategias de adaptación, las cuales son implementadas y monitorizadas posteriormente, tal como lo ilustra la Figura 1-1.

Figura 1-1: Planeación de la adaptación



Fuente: Adaptación de Schipper et al. (2010).

El proceso de adaptación al cambio climático tiene características que son determinantes en la toma de decisiones respecto a las opciones, estrategias o medidas; las cuales se explican a continuación:

- **Es Multi-actor:** hay roles y responsabilidades de actores públicos y privados (Dewulf, Meijerink, & Runhaar, 2015); así por ejemplo, pueden intervenir gobiernos locales, mediante la inversión en planes de infraestructura; corporaciones ambientales, con la implementación de planes de cuidado y normativa ambiental; y ciudadanos del común, con la modificación de hábitos y conductas que permiten reducir las condiciones de vulnerabilidad.

- **Multi-sector:** diferentes sectores están involucrados en la gobernanza del cambio climático (Dewulf et al., 2015); las medidas pueden implementarse desde sectores diferentes, como la gestión hídrica, con planes especiales de cuidado de cauces para la prevención de inundaciones; la planeación urbana, con normativas de ocupación territorial para la reducción del riesgo; el sector agrícola, con la modificación de prácticas tecnológicas de manejo de cultivos; entre otros sectores económicos y sociales.
- **Multi-dimensional:** se persiguen objetivos de mejora en distintas dimensiones, como la ambiental, la económica y la social. Puede suceder que las mejoras en una, por ejemplo, la económica, cause efectos negativos en otra, por ejemplo, la ambiental.
- **Multi-escala:** el fenómeno tiene importancia de escala global, nacional y local. Sin embargo, dado la relación directa entre el clima y el territorio, la adaptación es de tipo regional o local; que además, puede ser visto como una responsabilidad colectiva e incluso individual (Dewulf et al., 2015).
- **Hay múltiples enfoques y alternativas:** el enfoque estructural, que comprende intervenciones físicas a nivel de infraestructura, tecnología y ecosistemas; el social, con modificaciones en hábitos, programas de educación y generación de información; y el institucional, con incentivos económicos, reglamentación y programas gubernamentales (Noble et al., 2014).
- **Es inter-temporal:** algunas medidas para la adaptación pueden tener efectos inmediatos a partir de su implementación, otras en cambio logran ser efectivas en el largo plazo. Pueden presentarse además discrepancias en la efectividad de una medida, ya que puede reportar efectos positivos en el corto plazo, pero no ser tan buena en el largo.
- Hay **limitaciones por disponibilidad de recursos** o capacidad financiera (Measham et al., 2011): las medidas tienen costos de inversión asociados que son determinantes para la escogencia de las mismas, según el presupuesto disponible.

1.1.2 Métodos y herramientas para la toma de decisiones en adaptación al cambio climático

La literatura reporta una amplia variedad de métodos y herramientas para llevar a cabo las diferentes fases de planeación de la adaptación que fueron referidas en la Figura 1-1 (Dogulu & Kentel, 2015; Schipper et al., 2010; UNFCCC, 2008). En la revisión de literatura realizada para esta tesis, fueron de particular interés los métodos y herramientas de decisión orientados a la fase de selección y/o priorización de medidas de adaptación al cambio climático, entendida esta última, en este documento, como el ordenamiento de las alternativas según su importancia y efectividad para responder al propósito de adaptación.

Se identifican dos generaciones en la evolución de los métodos (UNFCCC, 2008): la primera generación se enfocó en entender la magnitud de los impactos del cambio climático¹, fueron estudios basados principalmente en escenarios y modelos climáticos. La segunda generación, surge de un mayor interés en la adaptación a la variabilidad climática², considerando factores de estrés ambiental y socio-económico; con enfoques sofisticados de construcción de escenarios, participación de actores, identificación de políticas y medidas, y evaluación de la capacidad adaptativa.

La Tabla 1-1 relaciona algunos de los métodos listados en el *Compendio de Métodos y Herramientas para evaluar los Impactos, la Vulnerabilidad y la Adaptación al Cambio Climático* de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC, 2008), siendo de interés para esta revisión, por su relación con la priorización o selección de medidas, los marcos metodológicos que refiere el compendio y las herramientas de decisión.

¹ **Cambio climático:** se refiere a un cambio en el estado del clima que puede identificarse por cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un tiempo prolongado, típicamente décadas o más (Agard & Schiper, 2014).

² **Variabilidad climática:** se refiere a variaciones en el estado medio y otras estadísticas (tales como desviaciones estándar, la ocurrencia de extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más allá de los eventos climáticos individuales. La variabilidad puede deberse a procesos internos dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa) (Agard & Schiper, 2014).

Tabla 1-1: Revisión bibliográfica de métodos y herramientas para la priorización y selección de medidas de adaptación

Categoría	Método	Descripción breve
Marco metodológico	Marco de Políticas de Adaptación del PNUD (APF) (Lim & Spanger-Siegfried, 2004).	Sugiere cuatro métodos de priorización: análisis costo beneficio, análisis costo efectividad, análisis multi-criterio y juicio de expertos.
	Evaluaciones de los impactos y la adaptación al cambio climático en múltiples regiones y Sectores (AIACC, 2016).	Se centra en la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo, considera herramientas como: análisis costo beneficio, sistemas de soporte a la decisión, análisis multi-criterio, análisis de actores, medios de vida sostenible e indicadores.
	Directrices para la preparación de los programas nacionales de adaptación (NAPAs) (UNFCCC, 2009).	Propone una guía para la priorización de opciones de adaptación a partir de herramientas como: análisis costo beneficio, análisis costo efectividad, análisis multi-criterio y métodos de actores.
	Programa de Impactos Climáticos del Reino Unido (UKCIP): riesgos, incertidumbre y toma de decisiones (Willows & Connell, 2003).	Propone una guía para identificar opciones de adaptación preferidas de acuerdo con criterios de mínimo arrepentimiento o no arrepentimiento, incluyendo beneficios, costos y riesgos; sugiere la utilización de herramientas como comparación pareada, análisis de impactos cruzados, análisis de decisiones, entre otros.
Herramientas de decisión	Ejercicio de política	Involucra a científicos, académicos y hacedores de políticas en la construcción de “historias futuras” para el análisis de escenarios.
	Análisis costo-beneficio	Analiza cada medida de adaptación identificando, cuantificando y monetizando sus costos y beneficios asociados. A menudo involucran un alto grado de incertidumbre cuando se deben cuantificar bienes o servicios no mercadeables.
	Análisis costo – efectividad	Es generalmente aplicado en decisiones de proyectos individuales, cuando los beneficios no son monetizados, se compara su efectividad respecto a un objetivo.
	Análisis multi-criterio	Es un enfoque estructurado que determina preferencias respecto a alternativas respecto a ciertos atributos y objetivos que son deseables. Se usa especialmente cuando un solo criterio (como costo-beneficio) no es suficiente si se desean incluir otros criterios como lo ambiental o lo social, a los cuales no se les asignan valores monetizados.

Categoría	Método	Descripción breve
	Herramienta para la evaluación y gestión ambiental (TEAM) (Smith et al. 1996; citado por UNFCCC, 2008).	Es un paquete de software que permite crear gráficos y tablas para comparar opciones de adaptación a partir de criterios cuantitativos y cualitativos.
	Matriz de decisión para la adaptación (ADM) (Mizina, Smith, Gossen, Spiecker, & Witkowski, 1999).	Usa técnicas de evaluación multi-criterio para evaluar la efectividad relativa y los costos de las opciones de adaptación. Se da una calificación a las alternativas respecto a qué tan bien responden a los criterios para un determinado escenario. Los puntajes son multiplicados por pesos y agregados para determinar las opciones que mejor responden a los criterios.
	<i>Screening</i> de opciones de adaptación (Mizina et al., 1999).	Es una matriz para la toma de decisiones que mediante respuestas de “sí” y “no” permite identificar fortalezas y debilidades de un conjunto de opciones.
	Estimación de riesgos relacionados con el clima como indicadores de la necesidad de las respuestas de adaptación (Akentyeva, 2016; citado por UNFCCC, 2008).	Permite obtener una estimación cuantitativa de riesgos relacionados con el clima para objetivos y procesos específicos. El proceso se desarrolla en tres pasos: 1) estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos en un territorio, 2) evaluar los daños sociales como una correlación entre la población y la probabilidad de daños, 3) calcular el daño, expresado como unidades relativas o monetarias tomando en cuenta el producto interno bruto del territorio a estudiar.
	Costeo de impactos del cambio climático (Reino Unido) (Metroeconomica Limited, 2004).	Es una guía desarrollada para el Reino Unido que calcula el costo de los impactos climáticos y explica cómo compararlos con los costos de las medidas de adaptación. Los impactos físicos son convertidos en valores monetarios y luego, después de calcular los costos de las opciones de adaptación, se determinan costos y beneficios.
	Identificación de opciones de adaptación	Es una guía para la identificación y selección de opciones de adaptación que podrían dar respuesta a riesgos climáticos, es una ayuda para la herramienta UKCIP.
	Herramienta de evaluación del riesgo comunitario - Adaptación y medios de vida (CRISTAL) (IISD, 2012).	Es una herramienta que busca ayudar a integrar la reducción del riesgo y la adaptación al cambio climático en proyectos comunitarios. El resultado es una lista de actividades que protegen o mejoran el acceso y la disponibilidad de los recursos que se ven fuertemente afectados por amenazas climáticas.

Fuente: (UNFCCC, 2008).

El Compendio asume como metodología o enfoque, a un marco completo que prescribe todo un proceso para la evaluación de la vulnerabilidad y la adaptación, a la vez que ofrece un amplio enfoque estratégico; puede integrar ciertos métodos y herramientas, por ejemplo, las directrices técnicas del IPCC y las directrices de los NAPAS. Las herramientas, por su parte, se definen como medios o instrumentos con los que se realiza una tarea específica, como las herramientas de decisión (análisis de costo-beneficio, análisis multi-criterio) (UNFCCC, 2008).

De acuerdo con Dogulu & Kentel (2015), los métodos más utilizados para la priorización y selección de medidas son los de Análisis Beneficio Costo, Análisis Costo Efectividad, Análisis Multi- Criterio y juicio de expertos; este último es usualmente usado como parte de otras herramientas de toma de decisiones, y consiste en pedir opiniones a expertos sobre asuntos de interés.

La revisión hecha por Schipper et al (2010) sobre métodos y herramientas para la adaptación al cambio climático, concluye que hay una orientación limitada sobre cómo seleccionar los enfoques más apropiados para una localización específica. Asimismo, la mayoría de los métodos existentes requieren de entrenamiento, facilitadores habilitados, recolección significativa de información y grandes cantidades de recursos.

Además de la revisión de los compendios de métodos, se abordaron trabajos recientes sobre dos asuntos de interés particular: 1) la forma como se incorporan en los modelos las relaciones entre alternativas y 2) los costos.

Sobre las relaciones entre las alternativas: El primer asunto resulta ser clave, esto porque los modelos de decisión tradicionales que se desarrollan con técnicas de análisis multi-criterio pueden sugerir un conjunto de medidas de adaptación a implementar que podrían tener, en su mayoría, altos costos de inversión asociados. Cuando no se consideran las relaciones existentes entre las medidas, ya sea que unas afecten positiva o negativamente el rendimiento de otras, o sean condicionantes o contradictorias de otras; puede ocurrir que no se obtengan la efectividad esperada de las acciones de adaptación. Al respecto de este asunto, se encontraron propuestas que integran la teoría de redes y las técnicas de análisis multi-criterio, como los de Tæiegh et al. (2013) y Champalle et al.

(2015), las cuales resultan ser de particular interés en la formulación del problema de investigación de esta tesis.

Los primeros autores, Taeihagh et al. (2013), identificaron las posibles relaciones que pueden haber entre medidas o políticas en un problema de transporte, dichas relaciones resultan ser claves en el desarrollo de esta tesis y se explican a continuación.

- Precondición (P): cuando se requiere de la implementación previa de una actividad A para que haya una implementación exitosa de B.
- Facilitación (F): cuando la actividad B funcionaría mejor si previamente se hubiera implementado A. Sin embargo, B puede ser implementada.
- Sinergia (S): es un caso especial de facilitación, donde la relación es bidireccional, opera en doble vía.
- Contradicción potencial (CP): cuando hay resultados conflictivos entre dos actividades.
- Contradicción (C): cuando hay estrictamente resultados conflictivos.

Para abordar estas relaciones, Taeihagh et al. (2013) consideraron un modelo para la priorización de alternativas que emplea dos métodos. Con el primero se hizo un análisis multi-criterio que evaluó ocho atributos en las alternativas de decisión: costos, efectividad, tiempo de implementación, tiempo desde la implementación hasta el efecto, tiempo de duración del efecto, complejidad técnica, aceptabilidad pública y complejidad institucional; a partir de este método se obtuvo un orden de priorización de las alternativas. Sin embargo, el método no permite incorporar en el análisis de priorización las relaciones indicadas entre las medidas.

El segundo método corresponde a un análisis de red (con análisis de redes sociales³), donde los nodos son las medidas a implementar en el sector transporte, o las alternativas de decisión, y los vínculos entre los nodos son las relaciones antes mencionadas. Para cada tipo de relaciones se construyó una red y se realizaron mediciones propias del análisis de redes sociales, con base en las cuales se estableció un orden de priorización.

³ Es una técnica para el análisis de estructuras sociales con el uso de redes y teoría de grafos. Las estructuras en red se visualizan en términos de nodos y vínculos (Denny, 2014).

Ambos métodos permitieron obtener un orden de priorización de las medidas. Los cuales fueron comparados y analizados con el fin de establecer un orden de implementación acorde con los resultados obtenidos en los dos métodos.

Este trabajo da un aporte importante respecto a la clasificación y definición de las relaciones, pero presenta limitaciones en la forma de integrarlas con el proceso de decisión multi-criterio, ya que, en principio, este supone independencia entre las alternativas, sumado a esto, hacer una comparación posterior uno a uno de los resultados obtenidos en cada método puede dar lugar a equivocaciones cuando se analiza una cantidad grande de alternativas.

El trabajo realizado por Tæieigh et al. (2013) fue ajustado a un problema de adaptación al cambio climático en Canadá (Champalle et al., 2015), el cual se desarrolló en tres fases: 1) la aplicación de una técnica de análisis multi-criterio, incluyendo los criterios de temporalidad, equidad, sostenibilidad y costos de las medidas; 2) un análisis de red de los cinco tipos de relaciones propuestas por Tæieigh et al (2013) y 3) una lista de opciones priorizadas presentada como diagrama de Gantt en un horizonte temporal. La aplicación conserva el mismo desarrollo antes descrito y propone, además, la implementación de las medidas en un horizonte de tiempo, teniendo en cuenta sus relaciones de precedencia y los tiempos de implementación. Este trabajo presenta la misma limitación indicada para Tæieigh et al (2013) sobre la integración de las relaciones en el proceso de decisión multi-criterio.

Sobre los costos: El segundo asunto de interés en la revisión de literatura realizada para la definición del problema de investigación, fue la forma cómo se abordan los costos en los modelos, especialmente cuando hay recursos limitados para la inversión. Sobresalen en particular los modelos ANP - BOCR (*Analytic Network Process - Benefits, Opportunities, Costs and Risks*) de Saaty (Thomas Saaty & Vargas, 2006), siendo estos una evolución de la técnica de análisis multi-criterio AHP (*Analytic Hierarchy Process*), del mismo autor. Estos modelos evalúan cada componente BOCR para cada alternativa de decisión, teniendo en cuenta que los beneficios y las oportunidades son criterios positivos o favorables a la decisión y los costos o riesgos son negativos o desfavorables. Los resultados de priorización de las alternativas se sintetizan o agregan con una red principal que recoge los resultados de cada componente BOCR. Aún cuando la técnica presenta

avances en tanto permite hacer análisis en red de los criterios de evaluación de la decisión, no permite incorporar las restricciones de presupuesto.

A partir de la revisión de métodos realizada, se concluye que el análisis multi-criterio provee un análisis más completo que los de costo-beneficio o costo-efectividad, ya que evalúa las alternativas respecto a varios criterios de decisión (económicos, ambientales, sociales y otros); que no necesariamente deben estar valorados en una escala monetaria (como los costos y los beneficios), sino que cada criterio es evaluado en la unidad que corresponde, por ejemplo: cantidad de población, número de hectáreas; incluso permite considerar valoraciones cualitativas, como *excelente*, *bueno* o *malo*.

Se percibe como limitación que, si bien el análisis multicriterio permite generar un orden de priorización para n medidas de 1 a n en razón del rendimiento o la valoración de estas respecto a los criterios de decisión, los resultados no corresponden a un paquete óptimo que cumpla con preferencias del decisor y a la vez con restricciones de interdependencia entre las alternativas y de disponibilidad de recursos (un presupuesto dado P).

Por otro lado, los avances en teoría de redes para involucrar las relaciones de interdependencia no están integrados directamente a los modelos de decisión multi-criterio, sino que operan por separado.

1.2 Problema de investigación

El cambio climático está provocando alteraciones en los sistemas naturales, económicos y sociales. Ante esto, hay una necesidad de los gobiernos locales por adaptar o ajustar los territorios a las nuevas condiciones del clima, esto con la implementación de medidas que pueden ser de diverso tipo: estructurales, sociales e institucionales. Las medidas tienen costos de inversión asociados y efectos que pueden ser de corto y largo plazo. En tal sentido, se requieren herramientas de apoyo a la decisión que permitan determinar cómo y qué medidas seleccionar para un territorio específico según sus requerimientos en adaptación y restricciones presupuestales.

La literatura reporta diversos métodos para la selección y priorización de medidas en los procesos de adaptación al cambio climático, no obstante, persisten limitaciones en cuanto a:

- Metodologías con capacidad de considerar restricciones como los recursos locales o las vulnerabilidades específicas de la localización (Dogulu & Kentel, 2015).
- Metodologías que incluyan el carácter multidimensional, intertemporal, multisectorial y multiactor.
- La incorporación de relaciones entre las alternativas como un proceso integrado al modelo de decisión para la priorización y selección, según revisión de los avances logrados y reportados en la revisión de antecedentes de esta tesis (Champalle et al., 2015; Taeihagh et al., 2013).

En tal sentido, se propone plantear un modelo de decisión que permita seleccionar, de un conjunto de n posibles medidas de adaptación al cambio climático, el conjunto óptimo que mejor se acoja a los criterios de decisión y a las restricciones locales de presupuesto, considerando la naturaleza de las relaciones que puede haber entre las alternativas, como precondition, facilitación, sinergia o contradicción.

1.3 Objetivos de investigación

Objetivo general

Proponer un modelo de decisión para la priorización y selección de medidas de adaptación al cambio climático que considere criterios, restricciones de presupuesto y relaciones de interdependencia entre las alternativas.

Objetivos específicos

- Revisar y analizar la literatura de métodos y técnicas de decisión para la selección y priorización de medidas.
- Establecer los criterios de evaluación, las restricciones y las relaciones de interdependencia que son requerimientos del modelo.
- Desarrollar la metodología de priorización y selección.
- Priorizar y seleccionar las medidas de adaptación para un caso seleccionado.

2. Marco conceptual sobre la adaptación al cambio climático

El cambio climático es una alteración del estado del clima que se manifiesta por cambios en el promedio o por la variabilidad de sus propiedades a nivel global, y que persiste por un período extendido en el tiempo, décadas o más. Puede ser ocasionado por procesos internos naturales o por forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra (Agard & Schiper, 2014). La causa dominante del cambio climático observado desde mediados del siglo XX, son las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014b).

Como consecuencia de este fenómeno, se espera que aumente la frecuencia, intensidad y duración de eventos climáticos extremos e hidrometeorológicos, como olas de calor, precipitaciones fuertes, sequías y ciclones tropicales, que en un contexto de vulnerabilidad, pueden aumentar el estrés en los sistemas humanos y naturales y la propensión a los efectos adversos (Lavell et al., 2012).

En aras de hacer frente a los daños que pueden surgir, hay una agenda global para la mitigación y la adaptación al cambio climático. Los conceptos son definidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático – IPCC como sigue:

La **mitigación** se define como la intervención humana para reducir las fuentes o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero (Agard & Schiper, 2014), las acciones están orientadas a sectores económicos como la industria, la minería, la energía, el transporte, entre otros, para disminuir la emisión de gases.

La **adaptación** por su parte, es definida como el “*proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación busca moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas*” (Agard & Schiper, 2014). Adaptarse significa ajustar las acciones humanas, tanto a los efectos ya observados del clima como a los efectos futuros.

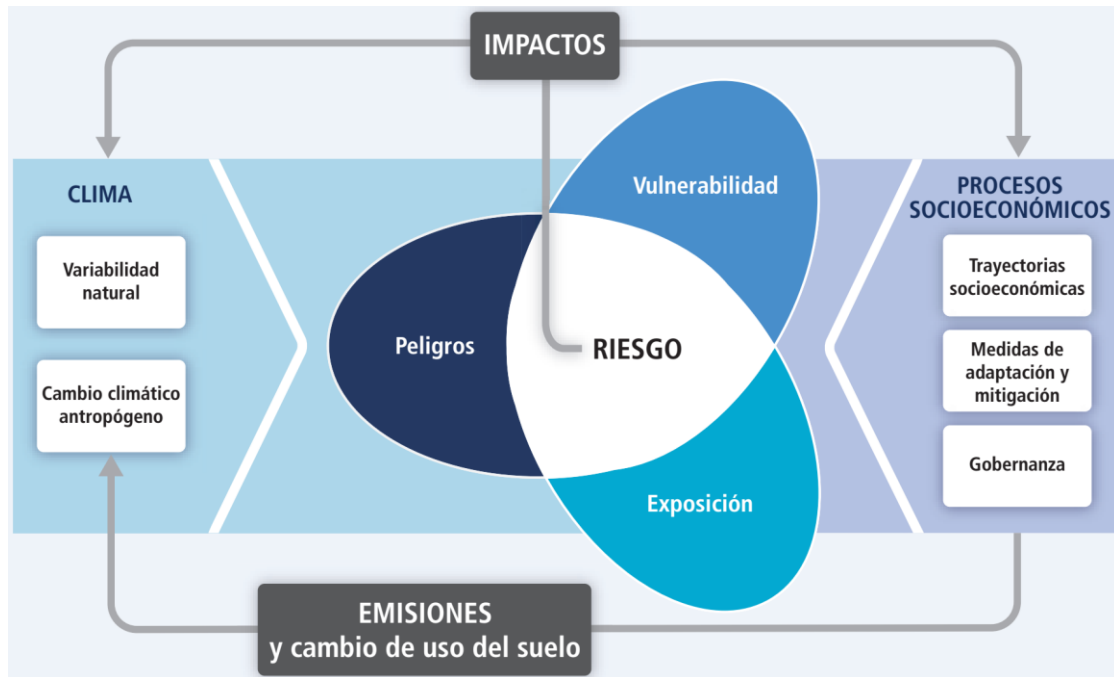
Este capítulo presenta los conceptos básicos relacionados con la adaptación al cambio climático, como la reducción del riesgo, la vulnerabilidad y la capacidad adaptativa, los cuales son importantes para la configuración del modelo de decisión y la adecuada identificación y selección de medidas de adaptación.

2.1 La reducción del riesgo como determinante de la adaptación

De acuerdo con el IPCC, el cambio climático supone riesgos para los sistemas naturales y humanos. Un ejemplo es el riesgo de sufrir daños y pérdidas en áreas urbanas y rurales debido a peligros asociados al clima y a vulnerabilidades relacionadas con la disposición y el diseño de la infraestructura (Oppenheimer et al., 2014). El Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático habla propiamente del riesgo de desastres y sugiere que la reducción y gestión de este puede contribuir a los objetivos y procesos de adaptación. El **riesgo** se define como la probabilidad o el potencial de sufrir alteraciones severas debido a eventos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales de vulnerabilidad, que conducen a efectos adversos humanos, materiales, económicos o ambientales, y que normalmente requieren de una respuesta inmediata (Oppenheimer et al., 2014).

La Figura 2-1 esquematiza el concepto de riesgo y su relación con la vulnerabilidad, la exposición y el peligro. Las definiciones y explicaciones de este aparte se toman de los capítulos 1 y 2 del Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Cardona et al., 2012; Lavell et al., 2012) y del capítulo 19 del Quinto Informe (Oppenheimer et al., 2014).

Figura 2-1: Esquema de la interacción entre el sistema climático, la exposición y la vulnerabilidad en la generación del riesgo.



Fuente: (IPCC, 2014a).

De acuerdo con la Figura 2-1, el sistema climático (con incrementos de temperatura, precipitaciones, tormentas frecuentes) interactúa con los sistemas socioeconómicos y biológicos y genera riesgos de consecuencias particulares o **impactos**, los cuales se definen como los efectos sobre los sistemas naturales y humanos de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, y del cambio climático; se refieren en general a los efectos sobre la vida, los medios de vida, la salud, los ecosistemas, las economías, las sociedades, las culturas, los servicios y la infraestructura (Oppenheimer et al., 2014).

El riesgo se da por la interacción entre los peligros, la vulnerabilidad y la exposición. Los peligros están conexos al clima, mientras que la vulnerabilidad y la exposición están conexos a procesos socioeconómicos. A continuación, se definen los términos relacionados:

- **Peligro (*hazard*):** cuando los eventos extremos o no extremos (como ciclones tropicales, sequías o inundaciones) pueden afectar los sistemas humanos de una forma adversa y asumen la característica de peligro, este se define como el

“acaecimiento potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales”. Se usa el término para denotar el potencial de efectos adversos, no el evento físico por sí mismo (Lavell et al., 2012). Los peligros ocasionados por el sistema climático interactúan con condiciones socioeconómicas para producir el riesgo de impactos por el cambio climático.

- La **exposición** hace referencia a *“la presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente”* (Lavell et al., 2012).

La exposición hace referencia a la ubicación del sistema en un área donde pueden ocurrir eventos peligrosos, si no estuvieran allí, no habría riesgo de desastres. El concepto es comúnmente asociado o confundido con el de vulnerabilidad, sin embargo, son diferentes. Es posible estar expuesto, pero no vulnerable, por ejemplo, si se está ubicado en una zona de llanura aluvial pero se cuenta con los medios suficientes para adecuar la estructura y mitigar la pérdida (Cardona et al., 2012).

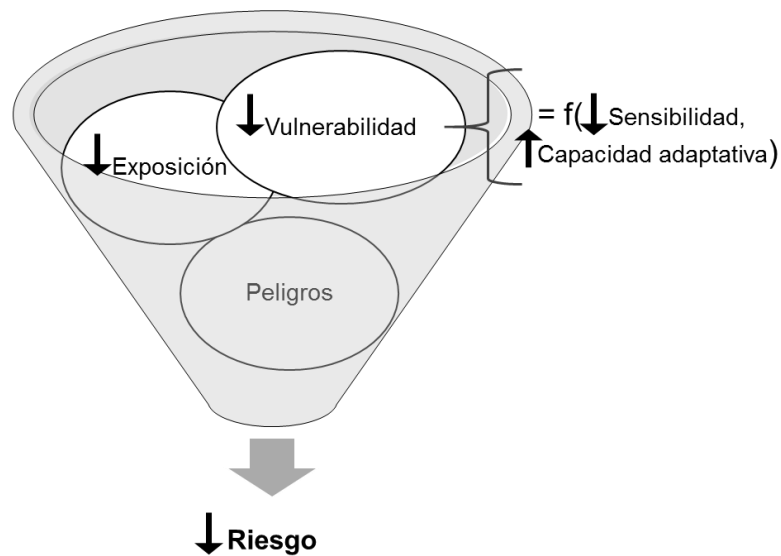
- La **vulnerabilidad** por su parte, se define como la *“propensión o predisposición a ser afectado adversamente”*. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (Lavell et al., 2012). El concepto se amplía en detalle más adelante.

La vulnerabilidad está relacionada con la predisposición, susceptibilidades, fragilidades, debilidades, deficiencias y falta de capacidades, lo cual favorece los efectos adversos en los elementos expuestos. Algunos procesos son motores significativos del riesgo y están particularmente relacionados con la vulnerabilidad, como el crecimiento poblacional, el rápido e inapropiado desarrollo urbano, las presiones financieras internacionales, los aumentos en la desigualdad socioeconómica y las fallas en la gobernanza.

La vulnerabilidad es *multidimensional y diferencial*, es decir, varía en el espacio físico y entre grupos sociales; es *dependiente de la escala* respecto al espacio y las unidades de análisis, como lo individual, comunitario, regional o sistémico; y es *dinámica*, ya que sus características y fuerzas motoras cambian en el tiempo (Vogel & O'Brien, 2004, citado por Cardona et al., 2012).

De los tres conceptos referidos, se concluye que los peligros están asociados al clima y no son controlables, luego, la forma de reducir el riesgo de impactos por el cambio climático es a través de la intervención de las dos componentes socio-económicas que componen el riesgo: la exposición y la vulnerabilidad, ésta última puede ser reducida disminuyendo las condiciones de sensibilidad en el territorio o aumentando la capacidad adaptativa. Siguiendo esta lógica del concepto de riesgo es que se hace la identificación de medidas para la adaptación al cambio climático sujetas a análisis en esta tesis, el cual se ilustra en la Figura 2-2.

Figura 2-2: Esquema orientador para identificación de medidas de adaptación y reducción del riesgo



Fuente: elaboración propia a partir de la revisión de la literatura.

A continuación, se definen los factores causantes de la vulnerabilidad (Cardona et al., 2012):

- La **susceptibilidad/fragilidad** (desde el contexto de la gestión del riesgo) o sensibilidad (desde la adaptación al cambio climático), se define como la predisposición física de seres humanos, infraestructura y ambiente de ser afectados por un fenómeno peligroso debido a la falta de resistencia y la predisposición de la sociedad y los ecosistemas a sufrir daños como consecuencia de las condiciones intrínsecas y de contexto que hacen plausible que dichos sistemas, una vez impactados, colapsen o experimenten mayores daños debido a la influencia de un evento de peligro.
- La **falta de resiliencia** (desde el contexto de la gestión del riesgo) o la falta de capacidad de respuesta y de capacidad adaptativa; siendo las limitaciones existentes en cuando al acceso y a la movilización de recursos de los seres humanos y las instituciones, y la incapacidad para anticipar, adaptarse y responder en la absorción de impactos socio-ecológicos y económicos.

La capacidad adaptativa o adaptabilidad (*adaptive capacity*) es un concepto que se ha usado de forma indistinta con los de capacidad de respuesta y resiliencia de forma frecuente, sin embargo, existen diferencias. Ésta se define como “*la habilidad de un sistema, institución, ser humano u otro organismo, de ajustarse al daño potencial y de tomar ventaja de las oportunidades o de responder a las consecuencias*” (Agard & Schiper, 2014).

La capacidad de respuesta (*coping capacity*), es “*la habilidad de personas, instituciones, organizaciones y sistemas, usando destrezas disponibles, valores, pensamientos, recursos y oportunidades para conducir, liderar y superar condiciones adversas en el corto y mediano plazo*” (Agard & Schiper, 2014). Este término es típicamente usado para referirse a acciones ex-post, mientras que la capacidad adaptativa es normalmente asociada a acciones ex-ante. Esto significa que la capacidad de respuesta es la habilidad de reaccionar y de reducir los efectos adversos de peligros experimentados, mientras que la capacidad adaptativa se refiere a la habilidad de anticiparse y transformar la estructura, el funcionamiento o la organización para sobrevivir mejor a los peligros (Saldaña-Zorrilla, 2007, citado por Cardona et al., 2012), con frecuencia se asume la capacidad de respuesta como parte de la capacidad adaptativa.

La resiliencia por su parte, se define como “*la capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación*” (IPCC, 2014c). Los análisis de esta tesis están orientados al concepto de capacidad adaptativa, no al de resiliencia.

Los impulsores principales de la mejora en la capacidad adaptativa son: una economía integrada, la urbanización, las tecnologías de la información, la atención a los derechos humanos, la capacidad agrícola, las instituciones internacionales sólidas, el acceso a seguros, la esperanza de vida, la salud, el bienestar, las organizaciones comunitarias, las regulaciones en planeación existentes, la buena gobernanza, entre otros (Cardona et al., 2012).

2.2 Enfoques y medidas de adaptación al cambio climático

Las medidas de adaptación al cambio climático son de diversa índole, pueden ser de tipo estructural, social o institucional. Las primeras se basan en infraestructura, tecnología, arreglos ecosistémicos y servicios. El enfoque social contempla medidas de tipo educativo como los programas de formación y sensibilización, o de tipo informativo, como la generación de mapas de amenaza y vulnerabilidad. Este enfoque apunta a la modificación de comportamientos que acrecientan la exposición y vulnerabilidad al riesgo, cuya corrección puede ayudar a evitar eventos desastrosos. El enfoque institucional por su parte, considera normativas, incentivos económicos y programas gubernamentales.

El IPCC sugiere que algunas opciones pueden estar interrelacionadas (Noble et al., 2014), así por ejemplo, las instituciones y la información son pre-requisito para que los sistemas de alerta temprana sean efectivos. La Tabla 2-1 presenta los enfoques de adaptación sugeridos por el IPCC y algunos ejemplos de medidas según la categoría.

Tabla 2-1: Enfoques de adaptación al cambio climático y ejemplos

Enfoque estructural o físico	Infraestructura - AbInfra*	Estructuras de protección costera, transporte e infraestructura para adaptación, casas flotantes.
	Ecosistemas - AbEcos*	Restauración ecológica, reforestación, infraestructura verde, corredores ecológicos.
	Tecnología - AbTecn*	Técnicas genéticas, irrigación eficiente, sistemas de alerta temprana, tecnologías para energía renovable.
	Servicios - AbServ*	Servicios municipales de agua y alcantarillado, programas de vacunación, servicios de salud.
Enfoque social	Educativo - AbEduc*	Investigación participativa y aprendizaje social, plataformas de aprendizaje, conferencias internacionales.
	Informativo - AbInfo*	Mapas de amenaza o vulnerabilidad, sensores de monitoreo, escenarios climáticos.
	Actitudinal/comportamental - AbComp*	Planes de evacuación, adaptación de viviendas, conservación de agua y de suelos, diversificación de cultivos, cambio en prácticas de agricultura y ganadería.
Enfoque institucional	Económico - AbEcon*	Incentivos financieros y exclusión de impuestos, pago por servicios ambientales, microfinanzas, fondos de contingencia.
	Leyes y regulaciones - AbLey*	Leyes de zonificación, estándares de construcción, regulación del consumo de agua, protección de áreas de conservación.
	Políticas y programas gubernamentales - AbPGob*	Planes de adaptación nacionales y locales, programas de gestión del agua, planes sectoriales, gestión de zonas costeras

Fuente: (Noble et al., 2014).

*: la sigla es utilizada en este documento para identificar el enfoque en el que se basa una medida, por ejemplo, la restauración ecológica es una medida de adaptación basada en ecosistemas (AbEcos), que hace parte del enfoque estructural.

De acuerdo con el IPCC, la selección y priorización de opciones de adaptación es importante porque no todas las opciones son posibles de implementar debido a limitaciones como la insuficiencia de recursos, las capacidades y la autoridad. Adicionalmente, algunas opciones pueden ser maladaptativas (Noble et al., 2014, p. 849).

La **maladaptación** se presenta cuando la intervención sobre una ubicación o sector puede aumentar la vulnerabilidad en otro, o aumentar la vulnerabilidad del grupo objetivo con el cambio climático futuro. Surge cuando las acciones de adaptación son mal planificadas o cuando son deliberadas y se pone mayor énfasis en los resultados de corto plazo que en la amenazas de más largo plazo; o cuando no se consideran las interacciones previstas (Noble et al., 2014, p. 837).

Tomando como base los diferentes enfoques de adaptación, se identifican las medidas que son abordadas en los análisis de esta tesis y en la propuesta de priorización y selección, algunas de las cuales están orientadas a reducir la vulnerabilidad o la exposición o a aumentar la capacidad adaptativa.

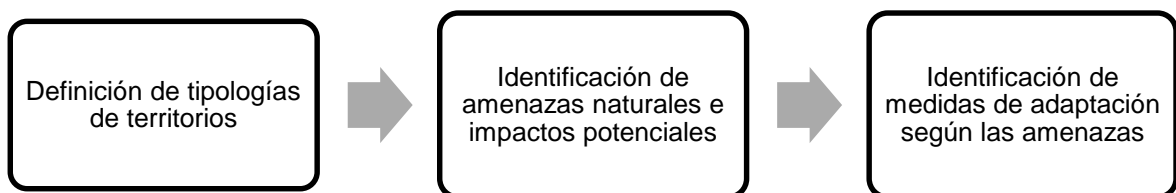
3. Metodología

Este capítulo describe las dos etapas metodológicas seguidas para el desarrollo de la tesis. La primera etapa corresponde a un análisis territorial para la identificación de amenazas, impactos y medidas que configuran el problema de decisión. La segunda etapa es de formulación y desarrollo del modelo, para tal propósito, se identificaron los requerimientos del problema y se seleccionaron los métodos de modelización más convenientes.

3.1 Etapa 1: análisis territorial

Teniendo en cuenta que la literatura reporta una orientación limitada sobre cómo seleccionar los enfoques de adaptación más apropiados para una localización específica (Schipper et al., 2010), se sugiere hacer en principio, una categorización del territorio que permita identificar las amenazas naturales que podrían presentarse en un territorio, identificando sus respectivos daños o impactos. Con base en esto, se procede a identificar las medidas que responden a las necesidades de adaptación. La Figura 3-1 describe la ruta metodológica sugerida para un análisis territorial.

Figura 3-1: Proceso metodológico para el análisis territorial



Fuente: Adaptación de UN & MADS (2015).

3.1.1 Definición de tipologías de territorios

Tomando como base la metodología empleada para el desarrollo de un juego interactivo sobre adaptación al cambio climático⁴ (UN & MADS, 2015), se presenta una tipología de territorios genérica para establecer necesidades de adaptación, la cual fue propuesta a partir del criterio de expertos. Se definieron cuatro tipologías de territorios y tres configuraciones básicas.

Las **tipologías de territorio** hacen referencia a la forma del paisaje, siendo las siguientes:

- **Valle y planicie aluvial:** territorio llano, sin presencia de zonas montañosas o de ladera, con zonas inundables, generalmente adyacentes a los ríos, sin importar su altura sobre el nivel del mar.
- **Costa:** entendida esta zona como la *“franja localizada entre el mar abierto y la superficie terrestre, de constante transformación y originada por la gran actividad entre los procesos terrestres, marinos y atmosféricos como las corrientes marinas, las mareas, el oleaje, la abrasión, el viento, flujo de ríos en cuerpos semi-cerrados y las fluctuaciones del nivel del mar”* (UNAM, 2014).
- **Páramo-alta montaña:** corresponde a localizaciones en el rango comprendido entre los 2.800 y 4.700 msnm, presentes principalmente a lo largo de las tres cordilleras y en sistemas montañosos independientes como la Sierra Nevada de Santa Marta. En el sistema de alta montaña se encuentran ecosistemas como: nieves perpetuas, superpáramo, páramo y bosque altoandino; donde es característico una alta humedad durante 9 a 12 meses al año y una variación de temperatura diaria en la que la alta radiación solar del día es seguida por noches extremadamente frías (FCM & KAS, 2013).
- **Ladera:** hace alusión al terreno de montaña, con un rango de menor pendiente y altura que el del sistema de alta montaña. Predominan las pendientes de inclinación en la formación del terreno. Clasifican en esta tipología ciudades de la región andina como Manizales y Medellín.

⁴ Proyecto de investigación realizado por Convenio Interadministrativo entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Universidad Nacional de Colombia para el Proyecto de *Desarrollo de Herramientas de Educación y Formación para la implementación de la Estrategia de Educación, Formación y Sensibilización a Públicos sobre Cambio Climático en 2015*. La autora y los docentes tutores tuvieron participación en la realización de este proyecto.

Las **configuraciones del territorio** son:

- **Ciudad:** se asume la configuración de “gran ciudad”, con equipamientos de servicios educativos, comerciales y de salud, como universidades, bancos, clínicas, sistemas de transporte masivo, con una dotación de servicios públicos esenciales como acueducto, alcantarillado, energía eléctrica y disposición de residuos.
- **Pueblo:** se consideran aquí las cabeceras municipales urbanas que no son grandes ciudades, cuya centralidad principal está representada por el parque o la plaza principal y cuyos terrenos circundantes tienen baja densidad de edificios de altura.
- **Rural:** siendo la configuración de área rural o resto municipal que define el DANE, caracterizado por la “*disposición dispersa de viviendas y explotaciones agropecuarias existentes en ella. No cuenta con un trazado o nomenclatura de calles, carreteras, avenidas, y demás. Tampoco dispone, por lo general, de servicios públicos y otro tipo de facilidades propias de las áreas urbanas*” (DANE, n.d.).

La combinación de las tipologías y de las configuraciones del territorio da como resultado 12 posibles categorizaciones del territorio, tal como se presenta en la Tabla 3-1, de las cuales se excluyó la combinación páramo-ciudad, en tanto los páramos tienden a ser suelos de conservación que no presentan la configuración propia de las grandes urbes.

Tabla 3-1: Propuesta de categorización de territorios

Territorio	Configuración		
	Ciudad	Pueblo	Rural
Ladera	✓	✓	✓
Valle y planicie aluvial	✓	✓	✓
Costa	✓	✓	✓
Páramo – alta montaña	X	✓	✓

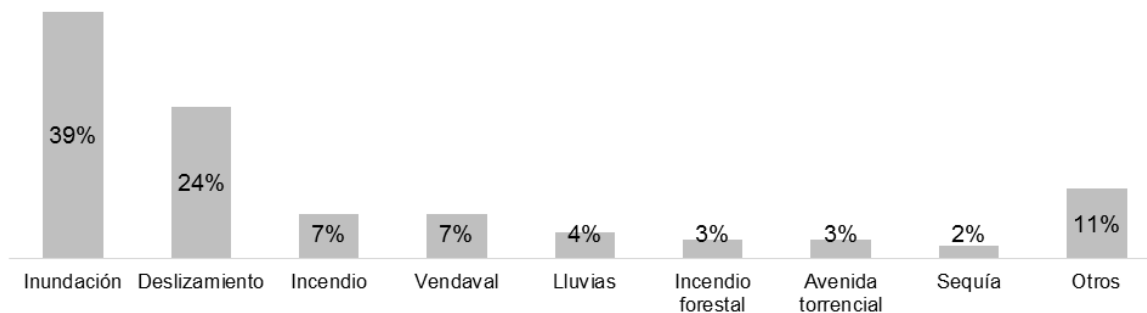
Fuente: (UN & MADS, 2015).

Según el tipo de territorio, se identifican las amenazas naturales que pueden ocurrir, así, por ejemplo, las zonas de valle y planicie aluvial pueden tener una susceptibilidad mayor a inundaciones que las zonas de ladera. A continuación, se mencionan algunas de las amenazas naturales que ocurren según el tipo de territorio.

3.1.2 Identificación de amenazas y de impactos potenciales según el territorio

El registro de desastres presentados en Colombia entre los años 1970-2007 indica que hubo una mayor ocurrencia de inundaciones, deslizamientos e incendios en dicho período, con una representación del 39%, 24% y 7% respectivamente, de un total de 23.843 eventos registrados en el período mencionado. La Figura 3-2 relaciona los eventos ocurridos (Aguilar & Bedoya, 2008).

Figura 3-2: Eventos climáticos desastrosos y cantidad de registros, Colombia 1970-2007



Fuente: Adaptación de Aguilar & Bedoya (2008).

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR, 2009) define un desastre como “una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes, al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales, que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos”; asimismo, es asumido como “el resultado de la combinación de la exposición a una amenaza, las condiciones de vulnerabilidad presentes, y capacidades o medidas insuficientes para reducir o hacer frente a las posibles consecuencias negativas”.

Tomando en consideración los eventos desastrosos de mayor ocurrencia, la Tabla 3-2 sugiere, según criterio experto, qué amenazas podrían presentarse con mayor probabilidad en las cuatro tipologías de territorio indicadas en la Sección 3.1.1. Así, por ejemplo, un territorio de ladera puede verse afectado en mayor medida por avenidas torrenciales, movimientos en masa, incendios forestales, temperaturas extremas de calor, sequías y

vendavales; mientras que un territorio costero puede verse afectado por el ascenso del nivel del mar, inundaciones costeras, vendavales, sequías y otros. Si bien estas amenazas naturales se dan debido a la variabilidad natural del clima, se espera que el cambio climático aumente drásticamente su frecuencia, intensidad y duración.

Tabla 3-2: Listado de amenazas según la tipología del territorio

		Amenaza									
		Inundación lenta	Avenida torrencial	Movimiento en masa	Incendio forestal	Temperatura ext. (calor)	Temperatura ext. (helada)	Sequía	Vendaval	Ascenso del nivel del mar	Inundación costera
Territorio	Ladera		x	x	x	x		x	x		
	Valle	x			x	x		x	x		
	Costa				x	x		x	x	x	x
	Alta montaña			x	x	x	x	x	x		

Fuente: (UN & MADS, 2015)

Luego de identificar las amenazas que ocurren en el territorio, se determinan los daños o **impactos** que ocasionan, para efectos de esta tesis y del diseño del Juego Interactivo Aventura Climática (UN & MADS, 2015), se identificaron impactos en las dimensiones de infraestructura, ambiente, economía y sociedad. La Tabla 3-3 indica con una X algunos de los impactos asociados a cinco amenazas naturales, así por ejemplo, en la dimensión de infraestructura, pueden haber daños en edificaciones causados por inundaciones, movimientos en masa, incendios forestales y/o vendavales. Asimismo, algunos impactos pueden estar relacionados con otros, se indican con flechas las relaciones de causalidad encontradas.

Tabla 3-3: Identificación de impactos según la amenaza

Dimensión	Impacto	Amenaza natural				
		I	M	IF	S	V
Infraestructura	Daños estructurales en edificaciones	x	x	x		x
	Daños y obstrucciones en vías de transporte	x	x			
	Daños en servicios de electricidad, agua, comunicaciones, alcantarillado y manejo de desechos sólidos	x	x	x		x
Ambiente	Aguas residuales en vías	x				
	Contaminación de fuentes hídricas como pozos abiertos o fuentes de agua subterránea	x	x			
	Reducción de la calidad del agua				x	
	Erosión de tierras/ríos/quebradas	x			x	
	Pérdida de flora y fauna/Destrucción de ecosistemas			x	x	x
	Deterioro del suelo, susceptibilidad a la erosión			x		
	Alteración del microclima por menor cantidad de plantas que retengan oxígeno.			x		
Incremento del efecto invernadero en la atmósfera terrestre por humo producto de la combustión.			x			
Economía	Pérdida de producción agrícola/forestal/pesquera		x	x	x	x
	Obstaculización del paso de vehículos de carga y otros		x			
	Aumento de precios de la energía				x	
	Aumento de los costos del agua				x	
	Pérdida de servicios ecosistémicos				x	
	Pérdida de elementos del sistema productivo (máquina de caña, trapiche...)			x		
	Cierre temporal de comercio/industria/negocios/servicios	x				
Sociedad	Muertes y/o lesiones en la población	x	x	x		x
	Desempleo rural y disminución de ingresos de los campesinos		x	x	x	
	Inseguridad del agua para consumo humano				x	
	Inseguridad alimentaria y deterioro del estado nutricional				x	
	Proliferación de microorganismos y enfermedades	x				

Fuente: (UN & MADS, 2015)

S: Sequías, I: inundaciones, M: movimientos en masa, V: vendavales, IF: incendios forestales

3.1.3 Identificación de medidas de adaptación

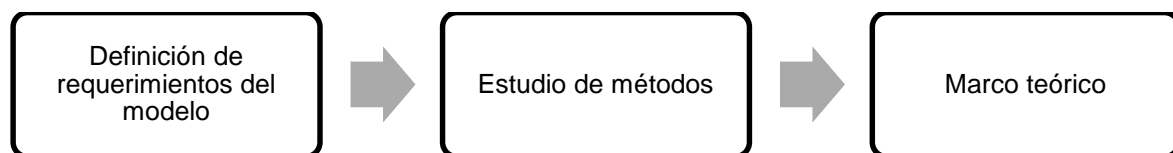
Las medidas a abordar en los análisis de esta tesis fueron previamente identificadas por un equipo interdisciplinario de expertos para la construcción del videojuego interactivo antes mencionado. El Anexo A presenta el conjunto de medidas listadas para las amenazas naturales a considerar en esta tesis, según los siguientes lineamientos:

- Las medidas se enmarcan dentro de alguno de los enfoques de adaptación referidos en la Tabla 2-1 (pág. 24): estructural, social o institucional.
- Buscan reducir alguno los componentes que construyen el riesgo (vulnerabilidad o exposición), que son abordados en el Capítulo 2. La relación de las medidas con el componente mencionado se indica en la tabla del Anexo A.
- Las medidas están orientadas a fenómenos propios de variabilidad climática que, en escenarios de acentuación del cambio climático, pueden aumentar su frecuencia, intensidad y duración.

3.2 Etapa 2: formulación e implementación de estrategias de modelización

Luego de identificar los impactos que se deberían reducir con la escogencia de las medidas de adaptación y de obtener el conjunto de medidas sujetas a análisis, se siguió el proceso que describe la Figura 3-3 para la Etapa 2 de formulación e implementación de la estrategia de modelización. Primero se plantearon los requerimientos y objetivos del modelo, con base en esto se estudiaron y seleccionaron los métodos y las herramientas a emplear.

Figura 3-3: Proceso metodológico para la formulación del modelo



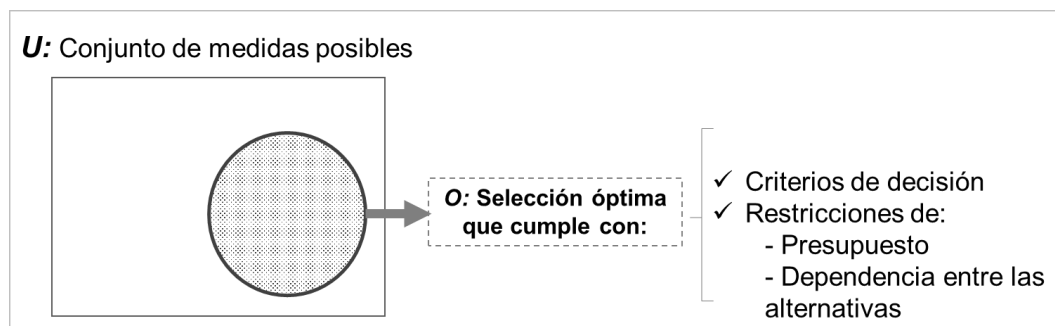
Fuente: elaboración propia.

3.2.1 Definición de requerimientos del modelo de decisión

Esta sección lista los requisitos del modelo que se desea configurar. Con base en esto se estudia en la Sección 3.2.2 los métodos existentes. El Capítulo 4 desarrolla en detalle la construcción del modelo de decisión que se propone para la selección de medidas de adaptación al cambio climático.

Teniendo como base el conjunto U de todas las posibles medidas de adaptación a implementar, que pueden ser de tipo estructural, social e institucional, se espera obtener una selección óptima de medidas O , que cumpla con 1) criterios o preferencias de un decisor sobre las dimensiones a intervenir para la reducción de impactos y 2) restricciones presupuestales y de dependencia entre las alternativas. Lo anterior se esquematiza en la Figura 3-4.

Figura 3-4: Requerimientos del modelo de decisión



Fuente: elaboración propia.

Las medidas de adaptación reportan diferentes niveles de efectividad según sea el corto o largo plazo, tienen costos asociados y favorecen unas dimensiones en detrimento de otras. Se busca que el modelo de decisión permita obtener la selección óptima de medidas que cumple con los requisitos del decisor.

▪ Criterios de decisión del modelo

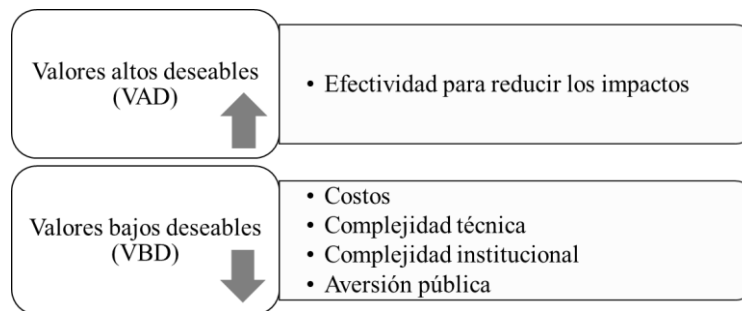
De acuerdo con revisión de literatura de Dogulu & Kentel (2015), algunos de los criterios más ampliamente utilizados para la priorización de medidas de adaptación son los siguientes: 1) beneficios y co-beneficios, 2) costos, 3) sostenibilidad, 4) flexibilidad, 5) efectividad, 6) tiempo de planeación e implementación 7) tiempo que tomará que la medida sea efectiva, 8) viabilidad técnica, 9) barreras a la implementación, 10) equidad, 11)

robustez ,12) aceptación social, 13) adaptación autónoma (como generación de conciencia y provisión de información), 14) tipo de medida (si es de infraestructura, tecnológica, informacional, comportamental, entre otras); 15) impactos internos y externos.

Taeihagh et al. (2013) consideran: 1) costos, 2) efectividad, 3) tiempo de implementación, 4) tiempo desde la implementación hasta el efecto, 5) tiempo de duración del efecto, 6) complejidad técnica, 7) aceptabilidad pública y 8) complejidad institucional. Champalle et al. (2015) por su parte, incluyen en la evaluación de criterios: 1) temporalidad, 2) equidad, 3) sostenibilidad y 4) costos de las medidas.

La Figura 3-5 refiere los cinco criterios de análisis elegidos para la elaboración del modelo, siendo cinco de los ocho considerados por Taeihagh et al. (2013). Se eligieron criterios favorables y desfavorables para la decisión; y que a la vez hubiera mixtura de escalas cualitativas y cuantitativas en el modelo a configurar. El criterio de *Efectividad para reducir los impactos* es favorable a la decisión, por lo cual los valores altos son deseables (VAD), es decir, entre más altos son los valores de efectividad dados a una medida, mucho mayor es su preferencia. Los cuatro criterios restantes son desfavorables, por lo cual es deseable que tengan valores bajos (VBD). En lo que respecta a las escalas de valoración, los *costos* son valorados de forma cuantitativa, mientras que la *complejidad técnica*, la *complejidad institucional* y la *aversión social*, son valoradas en escalas cualitativas.

Figura 3-5: Criterios de análisis del proceso de priorización y selección



Fuente: elaboración propia

- Efectividad para la reducción de impactos

Según la revisión conceptual referida en el Capítulo 2, la adaptación está orientada a reducir o mitigar los impactos ocasionados por el riesgo climático. En este sentido, se hizo

una valoración de la efectividad de las medidas para reducir los impactos identificados en las dimensiones de infraestructura, ambiente, economía y sociedad (Tabla 3-3). Se encontró que, si bien algunas medidas son efectivas para reducir impactos, también pueden acrecentar otros, situación que coincide con el fenómeno de maladaptación. Este se presenta cuando la intervención sobre una ubicación o sector aumenta la vulnerabilidad en otro (Noble et al., 2014, p. 837). Teniendo en cuenta lo anterior, se empleó la siguiente escala de valoración para la efectividad:

- **Una escala numérica positiva de 1 a 10** para valorar la reducción de los impactos, donde los valores cercanos a 10 reportan una efectividad alta de la medida.
- **Una escala numérica negativa de -1 a -10** para valorar la intensificación del impacto causado por la medida, donde los valores cercanos a -10 refieren un empeoramiento alto del impacto con la implementación de la medida. Si la medida no reportaba una efectividad positiva o negativa tenía un valor de cero.

La valoración de la efectividad de la medida se hizo considerando el corto y largo plazo⁵, así por ejemplo, como se aprecia en el Anexo B, la medida *1S_Implementación de estructuras para recolección y almacenamiento y /o circulación de agua*, orientada a la amenaza de sequía tuvo una valoración respecto al impacto ambiental *Erosión de tierras* de 0, en el corto plazo, y de -1 en el largo plazo, valorado para el territorio de ladera – pueblo (la ampliación del caso de aplicación se amplía en el Capítulo 5); esto quiere decir que en el corto plazo no causa ningún efecto, pero en el largo plazo, en vez de mitigar o reducir el impacto, lo puede aumentar de forma leve.

Las valoraciones se hicieron teniendo en cuenta el tipo de territorio (según la caracterización de tipología y configuración) y a partir de criterio experto⁶. Los propósitos

⁵ **Corto plazo (cp):** menor a los próximos 7 años. **Largo plazo (lp):** después de los próximos 7 años. Los plazos se establecen como variable de prueba del modelo. Para la replicación del mismo se recomienda definir los plazos que sean convenientes para el territorio según el criterio de expertos.

⁶ La autora agradece al profesor Jaime Ignacio Vélez Upegui del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por

de esta tesis de Maestría están orientados a proponer la estructura de un modelo de decisión para la selección de medidas de adaptación al cambio climático, para tal efecto se consideran valoraciones de prueba de las medidas, las cuales fueron realizadas con el criterio de un solo experto. La replicación de la propuesta metodológica para un caso real, debería recoger valoraciones de las medidas respecto a los criterios a partir del criterio de varios expertos.

- Costos

Los costos son asumidos como criterio de decisión en los modelos, es decir, a menores costos mayor preferencia puede tener una medida para ser elegida o priorizada. Sin embargo, el problema de investigación de esta tesis apunta a tratar los costos en el marco de un presupuesto o de unos recursos de inversión limitados, que opera como restricción dentro del modelo de decisión.

En el proceso de valoración de las medidas respecto a este criterio, no se consideraron los costos de oportunidad asociados. Así, por ejemplo, “evitar la tala de árboles nativos”, se asume como una medida comportamental que surge de motivaciones del individuo (\$0), que son promovidas o reforzadas con programas de educación. No se asume el costo de oportunidad asociado a no talar para fines comerciales.

De otro lado, los costos considerados en el modelo no corresponden a estimativos reales. Para cada medida se estableció una escala simbólica relativa en el rango de \$0-\$100 que pudiera ser introducido en el modelo. El valor máximo asignado dentro de este rango fue para la medida de “seguro de cosechas y cubrimiento de daños según riesgo climático”, con \$70. Para una replicación del modelo a un caso real, se debe hacer la estimación aproximada del costo de las medidas. Cabe tener en cuenta que el análisis multi-criterio permite manipular rangos de valores, los cuales resultan ser muy convenientes en medidas cuya estimación de costos tiene altos niveles de incertidumbre.

su asesoría para la identificación, comprensión y valoración de los impactos, como parte del proceso de diseño del videojuego Aventura Climática.

- Complejidad técnica

Asumida como la dificultad para el desarrollo técnico u operativo de la medida, ya sea por baja capacidad tecnológica o de conocimiento.

- Complejidad institucional

Entendida como la dificultad en la gestión de políticas, iniciativas o planes gubernamentales e institucionales debido a intereses políticos u otros.

- Aversión social

Entendida como el rechazo o la poca aceptabilidad de una medida por parte de la población civil.

Estos últimos tres criterios se asumen como posibles riesgos en la implementación y son valorados con una escala cualitativa que considera las siguientes categorías: *Muy baja – Baja – Moderada – Alta y Muy alta.*

▪ Restricciones del modelo

El problema de decisión supone restricciones respecto a las relaciones entre las alternativas de decisión y los recursos locales disponibles (presupuesto **P**). Para el primer conjunto de restricciones se consideraron las relaciones de dependencia identificadas por Tæieigh et al. (2013), las cuales se indican a continuación:

- **Precondición (P):** cuando se requiere de la implementación previa de una actividad A para que haya una implementación exitosa de B.
- **Facilitación (F):** cuando la actividad B funcionaría mejor si previamente se hubiera implementado A. Sin embargo, B puede ser implementada.
- **Sinergia (S):** es un caso especial de facilitación, donde la relación es bidireccional, opera en doble vía.
- **Contradicción potencial (CP):** cuando hay resultados conflictivos entre dos actividades.
- **Contradicción (C):** cuando hay estrictamente resultados conflictivos.

La formulación matemática de estas relaciones en el modelo de decisión (la cual se amplía en detalle en el Capítulo 4), permite obtener una selección óptima que potencia el funcionamiento sistémico o en red de las medidas, teniendo en cuenta que, para el adecuado funcionamiento de algunas, se requiere de la implementación previa de otra; de lo contrario podría no tenerse los resultados esperados. Asimismo, hay alternativas que resultan ser excluyentes, esto quiere decir que se hace una u otra, si se hacen ambas, se puede incurrir en pérdidas económicas o disminuir la efectividad deseada para la reducción del riesgo.

Respecto a la restricción de presupuesto, Measham et al. (2011) refieren que los procesos de adaptación se ven limitados por disponibilidad de recursos o capacidad financiera, en tal sentido, es de interés formular un modelo de decisión que permita seleccionar las medidas que optimizan un presupuesto dado *P*.

- **Anotación adicional: gravedad de los impactos según las amenazas y la tipología del territorio**

Además de los cinco criterios de decisión y las restricciones expuestas, se tiene la presunción de que algunas amenazas tienen un mayor grado de gravedad respecto a la intensidad de ciertos impactos, y, en consecuencia, las medidas asociadas a dichas amenazas deberían tener una mayor preferencia dentro del modelo a configurar.

En el territorio de ladera, por ejemplo, se pueden presentar las amenazas de sequía, vendaval, movimiento en masa e incendio forestal, cada una de las cuales reporta impactos o daños en cuanto a la infraestructura, el ambiente, la economía y la sociedad. Sobre esta última dimensión en específico, la Tabla 3-4 muestra que respecto al desempleo rural, el grado de impacto causado por una sequía en un territorio de pueblo en ladera puede ser mucho mayor que el causado por un vendaval, que según la valoración, se asume como nulo; asimismo, respecto a las muertes y/o lesiones en la población, los movimientos en masa presentan un nivel de gravedad mayor que los vendavales o los incendios forestales.

Tabla 3-4: Valoración de la gravedad de las amenazas respecto a la generación de impactos en la dimensión social (territorio de ladera en pueblo)

		Impactos en la dimensión social			
		Muertes y/o lesiones en la población	Desempleo rural y disminución de ingresos de los campesinos	Inseguridad del agua para consumo humano	Inseguridad alimentaria y deterioro del estado nutricional
Amenaza	Sequía	0	10	10	10
	Vendaval	3	0	0	0
	Movimiento en masa	8	5	0	0
	Incendio forestal	4	4	0	0

Fuente: (UN & MADS, 2015).

Estas valoraciones de la gravedad fueron realizadas para cada una de las amenazas según el territorio, con apoyo experto⁷. La escala de valoración fue entre 0 y 10 siendo 0 un nivel de gravedad nulo de la amenaza respecto al impacto y 10 el nivel máximo percibido. La valoración completa de la gravedad de las amenazas para el territorio de estudio en el caso de aplicación se presenta en el Anexo C.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo de decisión a proponer busca que los resultados de selección y priorización estén orientados a:

- Medidas que permitan reducir los impactos asociados a eventos climáticos con mayor posibilidad de ocurrencia en el territorio en cuestión.
- Medidas que permitan reducir los impactos asociados a los eventos según su nivel de gravedad sobre el territorio.

3.2.2 Estudio de métodos y herramientas para priorización y selección de medidas

De acuerdo con la revisión bibliográfica de métodos y herramientas para la selección y priorización de medidas referida en la Tabla 1-1 (pág. 9), existe una amplia variedad de enfoques que han sido considerados en la planeación de la adaptación al cambio climático.

⁷ La autora agradece al profesor Jaime Ignacio Vélez Upegui del Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas – Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por su asesoría para la identificación, comprensión y valoración de los impactos, como parte del proceso de diseño del videojuego Aventura Climática.

En lo que respecta a la fase de priorización y selección de medidas, los métodos de toma de decisiones empleados tradicionalmente son los de Análisis Costo-Beneficio, Análisis Costo- Efectividad y Análisis Multi-Criterio. Recientemente se han explorado en la literatura los denominados enfoques robustos, como el análisis de portafolio, el análisis de opciones reales, la toma de decisiones robustas y las opciones de poco o no arrepentimiento (Dittrich, Wreford, & Moran, 2016). A continuación, se amplían los enfoques mencionados.

- **Análisis costo-beneficio y costo-efectividad**

En el análisis costo – beneficio, los costos y beneficios son monetizados, a partir de estos se calcula el valor presente neto de los beneficios netos (beneficios – costos) con y sin adaptación.

El análisis costo – efectividad por su parte, se emplea cuando es difícil o controversial monetizar los beneficios, como el valor de vidas o de terrenos. Se pueden minimizar los costos o maximizar la efectividad, para tal fin, se comparan alternativas mutuamente exclusivas en términos de los ratios entre sus costos y un valor cuantificado, no monetizado, con el fin de elegir la opción de mejor rendimiento (Dittrich et al., 2016).

- **Análisis de decisiones multi-criterio**

Estas técnicas hacen una combinación de indicadores cuantitativos y cualitativos (monetizados o no monetizados), a partir de la cual se obtiene un ranking de alternativas (Dittrich et al., 2016). Se distinguen tres enfoques que son referidos a continuación (Ishizaka & Nemery, 2013):

- **Enfoque de agregación completa (o escuela americana):** *“una valoración es evaluada para cada criterio y luego es sintetizada en una puntuación global. Este enfoque asume puntuaciones compensables, una mala puntuación en un criterio es compensada por una buena en otro”* (traducción del autor).
- **Enfoque outranking (o escuela francesa):** *“una mala puntuación puede no ser compensada por una buena. El orden de las opciones puede ser parcial porque la noción de incomparabilidad es permitida. Dos opciones podrían tener la misma puntuación, pero su comportamiento ser diferente y consecuentemente incomparable”* (traducción del autor).

- **Enfoque de meta, aspiración o nivel de referencia:** “este enfoque define un objetivo en cada criterio y, a continuación, se identifican las opciones más cercanas a la meta ideal o nivel de referencia” (traducción del autor).

Dichos enfoques abordan los métodos que son referidos en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Métodos de Análisis Multi-Criterio

Enfoque	Métodos
Agregación	Proceso de Análisis Jerárquico (<i>Analytic hierarchy process – AHP</i>)
	Proceso de Análisis en Red (<i>Analytic network process - ANP</i>)
	Teoría de utilidad multi-atributo (<i>Multi-attribute utility theory – MAUT</i>)
	MACBETH
Outranking	PROMETHEE
	ELECTRE
Meta, aspiración o nivel de referencia	TOPSIS
	Programación por metas
	Análisis Envolvente de Datos

Fuente: adaptación a partir de Ishizaka & Nemery (2013).

- **Enfoques robustos**

Los métodos acá comprendidos involucran el análisis de incertidumbre. Se refieren en este aparte las conclusiones de Dittrich et al. (2016) en su estudio sobre los enfoques para la toma de decisiones en adaptación al cambio climático.

- **Análisis de portafolio:** es similar a la reducción de riesgo por diversificación en un portafolio de inversiones. Una canasta de opciones de adaptación es determinada maximizando los retornos de la adaptación dado un nivel de riesgo de un decisor, alterntivamente, el riesgo es minimizado en todas las opciones de adaptación en diferentes escenarios de cambio climático. Este tipo de análisis requiere de suposiciones de las probabilidades de los posibles escenarios de cambio climático y de sus impactos asociados. El método sólo funciona si los retornos de las opciones de adaptación están negativamente correlacionadas y si su correlación está bien especificada en un horizonte de tiempo. Hay un número limitado de aplicaciones, se han enfocado principalmente en el área de conservación.

- **Análisis de opciones reales:** este método tiene su origen en la economía financiera. Toma como base un parámetro incierto de cambio climático, puede ser la lluvia, la temperatura o el aumento del nivel del mar. Basa su análisis a partir de un árbol de decisiones, cuyas ramas corresponden a las estrategias sobre las cuales decidir para un horizonte de tiempo de 30 años, la elección óptima en el segundo período depende de la elección hecha para el primer período, y para tal fin, se requiere de la asignación de probabilidades en las diferentes rutas del árbol de decisión.
- **Toma de decisiones robustas:** el enfoque identifica las medidas que tienen poca sensibilidad a los diferentes escenarios de cambio climático. Se emplean modelos de simulación para crear conjuntos de gran tamaño (con miles o millones de corridas) de múltiples escenarios futuros plausibles de los parámetros. La aplicación completa de este método es muy intensiva en información y recursos.

Tomando como base el estudio de Dittrich et al. (2016), se eligió el enfoque de análisis multi-criterio para explorar el problema de priorización y selección de medidas de adaptación, esto porque: 1) los análisis de costo-beneficio y costo-efectividad no permiten incorporar preferencias de decisores sobre ciertos criterios de decisión y requieren monetizar los costos; 2) los métodos robustos por su parte, suponen probabilidades para diferentes escenarios de cambio climático que no se tienen al alcance y que no hacen parte del problema de decisión propuesto; 3) los métodos de *outranking* demandan de numerosos parámetros que, adaptados a un problema de decisión con una alta cantidad de alternativas y sub-criterios asociados al criterio de efectividad, requerirían de un esfuerzo computacional alto.

Adicionalmente, el estudio de la literatura y la revisión de casos de aplicación de técnicas multi-criterio indican una amplia utilización de los métodos AHP y ANP para la priorización y selección de medidas⁸. Desde el año 2003 se ha visto un aumento notorio en la aplicación de estas técnicas en problemas de priorización y selección de alternativas, relacionados

⁸ Búsqueda realizada el 8 de noviembre de 2016 en Scopus, con la ecuación de búsqueda: (TITLE-ABS-KEY ("analytic hierarchy process*" OR "analytic network process*") AND TITLE-ABS-KEY (prioritizing OR prioritization OR prioritisation OR rank OR ranking OR evaluating OR evaluation OR choosing OR selection)), 10.608 resultados encontrados, publicados entre 1979-2017.

principalmente con ingeniería (48.1% - 5.104 *papers*), las ciencias de la computación (32.5% - 3.449), la gestión y los negocios, entre otros

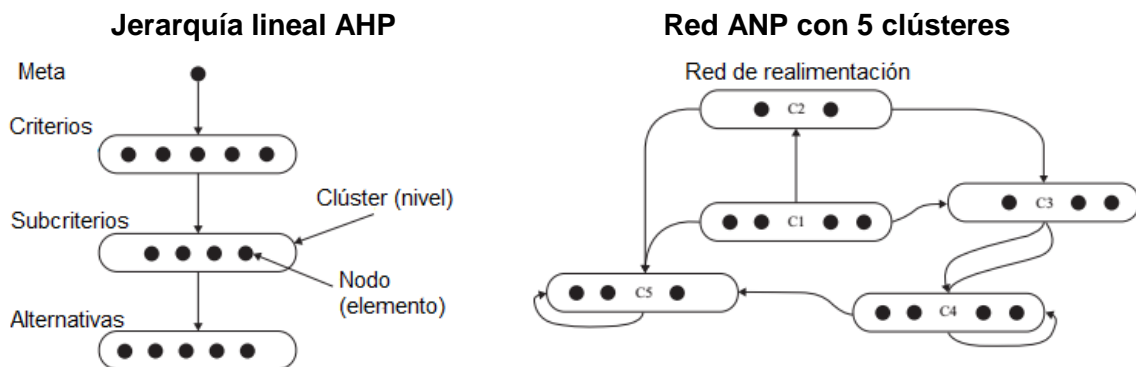
3.2.3 Marco teórico sobre modelos AHP y ANP

A continuación se describen los modelos AHP, ANP y ANP-BOCR con base en los libros de Saaty (2016) e Ishizaka y Nemery (2013).

El **Proceso Analítico Jerárquico** (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) es un método de análisis multi-criterio desarrollado entre 1969-1979 por Thomas Saaty. Permite priorizar y seleccionar alternativas de decisión según la evaluación de las alternativas respecto a una jerarquía de criterios de decisión independientes, los puntajes son asignados a partir de comparaciones pareadas entre las alternativas.

El método tuvo una evolución con el **Proceso Analítico en Red** (*Analytic Network Process – ANP*), que permite considerar relaciones de dependencia entre los criterios, denominadas *feedbacks*. Las dependencias pueden presentarse entre criterios de un mismo clúster⁹ (*inner dependence*), entre criterios de diferente clúster (*outer dependency*) y entre alternativas.

Figura 3-6: Estructura básica de los modelos AHP y ANP



Fuente: (Ishizaka & Nemery, 2013)

⁹ Un clúster es un conjunto de elementos o nodos conectados pertenecientes a una misma categoría. Se diferencian los clústeres de criterios y de alternativas.

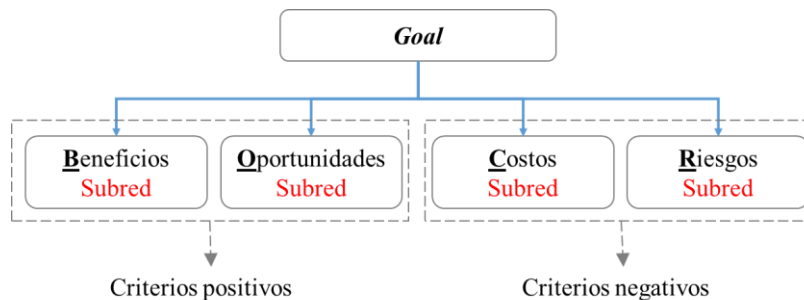
Adicionalmente, el modelo ANP permite considerar relaciones bidireccionales, ya sea entre criterios o entre alternativas y criterios, lo cual no es posible en el método tradicional AHP. Asimismo, no considera necesariamente una estructura jerárquica lineal AHP sino que permite establecer relaciones entre clústeres organizados en red, tal como se muestra en la Figura 3-6.

Modelos ANP - BOCR

Los modelos ANP han sido utilizados para la toma de decisiones en asuntos económicos, políticos, sociales y tecnológicos (Thomas Saaty & Vargas, 2006), presentan una estructura de clústeres con relaciones de dependencia entre sí o dentro de ellos. Dentro de este diseño en red, se destaca la evaluación de méritos BOCR (Beneficios, Oportunidades, Costos y Riesgos), mediante una estructura multinivel o multicapa con subredes.

La Figura 3-7 presenta una red BOCR de dos capas, una red principal (1ª capa) que se alimenta de subredes asociadas a cada componente BOCR (2ª capa). Este tipo de estructura de dos capas es la que se emplea para la construcción del modelo de esta tesis.

Figura 3-7: Modelo de dos capas ANP-BOCR



Fuente: elaboración propia a partir de R. Saaty (2016, p. 100).

Cada subred por separado sintetiza los resultados de priorización de las alternativas, para cada subred se obtiene un orden, de tal forma que es posible identificar cuál es la alternativa más beneficiosa, la de mayores oportunidades, la más costosa y la más riesgosa. Los resultados de cada subred alimentan la síntesis global de resultados de la red principal. Los beneficios y las oportunidades son criterios favorables o positivos para la decisión, para los cuales es deseable tener una valoración alta, mientras que los costos

y los riesgos son criterios desfavorables o negativos para la decisión, para los cuales es deseable tener puntajes bajos. En este sentido, el nodo *Goal* de nivel superior sintetiza los resultados con fórmulas que pueden ser de la siguiente manera (Adams & Saaty, 2003, p. 16):

- Aditiva (negativa): $bB + oO - cC - rR$ (4-1)

- Aditiva (recíproca): $B + O + 1/C + 1/R$ (4-2)

- Aditiva (probabilística): $bB + oO + c(1-C) + r(1-R)$ (4-3)

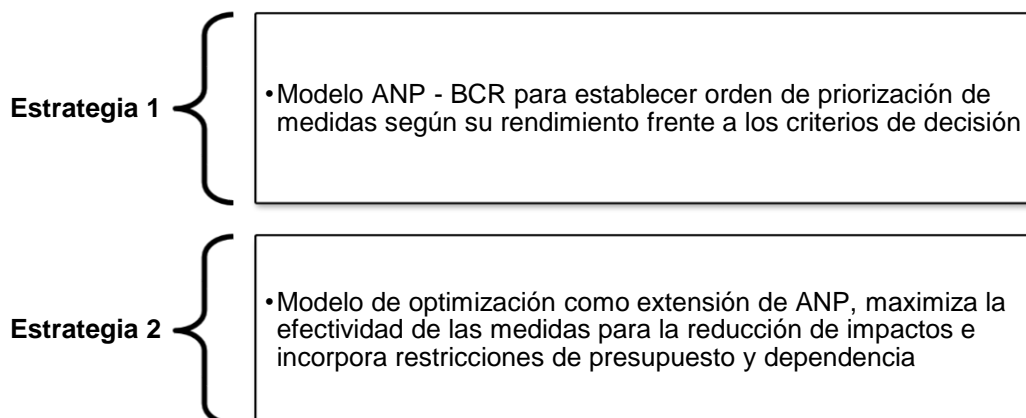
- Multiplicativa: $B * O * 1/C * 1/R$ (4-4)

4. Modelo de decisión para la priorización y selección de medidas de adaptación al cambio climático

Este capítulo expone el proceso de construcción del modelo de decisión con la exploración de dos estrategias. La **primera estrategia** propone un modelo de decisión a partir de la técnica de análisis multi-criterio ANP, con los componentes BCR (Beneficios, Costos y Riesgos) (Thomas Saaty & Vargas, 2006). Esta técnica ordena las alternativas según su rendimiento respecto a los criterios de evaluación, las mejores medidas son las que encabezan el orden de prioridad. Se encontraron limitantes que afectan los resultados de selección, en tanto no es posible obtener un conjunto óptimo de medidas que garantice el cumplimiento de las relaciones entre las alternativas, señaladas previamente.

La **segunda estrategia** corrige las limitaciones de la estrategia 1 sobre la incorporación de restricciones de relaciones y presupuesto, integrando bajo un mismo modelo de optimización la estructura de evaluación de criterios asociados a la efectividad de las medidas para la reducción de impactos. El modelo maximiza la efectividad e incluye los costos dentro de una restricción presupuestal, no como criterio de decisión.

La Figura 4-1 sintetiza las dos estrategias empleadas para la formulación del modelo de decisión. De éstas, la más robusta respecto a los requerimientos del problema de investigación fue la segunda. Sin embargo, se reporta el análisis logrado y las limitaciones que persisten con la implementación del método ANP, por ser ampliamente utilizado en la literatura para problemas de priorización y selección de alternativas.

Figura 4-1: Estrategias de modelización

Fuente: elaboración propia.

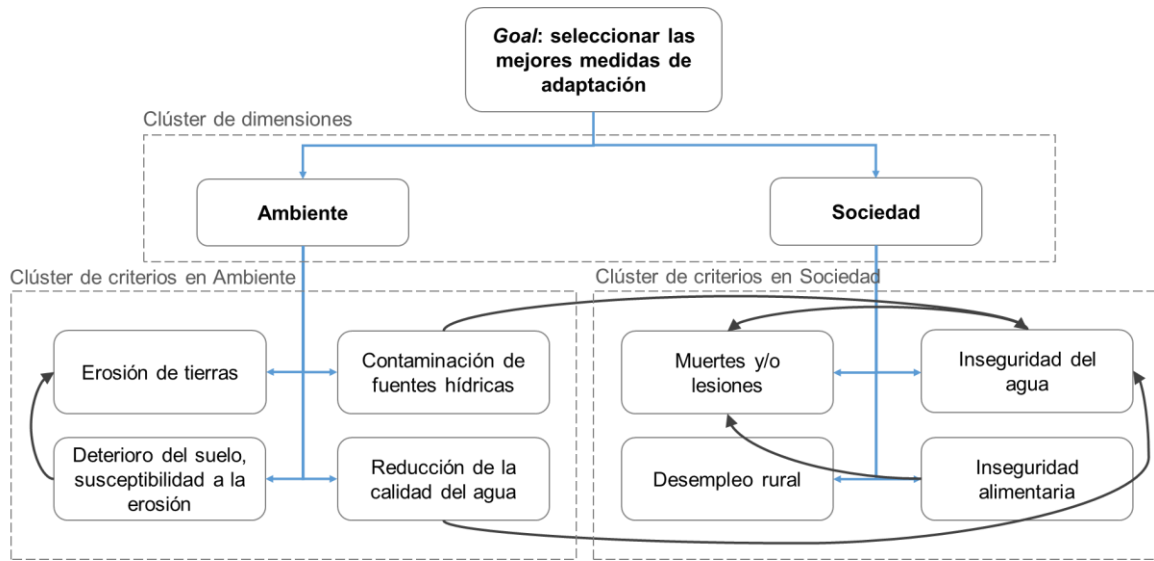
4.1 Estrategia 1: Modelo de análisis multi-criterio ANP-BCR

La Figura 4-2 presenta la estructura del modelo ANP desarrollado, el cual tiene una jerarquía por dimensiones (infraestructura, ambiente, economía y sociedad), la meta (*goal*) es seleccionar la(s) mejor(es) alternativa(s) para la adaptación al cambio climático según los resultados del ranking que se obtiene con la valoración de las alternativas respecto a los criterios. En línea punteada gris se presentan los clústeres de criterios y sub-criterios.

El modelo considera relaciones de dependencia entre y dentro de los clústeres de criterios (*inner and outer dependence*), así por ejemplo, la Figura 4-2 muestra que para la dimensión de ambiente hay una relación entre elementos del mismo clúster (deterioro del suelo → erosión de tierras), la totalidad de las cuales se presentó en la Tabla 3-3 (pág.33).

El clúster de dimensiones comprende la sociedad, el ambiente, la economía y la infraestructura (para efectos explicativos de la figura no se consideran las cuatro dimensiones que se abordan en esta tesis), para los cuales se valora su nivel de preferencia respecto a la meta (*Goal*: seleccionar las mejores medidas de adaptación). Las preferencias se establecen en el método AHP y ANP mediante comparaciones pareadas, las cuales pueden hacerse en el software SuperDecisions por el método de cuestionario (con la escala fundamental de Saaty), matricial, verbal y gráficamente.

Figura 4-2: Estructura de la red ANP del modelo de decisión



Fuente: elaboración propia.

La Tabla 4-1, a su izquierda, muestra la comparación pareada de las dimensiones de ambiente y sociedad por el método matricial. Cada juicio representa la dominancia del elemento en la columna izquierda respecto al elemento en la fila superior, así por ejemplo, el criterio sociedad es 1.5 veces más importante que el criterio de ambiente. Dado que se debe cumplir la reciprocidad en la matriz, la importancia del ambiente respecto a la sociedad es el inverso ($1/1,5 = 2/3 = 0,66$). La misma ponderación de preferencia de esta matriz, pero expresada en términos de proporciones sería de 60% para el criterio de sociedad y 40% en el criterio de ambiente, obtenido como se indica a la derecha de la tabla. Es de aclarar que estas son valoraciones subjetivas que corresponden a preferencias de un decisor. El modelo de esta tesis usa valores de prueba.

Tabla 4-1: Matrices de comparación y cálculo de proporciones

	Ambiente	Sociedad		Suma de filas	Proporción
Ambiente	1	0.66 = 2/3	➔	1+0.66 = 1.66	1.66/(1.66+2.50) = 0.4
Sociedad	1.50 = 3/2	1		1.50+1 = 2.50	2.50/(1.66+2.50) = 0.6

Cada elemento del clúster de dimensiones tiene un clúster de criterios asociado, como lo muestra la Figura 4-2 para las dimensiones de ambiente y sociedad. Los cuatro elementos que hay en uno y otro clúster son comparados de la forma indicada en la Tabla 4-1,

estableciendo así las preferencias entre dimensiones y criterios en toda la red. Para cada grupo de comparaciones se hace un cálculo de la consistencia, el cual debe ser menor a 0.1 (T. Saaty, 2008).

Luego de que se establecen las preferencias entre los clústeres del modelo, se valoran las alternativas respecto a los criterios de más bajo nivel. La escala de valoración puede ser cuantitativa o cualitativa. El modelo establece puntajes y sintetiza los resultados de priorización, ordenando las alternativas según su mayor puntaje.

Como se mencionó en la sección 3.2.3, la sintetización de la red principal puede ser aditiva-negativa, aditiva-recíproca, aditiva-probabilística y multiplicativa (Adams & Saaty, 2003, p. 16). Para la construcción del modelo que se presenta en esta tesis se empleó una fórmula aditiva recíproca, esto porque permite agregar el aporte por componente, teniendo en cuenta que los costos y riesgos son inversos.

Adicionalmente, se consideraron los componentes BCR, y no se contempló el análisis de oportunidades (O) porque no se establecieron criterios de decisión que se acogieran a esta categoría, según el problema de decisión. Los beneficios, como mérito de evaluación favorable o positivo, son abordados con la valoración de la efectividad de las medidas para la reducción de los impactos en las cuatro dimensiones consideradas.

Valoración de las alternativas

Existen dos formas de establecer prioridades entre las alternativas: calificándolas (*rating*) una a una respecto a un ideal o estándar, o comparándolas por pares (Thomas Saaty, 2006).

- **Comparaciones pareadas:** establece preferencias de las alternativas respecto a un criterio, el software SuperDecisions¹⁰ (T. Saaty, 2016) permite ingresar estas preferencias de forma gráfica, verbal, matricial, por cuestionario o directamente. La Figura 4-3 presenta una valoración de tres alternativas por el modo cuestionario

¹⁰ Se empleó el software SuperDecisions para la formulación del modelo de análisis multicriterio ANP-BCR.

(izquierda), usando la escala fundamental de Saaty y por el método directo (derecha), presentando las proporciones finales.

Figura 4-3: Ejemplo de ranking comparaciones pareadas

Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire	Direct	Normal	Hybrid														
Comparisons wrt "1Transportation" node in "Alternatives" cluster						Inconsistency: 0.07069														
1American is moderately to strongly more important than 2Japanese						1American	0.61441													
1. 1American	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	2.Japanese
2. 1American	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	3.European
3. 2.Japanese	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	3.European
						2.Japanese	0.11722													
						3.European	0.26837													

Fuente: (“SuperDecisions Software. Sample Models,” n.d.)

- **Calificaciones (ratings):** la valoración por calificación, establece una escala de valoración, por ejemplo: excelente, bueno, regular y malo, para la cual se establece una comparación pareada como la anterior, luego, las alternativas son calificadas respecto a los criterios siguiendo la escala de valoración definida, como se presenta en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Ejemplo de ranking por ratings

	Priorities	Totals	1Size of House 0.173000	2Yard Space 0.054000	3Transportation 0.188100	4Modern Facilities 0.017500
House A	0.263217	0.473481	Very Large	Below Average	Med	C: 70%-84%
House B	0.180862	0.325338	Very Large	Below Average	Hi	A: 93%-100%
House C	0.555920	1.000000	Large	Excellent	Hi	A: 93%-100%

Fuente: (“SuperDecisions Software. Sample Models,” n.d.)

Para la construcción del modelo que se presenta en esta tesis se usó la valoración por ratings de las alternativas.

- **Ventajas y limitaciones del método**

Ventajas:

- La utilización del método ANP permite establecer relaciones entre los criterios a través de la estructura de red, lo cual elimina la restricción de los modelos AHP de independencia entre los criterios. Para el caso en cuestión, se pueden incorporar en el modelo las relaciones identificadas entre los impactos que fueron reportadas en la Tabla 3-3 (pág.33).

- El modelo permite evaluar criterios que tienen escalas cualitativas asociadas, como la complejidad técnica, la complejidad institucional y la aversión pública.
- La herramienta le permite ver al decisor los resultados parciales de priorización, esto quiere decir que es posible obtener el orden de prioridad en cada subred de efectividad, costos y riesgos, cada una por separado, y finalmente establecer una síntesis general en la red principal.

Limitaciones

- No permite incorporar las diferentes relaciones de dependencia que hay entre las alternativas (precondición, facilitación, sinergia y contradicción), las cuales resultan ser claves para un adecuado proceso de adaptación, especialmente cuando son múltiples las alternativas de decisión, los recursos son limitados y se desea lograr la mayor efectividad posible para la reducción de riesgos climáticos.
- Los modelos ANP-BCR resultan ser muy convenientes para evaluar alternativas que son excluyentes, esto quiere decir, cuando el propósito es seleccionar una entre varias opciones, ya que se obtiene un orden de rendimiento de las alternativas respecto a los criterios evaluados. Para problemas orientados a seleccionar un sub-conjunto óptimo del conjunto de alternativas no resulta ser conveniente. Esto debido a que el decisor debe hacer un análisis posterior para verificar: cuántas y qué medidas se ajustan al presupuesto local, cuáles se deberían implementar según su posición en el resultado de priorización y cómo están condicionadas a otras (por sinergia, contradicción y demás). Debido a esto se propone una extensión del ANP en la Estrategia 2.

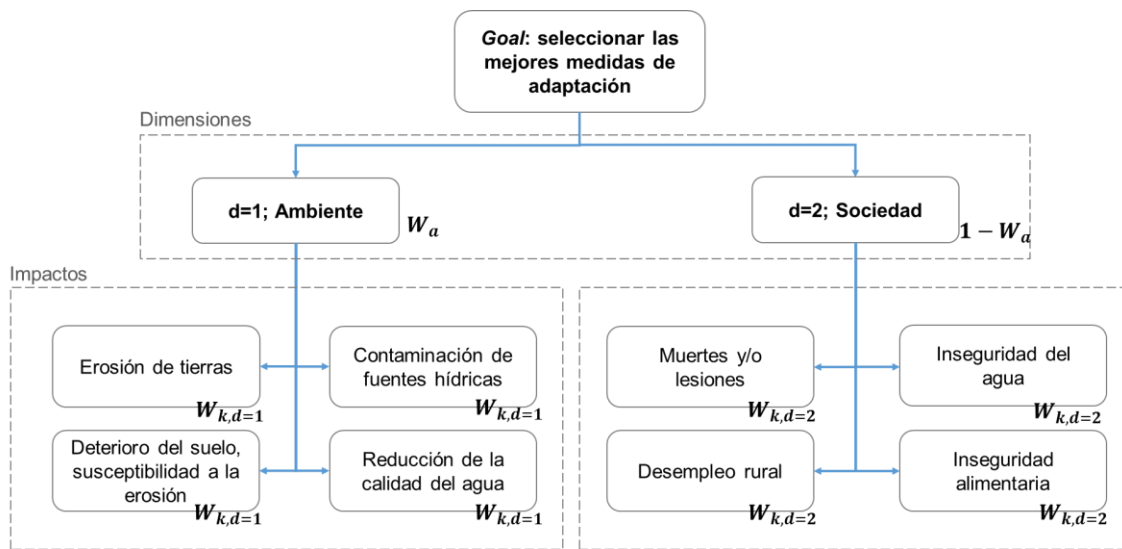
4.2 Estrategia 2: Modelo de optimización con variables binarias

Esta propuesta Integra simultáneamente ANP y optimización de canastas de proyectos considerando sinergias y conflictos entre medidas. Busca maximizar la efectividad en la

reducción de impactos de cambio climático. Esto quiere decir que la selección óptima¹¹, además de cumplir con las restricciones de dependencia y presupuesto, corresponde a la máxima efectividad posible que permiten las restricciones.

Con este modelo se incorpora en la función objetivo los pesos de importancia (o preferencia) asociados a los impactos que se desea reducir, que fueron establecidos en la estructura jerárquica del modelo ANP. La Figura 4-4 explica la asignación de pesos o preferencias en dos de las cuatro dimensiones que son abordadas en esta tesis. En primer lugar, se establecen los pesos de importancia de las dimensiones respecto a la meta de decisión con la distribución de un 100%, para el caso, expresado como $W_{d1} = W_a$, donde $W_a \leq 100\%$ y $W_{d2} = 100\% - W_a$ para las dimensiones 1 y 2 respectivamente.

Figura 4-4: Jerarquía (pesos) de preferencias del modelo de optimización



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se hace la asignación de preferencias o importancia en el conjunto de impactos k asociados a las dimensiones. El peso final asociado a cada impacto W_k en el

¹¹ La autora diferencia entre los términos priorización y selección. El primero hace referencia a la ordenación de las n medidas que resulta de la aplicación del método de análisis multicriterio ANP. El segundo hace referencia a la selección óptima de medidas O que resulta del modelo de optimización propuesto para la Estrategia 2.

modelo de decisión es el producto del peso asignado dentro del conjunto de impactos de la dimensión $W_{k,d}$ y el peso asociado a la dimensión W_d .

▪ Formulación matemática del modelo de optimización

Notación

- k : impactos identificados en las dimensiones, para un total de m impactos.
- i : medida de adaptación, para un total de n medidas.
- W_{cpk} : preferencia (o peso) asignado a la reducción del impacto k en el corto plazo.
- W_{lpk} : preferencia (o peso) asignado a la reducción del impacto k en el largo plazo.
- $E_{cp_{i,k}}$: efectividad de la medida i en el corto plazo para reducir el impacto k .
- $E_{lp_{i,k}}$: efectividad de la medida i en el largo plazo para reducir el impacto k .
- $X_i = \{0,1\}$: medida de adaptación i , para un total de n medidas, adopta los valores de 0 (si la medida no es parte del paquete óptimo de medidas) y 1 (si la medida es parte de la selección óptima).
- $F(i)$: Conjunto de medidas j que i facilita.
- $S(i)$: conjunto de medidas j que son sinérgicas con medida i .
- $CP(i)$: conjunto de medidas j que presenta relación de contradicción potencial con medida i .
- $P(i)$: conjunto de medidas j que son condicionadas por i .
- $C(i)$: conjunto de medidas j que presenta relación de contradicción potencial con medida i .
- P : presupuesto asignado para inversión.

Función objetivo de optimización

Busca maximizar el nivel de efectividad de las n medidas de adaptación teniendo en cuenta su valoración en el corto y largo plazo para la reducción de los impactos. Como lo expresa la Ecuación 4-1.

$$\begin{array}{l}
 \text{Max:} \quad \text{Efectividad Corto Plazo} + \text{Efectividad Largo Plazo} \\
 \text{Max:} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m W_{cpk} * E_{cp_{i,k}} * X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m W_{lpk} * E_{lp_{i,k}} * X_i \quad (4-1)
 \end{array}$$

Las preferencias respecto a la reducción de impactos en el corto y largo plazo pueden ser iguales $Wcp_k=Wlp_k$ o diferenciadas según elección del decisor. Esto quiere decir que en el corto plazo se puede dar mayor importancia a ciertas dimensiones y sus impactos asociados y en el largo plazo a otras dimensiones y sus respectivos impactos.

Se adiciona la **relación de facilitación** en la función objetivo de acuerdo con el siguiente razonamiento: la facilitación ocurre cuando la actividad B funcionaría mejor si previamente se hubiera implementado A, sin embargo, B puede ser implementada; en este sentido, se asume que la valoración de efectividad de una medida X_j que pertenece al conjunto de medidas que i facilita, es decir, $X_j \in F(i)$, aumenta en un valor porcentual Δ_j^F cuando la medida X_i hace parte de la selección óptima.

Lo anterior supone un ΔElp_j cuando las dos alternativas X_i y X_j están en la selección óptima, es decir, cuando $X_i * X_j = 1$, aumentando el nivel de efectividad global en el modelo, es decir, la función objetivo. En razón de lo anterior, la función objetivo del modelo, incluyendo esta restricción queda expresada como se indica en la Ecuación 4-2.

$$\begin{aligned}
 Max \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m Wcp_k * Ecp_{i,k} * X_i \quad + \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m Wlp_k * Elp_{i,k} * X_i \quad + \\
 & \sum_{i \forall i} \sum_{j \in F(i)} (X_i * X_j * \Delta_j^F * \sum_k^m Elp_{j,k}) \quad \quad \quad (4-2)
 \end{aligned}$$

La **relación de sinergia** supone que la relación entre las medidas es bidireccional ($A \leftrightarrow B$), lo cual significa que si la medida X_A está en la selección óptima ($X_A = 1$), entonces aumenta la efectividad de largo plazo de B para la reducción de los impactos k hasta m , y si la medida X_B está ($X_B = 1$), aumenta la efectividad de largo plazo de A en un incremento asignado por el decisor para las relaciones de sinergia Δ_j^S . Con la inclusión de esta restricción, la función objetivo queda expresada como se indica en la Ecuación 4-3.

$$\begin{aligned}
 Max \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m Wcp_k * Ecp_{i,k} * X_i \quad + \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m Wlp_k * Elp_{i,k} * X_i \quad + \\
 & \sum_{i \forall i} \sum_{j \in F(i)} (X_i * X_j * \Delta_j^F * \sum_k^m Elp_{j,k}) \quad \quad \quad + \\
 & \sum_i^n \sum_{j \in S(i) \wedge j > i} (X_i * X_j) * (\Delta_i^S * \sum_k^m Elp_{i,k} + \Delta_j^S * \sum_k^m Elp_{j,k}) \quad \quad \quad (4-3)
 \end{aligned}$$

La **relación de contradicción potencial** se asume como una afectación sobre el grado de efectividad de una medida i cuando también se realiza una medida j , esta restricción supone un decremento Δ_j^C definido por el decisor cuando ambas medidas están en la selección óptima, sin embargo, no son estrictamente excluyentes.

La función objetivo definitiva del modelo, queda expresada como se indica en la Ecuación 4-4.

$$\begin{aligned}
 \text{Max} \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m Wcp_k * Ecp_{i,k} * X_i \quad + \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m Wlp_k * Elp_{i,k} * X_i \quad + \\
 & \sum_{i \forall i} \sum_{j \in F(i)} (X_i * X_j * \Delta_j^F * \sum_k^m Elp_{j,k}) \quad + \\
 & \sum_i^n \sum_{j \in S(i) \wedge j > i} (X_i * X_j) * (\Delta_i^S * \sum_k^m Elp_{i,k} + \Delta_j^S * \sum_k^m Elp_{j,k}) \quad - \\
 & \sum_i^n \sum_{j \in CP(i) \wedge j > i} (X_i * X_j) * (\Delta_i^{CP} * \sum_k^m Elp_{i,k} \quad + \quad \Delta_j^{CP} * \sum_k^m Elp_{j,k}) \quad \text{(4-4)}
 \end{aligned}$$

Las restricciones del modelo se explican como sigue:

- **De variable binaria:** la variable de decisión X_i adopta valores de 0 y 1. Cero cuando la medida no hace parte de la selección óptima que cumple con las restricciones y maximiza la función objetivo; 1 cuando sí es parte de la selección óptima.
- **De precondición:** indica que para hacer una medida j se requiere que previamente se haya implementado la medida i , se debe garantizar que la medida requerida previamente, es decir, la medida i , también sea parte de la selección, lo cual supone que $X_i \geq X_{j \in P(i)}$, el espacio posible de soluciones es de $\{(1,0), (1,1), (0,0)\}$ para (X_i, X_j) respectivamente.
- **De contradicción:** ocurre cuando un subconjunto de las alternativas es excluyente y sólo es posible elegir una entre las opciones, es decir que sólo una puede adoptar el valor de 1, matemáticamente significa que la sumatoria de las variables de decisión asociadas a las medidas que son contradictorias o excluyentes, debe ser menor o igual a 1.
- **De presupuesto:** la suma de los costos de las medidas C_i debe ser menor o igual a un presupuesto disponible P .

Variables de decisión

Variable binaria $X_i = \{0,1\}$: medida de adaptación i , para $i = 1, 2, \dots, n$. Adopta los valores de 0 (si la medida no es parte de la selección óptima) y 1 (si la medida es parte de la selección óptima).

Formulación de relaciones y restricciones¹²

- **De variable binaria (restricción)**

$$X_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \tag{4-5}$$

- **De precondition (restricción)**

$$X_i \geq X_{j \in P(i)} \tag{4-6}$$

- **De facilitación**

En la función objetivo:

$$+ \sum_{i \forall i} \sum_{j \in F(i)} (X_i * X_j * \Delta_j^F * \sum_k^m Elp_{j,k}) \tag{4-7}$$

- **De sinergia**

En la función objetivo:

$$+ \sum_i^n \sum_{j \in S(i) \wedge j > i} (X_i * X_j) * (\Delta_i^S * \sum_k^m Elp_{i,k} + \Delta_j^S * \sum_k^m Elp_{j,k}) \tag{4-8}$$

- **De contradicción potencial**

En la función objetivo

$$- \sum_i^n \sum_{j \in CP(i) \wedge j > i} (X_i * X_j) * (\Delta_i^{CP} * \sum_k^m Elp_{i,k} + \Delta_j^{CP} * \sum_k^m Elp_{j,k}) \tag{4-9}$$

- **De contradicción**

Como restricción: (4-10)

¹² La multiplicación de variables de decisión binarias, en un modelo de optimización, complica su resolución. Si el problema incluye demasiadas medidas y no se cuenta con un software de optimización no lineal eficiente, se puede incorporar nuevas variables de decisión binarias auxiliares con el fin de linealizar el problema, así:

$Y_{ij} = 1$, si las medidas i y j se implementan en la solución óptima; 0 en caso contrario.

Y se incluye la restricción: $X_i + X_j \geq 2Y_{ij}$, es decir, si i y j se implementan $Y_{ij} = 1$; si solo una de ellas o ninguna se implementa, $Y_{ij} = 0$ para que se cumpla la restricción. De esta manera, se incluye en la función objetivo el término $+ \Delta * Y_{ij}$

$$\sum X_{j \in C(i)} \leq 1, \forall C(i)$$

- **De presupuesto**
Como restricción:

$$\sum_1^n C_i X_i \leq P \quad (4-11)$$

- **Ventajas de la Estrategia 2**

- El modelo de optimización permite incorporar los niveles de preferencia de un decisor respecto a las dimensiones y los impactos a reducir, tal y como fueron establecidos en el modelo ANP-BCR.
- El modelo permite seleccionar las medidas que reportan el mayor nivel de efectividad, teniendo en cuenta que es este el criterio que se maximiza de acuerdo con el cumplimiento de las restricciones, luego, esto asegura que para cualquier cantidad de presupuesto P, se garantiza que las medidas seleccionadas son las que logran la máxima efectividad posible.
- El modelo da mayor flexibilidad al decisor para cambiar parámetros del problema, como el presupuesto y las preferencias en la estructura de decisión.
- El modelo incorpora la valoración de la efectividad de las medidas en el corto y largo plazo para la reducción de impactos, así como las restricciones de relaciones entre las alternativas y de presupuesto. Esto último no es posible no fue posible en el modelo de análisis multi-criterio propuesto en la Estrategia 1. Asimismo, permite evaluar criterios u objetivos valorados en escalas cuantitativas y cualitativas.

5. Caso de aplicación

Este capítulo presenta una aplicación de las dos estrategias planteadas para la formulación del problema según los requerimientos establecidos. Partiendo de la categorización de territorios que se propone en la etapa metodológica 1, se toma como caso de aplicación un territorio de ladera con una configuración de pueblo, el cual puede verse afectado por amenazas como sequía, vendaval, movimientos en masa, incendios forestales, avenidas torrenciales y temperaturas extremas de calor (ver la Tabla 3-2). Para efectos prácticos del ejercicio se consideraron las primeras cuatro amenazas mencionadas.

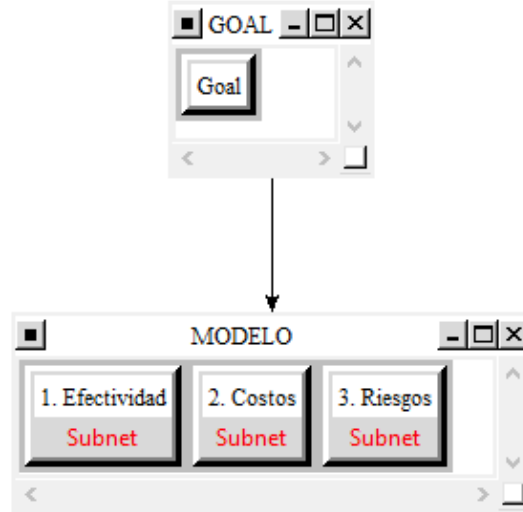
El conjunto **U** de medidas de adaptación que tienen potencial de implementación se presentan en el Anexo A. La selección óptima de medidas **O** se hizo siguiendo las estrategias 1 y 2 presentadas en el Capítulo 4. A continuación se presentan los modelos y los resultados.

5.1 Estrategia 1: Modelo de análisis multi-criterio ANP-BCR

5.1.1 Construcción del modelo

- **Diseño de la red principal y las subredes**

Se empleó el software SuperDecisions (T. Saaty, 2016) para la construcción del modelo ANP de dos capas, la red principal (1ª capa) tiene una meta global evaluada a partir de los resultados obtenidos en las subredes de beneficios, costos y riesgos; como lo presenta la Figura 5-1. Los beneficios son entendidos como la efectividad de las medidas para reducir impactos, consecuencias o daños, ocasionados por amenazas naturales asociadas al clima.

Figura 5-1: Red principal del modelo BCR

Fuente: elaboración propia con el software SuperDecisions

La red principal sintetiza los resultados obtenidos en cada subred mediante una fórmula aditiva recíproca ($B + 1/C + 1/R$), expresada en el modelo como se indica en la Ecuación 2-1.

$$\$NormalNet(1.Efectividad) * \$SmartAlt(1.Efectividad) + \$NormalNet(2.Costos) * \$SmartInvAlt(2.Costos) + \$NormalNet(3.Riesgos) * \$SmartInvAlt(3.Riesgos) \dots \textbf{(5-1)}$$

La sintaxis de esta fórmula se explica como sigue (R. W. Saaty, 2016, p. 148):

- **\$**: significa que se computan los resultados para cada alternativa en turno.
- **NormalNet** (Nombre del nodo): se utiliza el valor normalizado del nodo en la red actual. Si el nodo aparece en una hoja de *ratings* adjunta se utiliza su valor normalizado a partir de ahí.
- **Alt** (Nombre del nodo): se refiere a los valores de las alternativas que pertenecen a la subred con el nombre indicado.
- **InvAlt** (Nombre del nodo): voltea los valores de los nodos en la subred, de modo que el antes tenía el valor más grande (más costoso, más arriesgado, por ejemplo), ahora tiene el valor más pequeño. Esto se hace invirtiendo el valor de cada alternativa, dividiendo el valor invertido por la suma renormalizada.

- **SmartAlt** (Nombre del nodo): escoge el mejor de los valores alternativos y los deja pasar: si la subred es de un nivel inferior; pasan los valores *Ideals* de la síntesis de la subred; si se trata de una subred de nivel inferior donde los valores de las alternativas provienen de una hoja de *ratings*, o si es una subred de nivel intermedio, pasan los valores *Raw* de la síntesis de la subred.

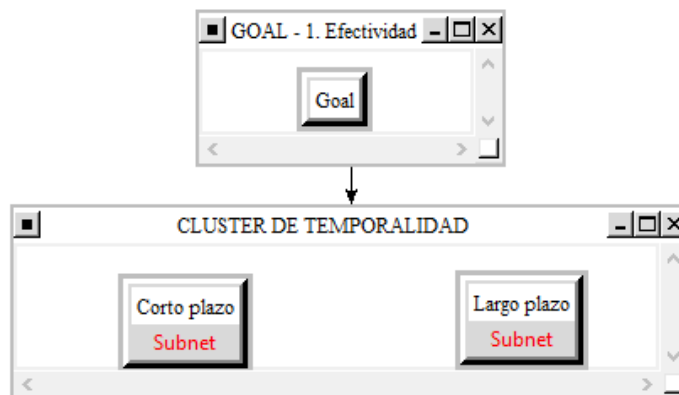
A continuación, se explica la configuración de las subredes de Efectividad, Costos y Riesgos (segundas capas), sus configuraciones de preferencia y escalas para la asignación de *ratings* se presentan en el Anexo D.

- Subred de efectividad

Sintetiza las valoraciones dadas por criterio experto sobre la efectividad de cada medida en el corto y largo plazo para reducir los impactos identificados en las dimensiones de infraestructura, ambiente, economía y sociedad. Se construyeron subredes idénticas pero separadas para corto y largo plazo, como se muestra en la Figura 5-2, que difieren en los valores de efectividad que son ingresados en la hoja de *ratings* para cada medida.

El decisor asigna un grado de preferencia para el corto y largo plazo, para este caso se tomaron valores de prueba del 40% y 60% respectivamente. Es de suponer que las valoraciones del modelo sean acordadas entre un grupo de expertos.

Figura 5-2: Subred de efectividad – Modelo BCR

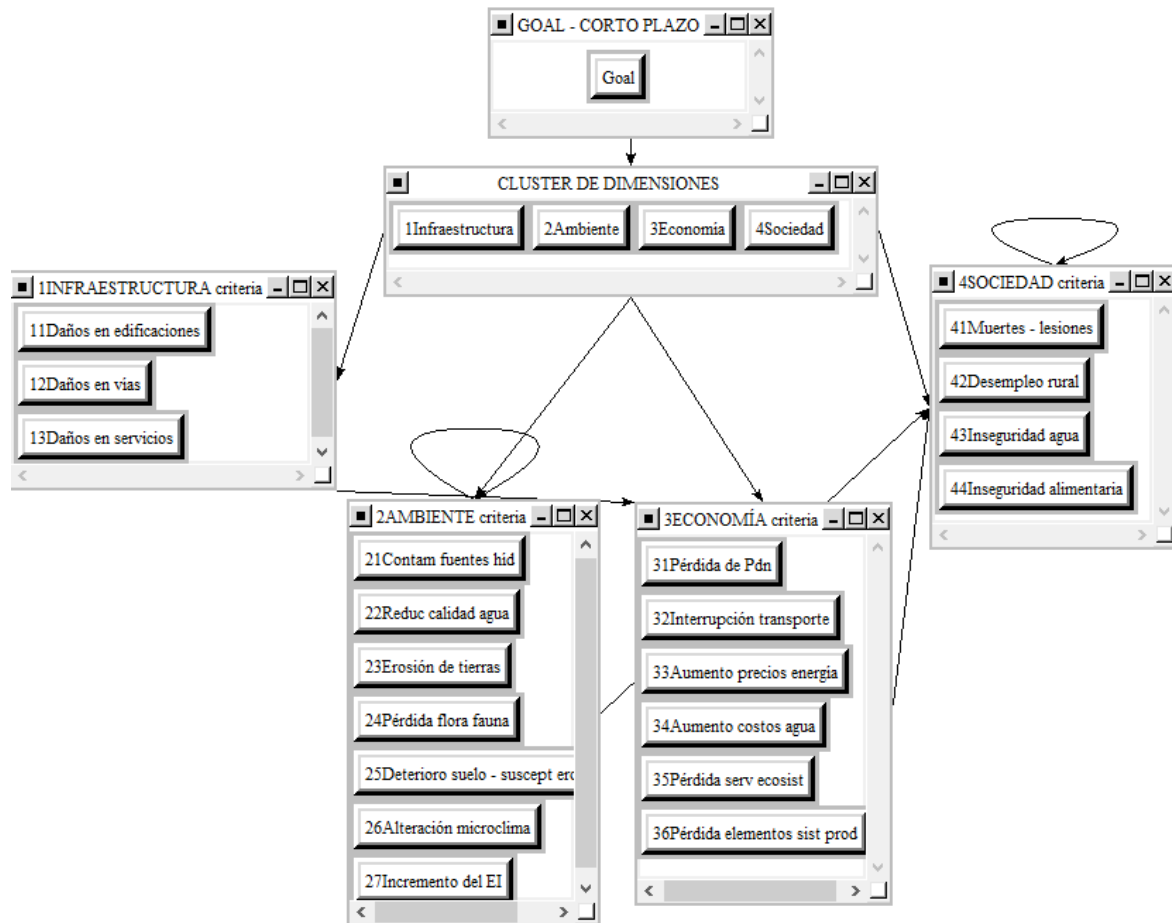


Fuente: elaboración propia con el software SuperDecisions

El listado de medidas seleccionadas para los análisis y sus relaciones de dependencia se presentan en el Anexo E, algunas de las cuales son comunes a dos o más amenazas y se identifican con la letra inicial **T**, como la de *Educación, formación y sensibilización de públicos*, que está presente en las cinco amenazas, para un total de 31 medidas y 11 más tipo T, diferenciadas para cada amenaza en la cual aplican, con las iniciales S (sequía), I (inundación), M (movimiento en masa), V (vendaval) e IF (incendio forestal).

Las subredes de corto y largo plazo tienen la estructura de la Figura 5-3, el decisor asigna sus preferencias de importancia para las cuatro dimensiones, en este caso, el mayor peso de importancia fue para la dimensión social en ambas subredes.

Figura 5-3: Subred de efectividad en el corto plazo – Modelo BCR



Fuente: elaboración propia con el software SuperDecisions

Cada dimensión tiene un clúster y criterios asociados, los de ambiente y sociedad tienen relaciones de dependencia al interior (*inner dependency*), todos los demás tienen relaciones entre sí (*outer dependency*), según las relaciones entre impactos indicadas en la Tabla 3-3 (pág. 33).

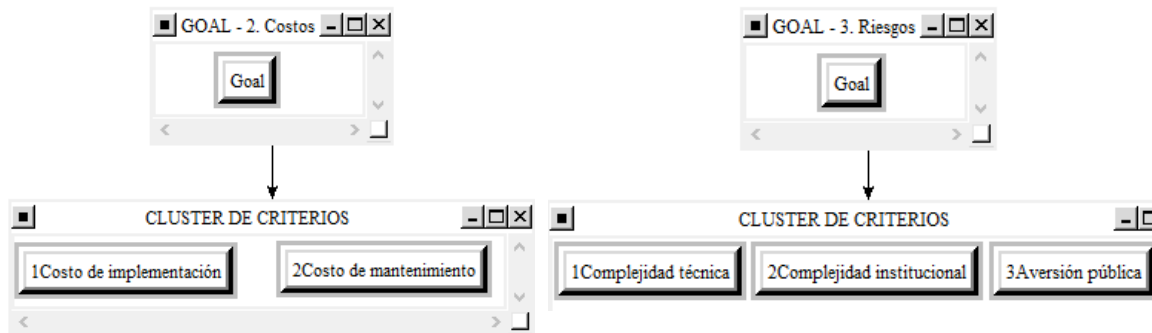
Las valoraciones de efectividad realizadas para el caso de aplicación se presentan en el Anexo B

- Subredes de costos y riesgos

Presentados en la Figura 5-4, ambos componentes son criterios desfavorables para la decisión, cada subred asociada establece un orden de priorización indicando la alternativa más costosa, la más riesgosa y las subsecuentes a partir del valor mayor. Es por esto que la red principal sintetiza la priorización a partir de una fórmula que calcula valores recíprocos en estas subredes.

La subred de costos involucra costos de implementación y de mantenimiento, los primeros son asumidos con valores figurados, donde el de menor valor es \$0 (*T06M_No construir en zonas de riesgo de movimiento en masa*), en tanto es una medida comportamental; y el mayor es de \$70 (*9S_Seguro de cosechas*) en tanto son medidas de tipo económico que requieren de programas con grandes montos de inversión privada y/o estatal. Los costos de mantenimiento son valorados a partir de una escala cualitativa indicada en el Anexo B.

Figura 5-4: Subredes de costos y riesgos – Modelo BCR



Fuente: elaboración propia con el software SuperDecisions

Los riesgos son asumidos como barreras y dificultades para y durante la implementación, como: 1) complejidad técnica, puede afectar negativamente la implementación de una medida cuando no se cuenta con capital técnico o intelectual; 2) complejidad institucional, cuando las gestiones pueden verse afectadas negativamente por intereses políticos o privados, o cuando se requiere de normativas y leyes especiales, como es el caso de *9S_Seguro de cosechas*; y 3) la aversión pública, cuando la medida tiene una alta probabilidad de ser rechazada por la población, como es el caso de *T10M_Reubicación de población asentada en zonas de alto riesgo de movimiento en masa*.

5.1.2 Resultados

El Anexo F presenta los resultados de priorización de las 41 alternativas contempladas para el territorio de pueblo en ladera, con las amenazas de sequía, vendaval, movimiento en masa e incendio forestal, según se aprecia, el orden de priorización general es casi coincidente con la priorización obtenida en la subred de efectividad, posiblemente sea explicado por el grado de preferencia asignado en la red principal (Efectividad: 50%, Costos: 30%, Riesgos: 20%). Las diferencias en el orden de priorización entre la subred de efectividad y la red principal se resaltaron en color gris en la tabla de resultados presentada en el Anexo.

La Tabla 5-1 presenta los resultados ordenados de las 10 primeras alternativas en la priorización, como se puede apreciar, la medida de reubicación ocupa el primer lugar en la subred de efectividad y en el modelo global, aun cuando es la alternativa de mayor riesgo y la que ocupa el puesto 16 entre las más costosas.

Como se indicó sobre las limitaciones de esta estrategia, el modelo no permite incluir las restricciones de contradicción entre las alternativas, es por esto que las medidas de estabilización de taludes (25M, 26M y 24M) estuvieron seguidamente en las posiciones 15, 16 y 17 del ranking de priorización; es de suponer que en términos prácticos se elija un solo tipo de revestimiento para los taludes, ya sea de cemento, con vegetación o mixto.

Tabla 5-1: Resultados de las 10 primeras alternativas priorizadas en el modelo ANP-BCR

Graphic	Alternatives	Ranking B+1/C+	Ranking Efect	Ranking Costos	Ranking Riesgos
0,5030	T10M_Reubicación de pobl	1	1	16	1
0,3998	22M_Reducción o abatimier	2	2	29	27
0,3942	5S_Favorecimiento del reen	3	3	6	2
0,3648	31IF_Brigadas de bomberos	4	4	5	39
0,3619	1S_Implementación de estru	5	5	3	25
0,3607	T06M_No construir ni asen	6	8	41	23
0,3544	2S_Utilización de aguas sub	7	6	27	9
0,3425	28IF_Franja aislante contrat	8	7	14	32
0,3136	27M_Estabilización de talud	9	9	18	31
0,2978	4S_Implementación de siste	10	10	4	11

5.2 Estrategia 2: Modelo de optimización binaria

5.2.1 Construcción del modelo

La segunda estrategia de modelización busca hacer una selección óptima de medidas que cumpla con las restricciones del problema planteado, para tal fin se propone un modelo de optimización con variables binarias que maximiza los niveles de efectividad de las medidas para la reducción de impactos. El modelo integra la jerarquía de criterios del modelo ANP para el nodo de Efectividad y las preferencias de un decisor respecto a las dimensiones y los daños a evitar.

Los Costos de las medidas no son vistos como un criterio de decisión sino como una restricción, teniendo en cuenta que se tiene una cantidad limitada de recursos P para invertir en un número determinado de acciones que maximizan la Efectividad.

Los Riesgos tampoco se asumen como criterios que afecten la decisión de selección, en tanto son barreras a la implementación que pueden ser superadas con intervenciones en educación, gestión institucional y acercamiento con las comunidades. En este sentido, lo que se propone es identificar las barreras a la implementación y establecer planes de acción para el fortalecimiento de las capacidades, los procesos de gestión y el diálogo con las comunidades; en vez de incluir estas dificultades dentro del proceso mismo de decisión, ya que puede afectar la selección de medidas con altos niveles de efectividad para la

reducción del riesgo, como es el caso de la reubicación de población asentada en zonas de riesgo.

- **Jerarquía de preferencias**

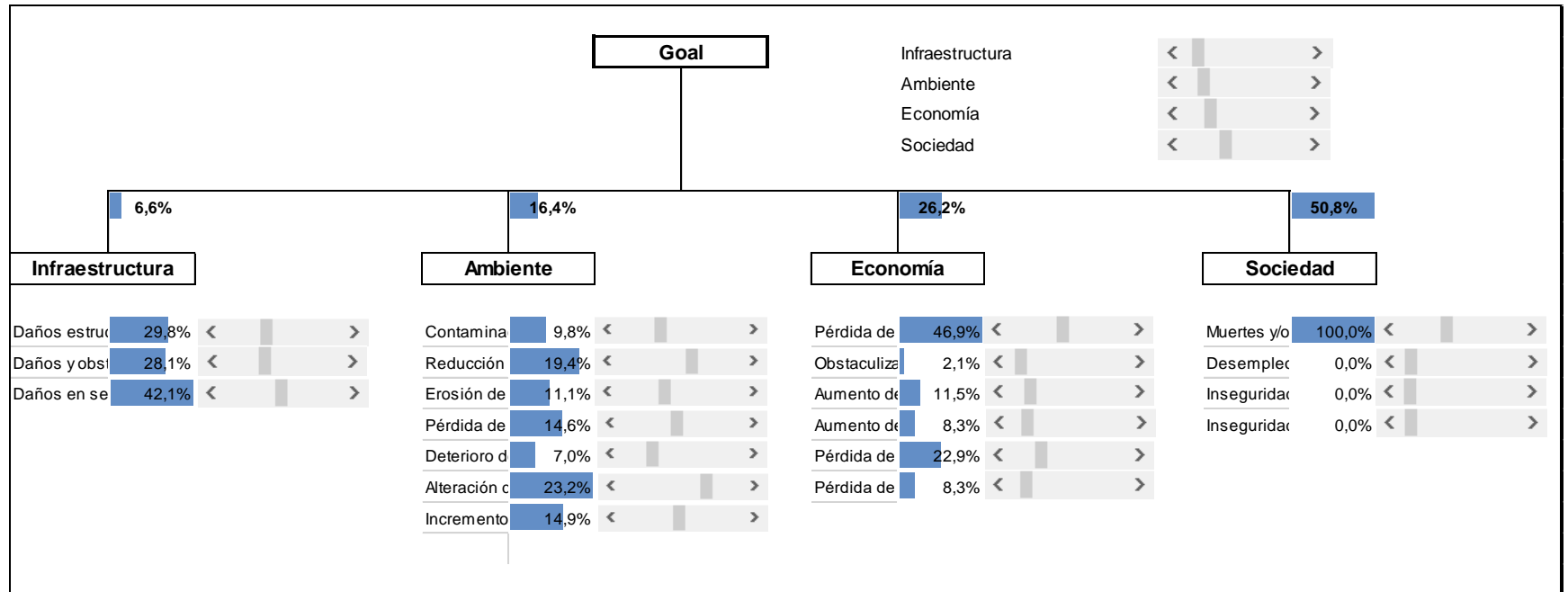
Como se muestra en la Figura 5-5, se conserva la jerarquía de criterios establecida en el clúster de efectividad para el diseño del modelo ANP-BCR en SuperDecisions, con la ventaja de que el decisor puede hacer variaciones directas en los grados de preferencia mediante ecualizadores. Los pesos seleccionados son ejemplos o valores de prueba, es de esperar que para un modelo de decisión formal se cuente con un grupo amplio de expertos que fije los pesos de importancia por consenso.

La jerarquía presenta dos niveles: el primero define las preferencias respecto a las dimensiones, en este caso, se da una mayor preferencia a la sociedad, seguido de la economía, el ambiente y la infraestructura, con porcentajes de 50.8%, 26.2%, 16.4% y 6,6% respectivamente¹³.

El segundo nivel define la preferencia de los criterios en cada dimensión respecto a un 100%, así por ejemplo, en la dimensión de infraestructura, la reducción de daños en servicios públicos tiene una preferencia del 42.1%, los daños estructurales en edificaciones del 29.8% y los daños y obstrucciones en vías de transporte del 28.1%; dichas preferencias representan un peso final en la estructura de decisión del 2.8% ($6.6\% \times 42.1\%$), 2.0% ($6.6\% \times 29.8\%$) y 1.8% ($6.6\% \times 28.1\%$) respectivamente; de esta forma se obtienen los pesos de los 20 impactos k contemplados en el modelo.

¹³ Los pesos de importancia asignados al modelo de optimización de la Estrategia 2 no son los mismos establecidos para el modelo ANP de la Estrategia 1.

Figura 5-5: Jerarquía de pesos del modelo de optimización



Pesos finales obtenidos según las preferencias fijadas con los ecualizadores

Infraestructura

- W₁ = 2,0%
- W₂ = 1,8%
- W₃ = 2,8%

Ambiente

- W₄ = 1,6%
- W₅ = 3,2%
- W₆ = 1,8%
- W₇ = 2,4%
- W₈ = 1,1%
- W₉ = 3,8%
- W₁₀ = 2,4%

Economía

- W₁₁ = 12,3%
- W₁₂ = 0,5%
- W₁₃ = 3,0%
- W₁₄ = 2,2%
- W₁₅ = 6,0%
- W₁₆ = 2,2%

Sociedad

- W₁₇ = 50,8%
- W₁₈ = 0,0%
- W₁₉ = 0,0%
- W₂₀ = 0,0%

- **Formulación matemática del modelo de optimización**

Notación

- **k**: impactos identificados en las dimensiones, para un total de **m** impactos.
- **i**: medida de adaptación, para un total de **n** medidas.
- **Wcp_k**: preferencia (o peso) asignado a la reducción del impacto **k** en el corto plazo.
- **Wlp_k**: preferencia (o peso) asignado a la reducción del impacto **k** en el largo plazo.
- **Ecp_{i,k}**: efectividad de la medida **i** en el corto plazo para reducir el impacto **k**.
- **Elp_{i,k}**: efectividad de la medida **i** en el largo plazo para reducir el impacto **k**.
- **X_i = {0,1}**: medida de adaptación **i**, para un total de **n** medidas, adopta los valores de 0 (si la medida no es parte del paquete óptimo de medidas) y 1 (si la medida es parte de la selección óptima).
- **F(i)**: Conjunto de medidas **j** que **i** facilita.
- **P(i)**: conjunto de medidas **j** que son condicionadas por **i**.
- **C(i)**: conjunto de medidas **j** que presenta relación de contradicción potencial con medida **i**.
- **P**: presupuesto asignado para inversión.

Función objetivo de optimización

Busca maximizar el nivel de efectividad de las medidas de adaptación teniendo en cuenta su valoración en el corto y largo plazo para la reducción de los impactos. La incorporación de la restricción de facilitación supone un $\Delta_j^F * \sum_k^m Elp_{j,k}$ cuando las dos alternativas X_i y $X_j \in F(i)$ están en la selección óptima, es decir, cuando $X_i * X_j = 1$, aumentando el nivel de efectividad global en el modelo, es decir, la función objetivo. En razón de lo anterior, la función objetivo del modelo, incluyendo esta restricción queda expresada como se indica en la Ecuación 5-8:

$$Max \quad \sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} Wcp_k * Ecp_{i,k} * X_i + \sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} Wlp_k * Elp_{i,k} * X_i + \sum_{i \forall i} \sum_{j \in F(i)} (X_i * X_j * \Delta_j^F * \sum_k^m Elp_{j,k}) \quad (5-8)$$

Las preferencias respecto a la reducción de impactos en el corto y largo plazo pueden ser iguales $Wcp_k = Wlp_k$ o diferenciadas según elección del decisor, en este caso se ha dado mayor importancia a los impactos relacionados con la dimensión social en el corto plazo y a los relacionados con la dimensión ambiental en el largo plazo.

Variables de decisión

X_i : medida de adaptación i , para $i = 1, 2, \dots, 41$.

Sujeto a las siguientes restricciones:

- De variable binaria¹⁴ $X_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ **(5-9)**

- De precondition $T07M \geq T08M$ **(5-10)**

$T07M \geq T10M$ **(5-11)**

- De contradicción $24M + 25M + 26M \leq 1$ **(5-12)**

- De presupuesto $\sum_1^{41} C_i X_i \leq 450$ **(5-13)**

Las relaciones de facilitación se presentan en el Anexo E, en la Tabla 5-2 se indica la efectividad de largo plazo de la medida facilitada de acuerdo con la valoración que fue dada por el experto, que multiplicada por un incremento Δ cuando la medida facilitadora hace parte de la selección óptima, modificaría el valor de la función objetivo.

Tabla 5-2: Alternativas facilitadoras y facilitadas

X_i	X_j	Efectividad total de largo plazo de la medida facilitada – Elp_j
T01S	T04S	11
T01S	T05S	62
T01S	3S	64
T01S	5S	310
T01S	6S	145
T01S	10S	70
T02S	5S	310
T02S	6S	145

¹⁴ X_i toma los valores de 0: si la medida i no hace parte de la selección óptima, y 1: si la medida i sí hace parte de la selección óptima.

X_i	X_j	Efectividad total de largo plazo de la medida facilitada – Elp_j
T02S	10S	70
T02S	11S	50
T01M	T06M	175
T01M	T09M	48
T02M	T07M	94
T02M	T09M	48
T08M	T06M	175
T01V	T09V	16
T01V	T11V	55
T01F	T09IF	115
T02F	T09IF	115

5.2.2 Resultados

El reporte de resultados supone las preferencias indicadas en la jerarquía de criterios de la Figura 5-5, los pesos asignados a las dimensiones de infraestructura, ambiente, economía y sociedad son respectivamente del 6.6%, 16.4%, 26.2% y 50.8%; con una marcada importancia en la dimensión social, donde el impacto de *muertes y lesiones en la población* recibe todo el peso, para un peso final de 50,8% (50,8%*100%).

Asumiendo además, un presupuesto $P = 450$ y un $\Delta = 9\%$, la selección óptima con la función de optimización del modelo es de 16 alternativas, que reportan un valor de la efectividad total maximizada de 454,53. El modelo se planteó en Microsoft Excel. Los resultados completos se presentan en el Anexo G.

Tabla 5-3: Resultados del modelo de optimización binaria

ID	X_i	$Ecp = \sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} W_k * Ecp_{i,k} * X_i$	$Elp = \sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} W_K * Elp_{i,k} * X_i$	ET= Ecp+Elp	Costo
T11V	1	8,57	8,57	17,13	10
T01M	1	0,00	5,21	5,21	20
T02M	1	0,00	5,21	5,21	30
T06M	1	4,07	31,74	35,81	0
T07M	1	0,00	13,86	13,86	30
T08M	1	0,00	20,28	20,28	10

ID	X_i	$E_{cp} = \sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} W_k * E_{cp_{i,k}} * X_i$	$E_{lp} = \sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} W_k * E_{lp_{i,k}} * X_i$	$ET = E_{cp} + E_{lp}$	Costo
T09M	1	8,13	24,39	32,52	40
T10M	1	35,39	28,25	63,64	60
22M	1	19,62	19,62	39,24	30
27M	1	10,48	11,56	22,05	30
T01IF	1	0,00	2,94	2,94	20
T09IF	1	10,76	16,18	26,94	40
T12IF	1	2,94	5,88	8,82	10
28IF	1	17,90	17,21	35,11	40
29IF	1	12,31	12,31	24,63	40
31IF	1	21,04	21,14	42,18	40
Totales	16	151,21	244,37	395,58	450

Donde:

Amenaza asociada	Medida de la selección óptima
Vendaval	<ul style="list-style-type: none"> • T11V_Adecuación y adaptación de la infraestructura
Movimiento en masa	<ul style="list-style-type: none"> • T01M_Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de movimiento en masa • T02M_Conocimiento, investigación e innovación tecnológica – movimientos en masa • T06M_No construir ni asentarse en zonas de riesgo de movimientos en masa • T07M_Elaboración de mapas de riesgo de movimientos en masa • T08M_Regulación del uso de la tierra - movimientos en masa • T09M_Sistema de alerta temprana - movimientos en masa • T10M_Reubicación de población asentada en zonas de riesgo de movimientos en masa • 22M_Reducción o abatimiento del ángulo de las pendientes • 27M_Estabilización de taludes mediante el control de aguas
Incendio forestal	<ul style="list-style-type: none"> • T01IF_Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de incendio forestal • T09IF_Sistema de alerta temprana - incendios forestales • T12IF_Reglamentación de las actividades de quema y fijación de multas por malas prácticas - incendios forestales • 28IF_Franja aislante contrafuego • 29IF_Puntos de agua o reservorios • 31IF_Brigadas de bomberos forestales

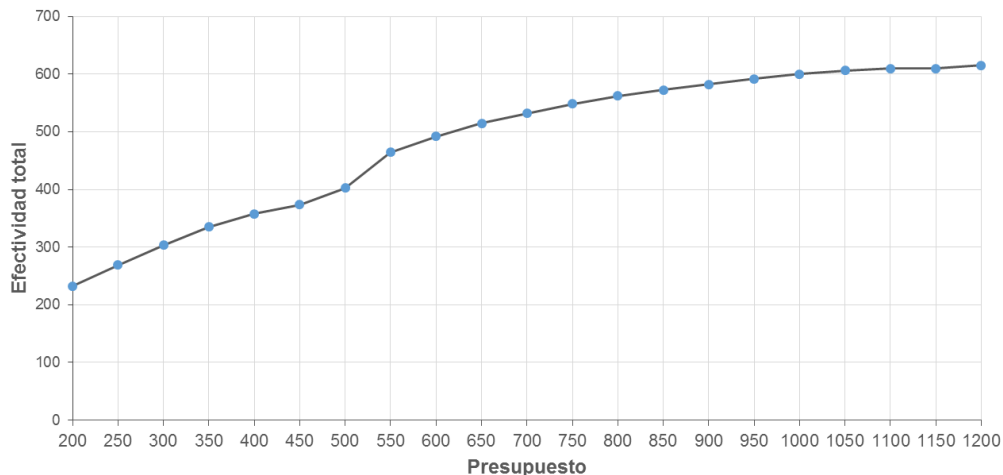
De acuerdo con lo anterior, para un presupuesto $P = 450$ definido por un decisor, y con una mayor preferencia por la reducción de impactos en las dimensiones de sociedad (50.8%) y economía (26.2%), la selección óptima que maximiza la efectividad se compone de 16 medidas: una orientada a la amenaza de vendaval, 9 a la amenaza de movimientos en masa y 6 a incendios forestales. Sobresale que en su mayoría son medidas transversales (identificadas con la letra T), es decir, que son útiles para más de una amenaza.

Como se aprecia en los resultados, no hay ninguna medida asociada a la amenaza de sequía, esto se explica, posiblemente, porque los pesos de preferencia son del 50.8% en la dimensión social, y dentro de esta, el 100% recae sobre el impacto de *Muertes y/o lesiones en la población*; ninguna de las medidas para sequía apunta de forma directa a la reducción de este impacto, sino a los de inseguridad del agua, inseguridad alimentaria y desempleo rural, razón por la cual se recomienda considerar en futuras investigaciones la forma de incorporar las relaciones en red de la jerarquía de criterios, tal como lo permiten los modelos ANP.

Análisis de sensibilidad del presupuesto

Suponiendo variaciones en el presupuesto P asignado para invertir en las medidas de adaptación, en un rango de 200 a 1200, la Figura 5-6 muestra la frontera de Pareto, considerando Presupuesto vs Efectividad total de las medidas, como se puede apreciar, para un presupuesto mayor a 850 el aumento en la efectividad es poco y no representa aumentos mayores al 3%.

Figura 5-6: Frontera de Pareto del modelo de optimización



El Anexo H presenta los resultados completos del análisis de sensibilidad, para el rango de variación indicado en el presupuesto, las medidas robustas, que siempre hacen parte de la selección óptima son:

- T11V_Adecuación y adaptación de la infraestructura - vendavales
- T01M_Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de movimiento en masa
- T06M_No construir ni asentarse en zonas de riesgo de movimientos en masa
- T07M_Elaboración de mapas de riesgo de movimientos en masa
- T08M_Regulación del uso de la tierra - movimientos en masa
- T10M_Reubicación de población asentada en zonas de riesgo de movimientos en masa
- 22M_Reducción o abatimiento del ángulo de las pendientes

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

En esta tesis se abordó el problema de selección de medidas de adaptación al cambio y la variabilidad climática en un territorio. Para tal fin, se propusieron dos estrategias de modelización como resultado de una ruta metodológica desarrollada en dos fases. La primera está orientada a la realización de un análisis territorial para identificar las amenazas naturales a las cuales es susceptible un territorio y los impactos o daños potenciales que estas podrían ocasionar, de esta forma, se garantizó que la configuración del modelo de decisión evaluara acciones acordes con las necesidades locales de adaptación al clima.

La segunda etapa metodológica fue la construcción y formulación del modelo de decisión. La revisión de literatura realizada permitió establecer que uno de los métodos más empleados para la selección de medidas de adaptación es el análisis multi-criterio, dicho método se implementó como Estrategia 1 de modelización, para tal efecto se planteó un modelo de análisis multicriterio ANP (*Analytic Network Process*), el método fue propuesto por Saaty y es una evolución del método tradicional AHP (*Analytic Hierarchy Process*). El método permite hacer una ordenación de las medidas según su rendimiento respecto a criterios de decisión definidos, incluyendo relaciones entre los criterios de decisión (funcionamiento en red).

Se demostró que el método empleado en la Estrategia 1 presenta limitaciones para abordar el problema de investigación planteado, ya que no permitió involucrar, dentro de la formulación del modelo, las restricciones asociadas a las relaciones que puede haber entre las medidas o alternativas de decisión, como precondition, contradicción o exclusión, entre otras. Asimismo, la ordenación o priorización de las medidas no responde a una selección

óptima de medidas cuando se tienen recursos de inversión limitados. Lo que se hace comúnmente es implementar las medidas según el orden de priorización obtenido, según el presupuesto disponible, sin embargo, esta selección puede no ser necesariamente la óptima, asimismo, no permite hacer una escogencia de medidas que responda a las relaciones que las vinculan.

En razón de las limitaciones encontradas y reportadas para la Estrategia 1 de análisis multicriterio, se exploró otra técnica de modelización del problema a partir de un híbrido entre ANP y optimización combinatoria. Se reportaron las ventajas, los avances y las limitaciones encontradas.

Con la segunda estrategia se propuso un modelo de optimización con variables binarias. La función objetivo buscó maximizar la efectividad de las medidas para reducir los impactos asociados al clima en el corto y largo plazo. Asimismo, permitió incorporar dentro del problema de decisión la maximización de la efectividad de las medidas cuando hay relaciones de facilitación, sinergia y contradicción. Por otro lado, se garantizó que el modelo arrojara una selección de medidas que cumpliera con restricciones de presupuesto, precondition y contradicción. La precondition garantiza que se implemente una medida que sea requerida para el funcionamiento o implementación de otra, esto no ocurre con los modelos de análisis multicriterio AHP o ANP. La inclusión de la restricción de contradicción garantiza que sólo se seleccione una medida de un conjunto de medidas que son excluyentes, lo cual tampoco es posible con las técnicas tradicionales de análisis multicriterio.

Teniendo en cuenta la revisión de literatura realizada sobre métodos, herramientas y limitaciones del proceso de selección de alternativas para adaptación al cambio climático, se cree que la formulación del problema de decisión, mediante un modelo de optimización que incorpora las relaciones de dependencia entre las alternativas planteadas por Taeliagh et al. (2013): precondition, sinergia, facilitación, contradicción potencial y contradicción; es nuevo en este campo.

A continuación, se presentan las conclusiones respecto a los objetivos específicos planteados para la tesis.

- Objetivo 1: Estudiar la literatura de métodos y técnicas de decisión para la selección y priorización de medidas.

Para el cumplimiento de este objetivo se hizo una revisión de compendios y artículos científicos sobre métodos y herramientas de decisión para adaptación al cambio climático, la cual fue reportada en los capítulos 1 y 3. Se encontró que los métodos más empleados para la selección de alternativas son los de análisis costo beneficio, análisis costo efectividad y análisis multicriterio; en este último sobresale la implementación de los modelos AHP y ANP, por lo cual se exploró en primera instancia para la resolución del problema de investigación.

- Objetivo 2: Establecer los criterios de evaluación, las restricciones y las relaciones de interdependencia que son requerimientos del modelo.

Con base en la revisión de literatura, se consideraron los criterios de efectividad, costos, complejidad técnica, complejidad institucional y aversión social; los cuales son abordados de diferente forma en las dos estrategias de modelización exploradas.

Adicionalmente, se consideraron en la formulación del modelo de decisión, restricciones de presupuesto y de dependencia entre alternativas, como las sugeridas por Taeihagh et al. (2013): precondition, facilitación, sinergia, contradicción potencial y contradicción (o exclusión).

- Objetivo 3: Desarrollar la metodología de priorización y selección.

Se desarrolló un modelo de decisión de análisis multicriterio con el cual se ordenaron y priorizaron las medidas de adaptación de un caso de aplicación, dicha priorización sugiere una selección de medidas a implementar. Teniendo en cuenta las limitaciones que fueron señaladas, se desarrolló una segunda estrategia de modelización con optimización combinatoria para encontrar una selección óptima de medidas. La segunda estrategia da respuesta a los requerimientos y propósitos del problema de investigación.

- Objetivo 4: Priorizar y seleccionar las medidas de adaptación para un caso seleccionado.

El capítulo 5 desarrolla los modelos de decisión propuestos bajo las Estrategias 1 y 2 para un territorio de pueblo en ladera, considerando las amenazas de sequía, vendaval,

movimiento en masa e incendio forestal, suponiendo un presupuesto disponible de 450 unidades monetarias, el modelo sugiere una selección óptima de 14 medidas de adaptación que cumplen en mayor medida con preferencias del decisor para reducir los impactos asociados a la dimensión de sociedad y de economía.

6.2 Recomendaciones

- En caso de que la metodología de decisión sea implementada, se recomienda hacer una evaluación de la efectividad de las medidas para la reducción de impactos a partir del consenso de un grupo amplio de expertos. El trabajo acá realizado es metodológico y las valoraciones de efectividad no tienen la suficiente rigurosidad en su estimación.
- En trabajos futuros, se podría analizar dentro del modelo de optimización aumentos deseados de capacidad adaptativa o de reducción de la vulnerabilidad, esto requiere de metodologías apropiadas para la medición y valoración de la vulnerabilidad existente y del potencial de reducción según la medida.

Bibliografía

Adams, W., & Saaty, R. W. (2003). Super Decisions Software Guide.

Agard, J., & Schipper, L. (Eds.). (2014). Annex II: Glossary. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1757–1776). Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-AnnexII_FINAL.pdf

Aguilar, A. M., & Bedoya, G. (2008). Informe de análisis inventario de pérdidas por desastres. Cali. Retrieved from <http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/r2/osso/Cons025-2006-CorporaciónOSSO-InformeColombia-1.8.pdf>

AIACC. (2016). About AIACC. Retrieved from http://www.start.org/Projects/AIACC_Project/about/about.html

Cardona, O. D., Aalst, M. K. van, Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R., ... Sinh, B. T. (2012). Determinants of Risk: Exposure and Vulnerability. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. J. D. Qin, Dokken, K. L. Ebi, ... P. M. Midgley (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (pp. 65–108). A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

Champalle, C., Ford, J., & Sherman, M. (2015). Prioritizing Climate Change Adaptations in Canadian Arctic Communities. *Sustainability*, 7. <https://doi.org/10.3390/su7079268>

DANE. (n.d.). Conceptos básicos. Retrieved from https://www.dane.gov.co/files/inf_geo/4Ge_ConceptosBasicos.pdf

Denny, M. (2014). Social Network Analysis. Institute for Social Science Research. Retrieved from http://www.mjdenny.com/workshops/SN_Theory_I.pdf

Dewulf, A., Meijerink, S., & Runhaar, H. (2015). Editorial: The governance of adaptation to

- climate change as a multi-level, multi-sector and multi-actor challenge: a European comparative perspective. *Journal of Water and Climate Change*, 6(1), 1–8.
<https://doi.org/10.2166/wcc.2014.000>
- Dittrich, R., Wreford, A., & Moran, D. (2016). A survey of decision-making approaches for climate change adaptation: Are robust methods the way forward? *Ecological Economics*, 122, 79–89.
- Dogulu, N., & Kentel, E. (2015). Prioritization and selection of climate change adaptation measures: a review of the literature. In *36th IAHR World Congress*. The Hague, Holanda. Retrieved from file:///D:/1. Biblioteca Carolina/Downloads/86871.pdf
- EPA. (2015). Global Greenhouse Gas Emissions Data. Retrieved from <http://www3.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html>
- FCM, & KAS. (2013). *Estrategias de Adaptación y Mitigación frente a los efectos del cambio climático en Regiones de Costa y Montaña de Colombia*. Federación Colombiana de Municipios. Retrieved from <https://www.fcm.org.co/Publicaciones/Libros/Manual-Cambio Climático.pdf>
- IISD. (2012). CRISTAL User's Manual. Version 5. Retrieved from https://www.iisd.org/pdf/2012/cristal_user_manual_v5_2012.pdf
- IPCC. (2014a). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Field, C.B., V. Ginebra, Suiza, Suiza. Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- IPCC. (2014b). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland. Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis. Methods and Software*. John Wiley & Sons.
- Lavell, A., Oppenheimer, M., Diop, C., Hess, J., Lempert, R., Li, J., ... Myeong, S. (2012). Climate Change: New Dimensions in Disaster Risk, Exposure, Vulnerability, and Resilience. In K. J. [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, and P. M. M. (eds.)]. A. S. R. of W. G. I. and I. of the Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, & I. P. on C. C. (IPCC) (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (pp.

- 25–64). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- Lim, B., & Spanger-Siegfried, E. (Eds.). (2004). *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures* (United Nat). New York, USA.
- Measham, T. G., Preston, B. L., Smith, T. F., Brooke, C., Withycombe, G., & Morrison, C. (2011). Adapting to climate change through local municipal planning: barriers and challenges. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(8), 889–909. <https://doi.org/10.1007/s11027-011-9301-2>
- Metroeconomica Limited. (2004). Costing the impacts of climate change in the UK. Retrieved from http://www.ukcip.org.uk/wp-content/PDFs/Costings_Implementation.pdf
- Mimura, N., Pulwarty, R. S., Duc, D. M., Elshinnawy, I., Redsteer, M. H., Huang, H. Q., ... Sanchez Rodriguez, R. A. (2014). Adaptation planning and implementation. In U. Cambridge University Press, Cambridge & U. Kingdom and New York, NY (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 869–898).
- Mizina, S. V., Smith, J. B., Gossen, E., Spiecker, K. F., & Witkowski, S. L. (1999). An evaluation of adaptation options for climate change impacts on agriculture in Kazakhstan. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4(1), 25–41. <https://doi.org/10.1023/A:1009626526883>
- Noble, I. R., Huq, S., Anokhin, Y., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F., ... Villamizar, A. (2014). Adaptation needs and options. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 833–868). Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap14_FINAL.pdf
- Oppenheimer, M., Campos, M., Warren, R., Birkmann, J., G. Luber, O'Neill, B., & Takahashi, K. (2014). Emergent risks and key vulnerabilities. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M.D. Mastrandrea, T. E. Bilir, ... L. L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1039–1099). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Revi, A., Satterthwaite, D. E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, M., Pelling, M., ... Solecki, W. (2014). Urban Areas. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 535–612). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap8_FINAL.pdf
- Saaty, R. W. (2016). *Decision making in complex environments. The Analytic Network Process (ANP) for Dependence and Feedback*. Pittsburgh.
- Saaty, T. (2006). Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. *EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH*, 168, 557–570.
- Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Saaty, T. (2016). SuperDecisions. Creative Decisions Foundation. Retrieved from http://sdbeta.superdecisions.com/downloads/index.php?section=win2_8
- Saaty, T., & Vargas, L. (2006). *Decision making with the Analytic Network Process. Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. Pittsburg: Springer.
- Schipper, L., Liu, W., Krawanchid, D., & Chanthy, S. (2010). *Review of climate change adaptation methods and tools. MRC Technical Paper No. 34*. Vientiane, Laos.
- SuperDecisions Software. Sample Models. (n.d.).
- Taeihagh, A., Givoni, M., & Bañares-Alcántara, R. (2013). Which policy first? A network-centric approach for the analysis and ranking of policy measures. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40, 595 – 616.
- UNAM. (2014). *Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable*. Retrieved from http://www.cco.gov.co/documentos/pdf/Libro Caracterizacion_Zona Costera_completo.pdf
- UN, & MADS. (2015). *Desarrollo de Herramientas de Educación y Formación para la implementación de la Estrategia de Educación, Formación y Sensibilización a Públicos sobre Cambio Climático en 2015*. Medellín.
- UNFCCC. (2008). *Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change*.

- UNFCCC. (2009). Step-by-step Guide for Implementing National Adaptation Programmes of Action. Retrieved from http://unfccc.int/resource/docs/publications/ldc_napa2009.pdf
- UNISDR. (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Ginebra, Suiza: Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR). Retrieved from http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- Willows, R. I., & Connell, R. K. (Eds.). (2003). *Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making* (UKCIP). Oxford, UK.

A. Anexo: Medidas de adaptación identificadas

Am.	Medida	Enfoque	Componente del riesgo al que se orienta
S	Educación, formación y sensibilización a la ciudadanía sobre la amenaza de sequía	AbEduc	Capacidad adaptativa
S	Conocimiento, investigación e innovación tecnológica – sequía	AbEduc	Capacidad adaptativa
S	Aprovechamiento de biodiversidad -sequía	AbComp	Capacidad adaptativa
S	Evitar la tala de árboles nativos - sequía	AbComp	Capacidad adaptativa
S	Conservación de humedales - sequía	AbComp	Capacidad adaptativa
S	Reglamentación de las actividades de quema y fijación de multas por malas prácticas - sequía	AbLey	Capacidad adaptativa
S	Implementación de estructuras para recolección y almacenamiento y /o circulación de agua - sequía	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
S	Utilización de aguas subterráneas y recarga artificial de acuíferos	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
S	Reutilización de aguas grises	AbComp	Sensibilidad-fragilidad
S	Implementación de sistemas de riego eficientes - sequía	AbTecn	Sensibilidad-fragilidad
S	Favorecimiento del reemplazo, o adaptación de los cultivos según sus condiciones térmicas - sequía	AbComp	Sensibilidad-fragilidad
S	Diversificación de cultivos	AbComp	Sensibilidad-fragilidad
S	Manejo y conservación de suelos agrícolas	AbComp	Sensibilidad-fragilidad
S	Manejo integrado de forrajes y pastos	AbComp	Sensibilidad-fragilidad
S	Seguro de cosechas y cubrimiento de daños según riesgo climático	AbEcon	Capacidad adaptativa
S	Diversificación de las fuentes de producción energética	AbTecn	Sensibilidad-fragilidad
S	Disminución del consumo de energía eléctrica en las edificaciones.	AbTecn	Sensibilidad-fragilidad
S	Reglamentación de multas por desperdicio de agua	AbLey	Capacidad adaptativa
I	Educación, formación y sensibilización a la ciudadanía sobre la amenaza de inundación	AbEduc	Capacidad adaptativa
I	Conocimiento, investigación e innovación tecnológica - inundaciones	AbEduc	Capacidad adaptativa

Am.	Medida	Enfoque	Componente del riesgo al que se orienta
I	Aprovechamiento de biodiversidad - inundaciones	AbComp	Capacidad adaptativa
I	Evitar la tala de árboles nativos - inundaciones	AbComp	Capacidad adaptativa
I	Conservación de humedales - inundaciones	AbEcos	Capacidad adaptativa
I	No construir ni asentarse en zonas de riesgo de inundación	AbComp	Exposición
I	Elaboración de mapas de riesgo para inundaciones	AbInfo	Capacidad adaptativa
I	Regulación del uso de la tierra - inundaciones	AbLey	Capacidad adaptativa
I	Sistema de alerta temprana - inundaciones	AbTecn	Capacidad adaptativa
I	Reubicación de población asentada en zonas de riesgo de inundación	AbPGob	Exposición
I	Adecuación y adaptación de la infraestructura - inundaciones	AbComp	Sensibilidad-fragilidad
I	Mantenimiento del sistema de drenaje urbano y del alcantarillado	AbServ	Sensibilidad-fragilidad
I	Separación de las redes de alcantarillado del drenaje urbano	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
I	Mantenimiento de cauces	AbServ	Sensibilidad-fragilidad
I	Revegetalización de taludes adyacentes al río	AbEcos	Sensibilidad-fragilidad
I	Pavimentos/suelos permeables	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
I	Construcción de canales (o cauces) de alivio	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
I	Cobertura de quebradas	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
I	Construcción de diques o jarillones	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
I	Restauración de cauces y componentes del sistema fluvial	AbEcos	Sensibilidad-fragilidad
M	Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de movimiento en masa	AbEduc	Capacidad adaptativa
M	Conocimiento, investigación e innovación tecnológica – movimientos en masa	AbEduc	Capacidad adaptativa
M	No construir ni asentarse en zonas de riesgo de movimientos en masa	AbComp	Exposición
M	Elaboración de mapas de riesgo de movimientos en masa	AbInfo	Capacidad adaptativa
M	Regulación del uso de la tierra - movimientos en masa	AbLey	Capacidad adaptativa
M	Sistema de alerta temprana - movimientos en masa	AbTecn	Capacidad adaptativa
M	Reubicación de población asentada en zonas de riesgo de movimientos en masa	AbPGob	Exposición
M	Reducción o abatimiento del ángulo de las pendientes	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
M	Obras para el control de material caído	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
M	Estabilización de taludes con revestimiento de cemento	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
M	Estabilización de taludes con revestimiento de vegetación	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
M	Estabilización de taludes con revestimiento mixto: vegetación y cemento	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad

Am.	Medida	Enfoque	Componente del riesgo al que se orienta
M	Estabilización de taludes mediante el control de aguas	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
V	Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de vendaval	AbEduc	Capacidad adaptativa
V	Sistema de alerta temprana - vendavales	AbTecn	Capacidad adaptativa
V	Adecuación y adaptación de la infraestructura - vendavales	AbComp	Sensibilidad-fragilidad
IF	Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de incendio forestal	AbEduc	Capacidad adaptativa
IF	Conocimiento, investigación e innovación tecnológica - incendios forestales	AbEduc	Capacidad adaptativa
IF	Sistema de alerta temprana - incendios forestales	AbTecn	Capacidad adaptativa
IF	Reglamentación de las actividades de quema y fijación de multas por malas prácticas - incendios forestales	AbLey	Capacidad adaptativa
IF	Franja aislante contrafuego	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
IF	Puntos de agua o reservorios	AbInfra	Sensibilidad-fragilidad
IF	Brigadas de bomberos forestales	AbServ	Capacidad adaptativa

Am.: amenaza natural. ID: identificador de la medida.

Fuente: Medidas identificadas por equipo interdisciplinario de expertos (UN & MADS, 2015), relaciones de dependencia establecidas por la autora.

B. Anexo: Valoración de las alternativas respecto a los criterios (territorio de pueblo en ladera)

Este anexo presenta la valoración asignada a las medidas de adaptación para amenazas de sequía, vendaval, movimientos en masa e incendios forestales en un pueblo ubicado en zona de ladera.

Cada medida recibió una valoración de efectividad en el corto y el largo plazo para reducir impactos en la infraestructura (identificados con color amarillo), en el ambiente (verde), la economía (color naranja) y la sociedad (azul). Asimismo, se indican las valoraciones asignadas a las medidas respecto a los criterios de costos de implementación, costos de mantenimiento, complejidad técnica, complejidad institucional y aversión social.

La valoración que se presenta en este anexo corresponde al valor final obtenido al multiplicar la valoración del experto (dada en una escala de 0 a 10) y el efecto multiplicador que provoca la gravedad de la amenaza (Ver Tabla 3-4: Valoración de la gravedad de las amenazas respecto a la generación de impactos en la dimensión social (territorio de ladera en pueblo), pág. 41 y Anexo: Gravedad de los impactos según la amenaza (territorio de pueblo en ladera), pág. 99).

Am	Medida	Enfoque	Daños estructurales en edificaciones		Daños y obstrucciones en vías		Daños en servicios de electricidad, agua,	
			CP	LP	CP	LP	CP	LP
			S	T01S_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc			
S	T02S_Conocimiento, investigación	AbEduc						
S	T03S_Aprovechamiento de biodiversidad	AbComp						
S	T04S_Evitar la tala de árboles nativos	AbComp						
S	T05S_Conservación de humedales	AbComp						
S	T12S_Reglamentación de las actividades	AbLey						
S	1S_Implementación de estructuras	AbInfra						
S	2S_Utilización de aguas subterráneas	AbInfra						
S	3S_Reutilización de aguas grises	AbComp						
S	4S_Implementación de sistemas de riego	AbTecn						
S	5S_Favorecimiento del reemplazo de cultivos	AbComp						
S	6S_Diversificación de cultivos	AbComp						
S	7S_Manejo y conservación de suelos	AbComp						
S	8S_Manejo integrado de forrajes	AbComp						
S	9S_Seguro de cosechas y cubiertas	AbEcon						
S	10S_Diversificación de las fuentes de agua	AbTecn						
S	11S_Disminución del consumo de agua	AbTecn						
S	12S_Reglamentación de multas por consumo excesivo	AbLey						
V	T01V_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	4			0	4
V	T09V_Sistema de alerta temprana	AbTecn	4	4			4	4
V	T11V_Adecuación y adaptación de infraestructura	AbComp	20	20			20	20
M	T01M_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	9	0	8	0	8
M	T02M_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	9	0	8	0	8
M	T06M_No construir ni asentarse en zonas de riesgo	AbComp	0	27	0	24	0	24
M	T07M_Elaboración de mapas de riesgo	AbInfo	0	18	0	16	0	16
M	T08M_Regulación del uso de las zonas de riesgo	AbLey	0	36	0	32	0	32
M	T09M_Sistema de alerta temprana	AbTecn	0	0	0	0	0	0
M	T10M_Reubicación de población en zonas de riesgo	AbPGob	45	45	48	40	40	40
M	22M_Reducción o abatimiento de inundaciones	AbInfra	36	36	32	32	32	32
M	23M_Obras para el control de inundaciones	AbInfra	9	9	8	8	8	8
M	24M_Estabilización de taludes con vegetación	AbInfra	18	18	24	16	16	16
M	25M_Estabilización de taludes con muros	AbInfra	18	18	16	24	16	16
M	26M_Estabilización de taludes con muros	AbInfra	18	18	16	24	16	16
M	27M_Estabilización de taludes con muros	AbInfra	18	27	16	24	16	24
IF	T01IF_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	5			0	7
IF	T02IF_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	5			0	7
IF	T09IF_Sistema de alerta temprana	AbTecn	5	15			7	21
IF	T12IF_Reglamentación de las actividades	AbLey	5	10			7	14
IF	28IF_Franja aislante contra incendios	AbInfra	25	20			35	28
IF	29IF_Puntos de agua o reservorios	AbInfra	15	15			21	21
IF	31IF_Brigadas de bomberos forestales	AbServ	20	25			35	35

Am	Medida	Enfoque	Contaminación de fuentes hídricas como		Reducción de la calidad del agua		Erosión de tierras	
			CP	LP	CP	LP	CP	LP
			S	T01S_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc			0
S	T02S_Conocimiento, investigación	AbEduc			0	6	0	3
S	T03S_Aprovechamiento de biodiversidad	AbComp			0	0	0	0
S	T04S_Evitar la tala de árboles nativos	AbComp			0	0	0	0
S	T05S_Conservación de humedales	AbComp			0	0	3	3
S	T12S_Reglamentación de las actividades	AbLey			0	6	0	9
S	1S_Implementación de estructuras	AbInfra			12	12	0	-3
S	2S_Utilización de aguas subterráneas	AbInfra			6	6	0	-3
S	3S_Reutilización de aguas grises	AbComp			6	6	0	0
S	4S_Implementación de sistemas de riego	AbTecn			6	6	0	0
S	5S_Favorecimiento del reemplazo de especies	AbComp			6	12	0	0
S	6S_Diversificación de cultivos	AbComp			0	0	3	6
S	7S_Manejo y conservación de suelos	AbComp			0	0	0	6
S	8S_Manejo integrado de forrajes	AbComp			0	6	0	0
S	9S_Seguro de cosechas y cubiertas verdes	AbEcon			0	6	0	0
S	10S_Diversificación de las fuentes de agua	AbTecn			0	0	0	0
S	11S_Disminución del consumo de agua	AbTecn			0	0	0	0
S	12S_Reglamentación de multas por contaminación	AbLey			0	6	0	3
V	T01V_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc						
V	T09V_Sistema de alerta temprana	AbTecn						
V	T11V_Adecuación y adaptación de cultivos	AbComp						
M	T01M_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	4				
M	T02M_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	4				
M	T06M_No construir ni asentarse en zonas de riesgo	AbComp	0	0				
M	T07M_Elaboración de mapas de riesgo	AbInfo	0	0				
M	T08M_Regulación del uso de las zonas de riesgo	AbLey	0	12				
M	T09M_Sistema de alerta temprana	AbTecn	0	0				
M	T10M_Reubicación de población en zonas de riesgo	AbPGob	0	4				
M	22M_Reducción o abatimiento de ríos	AbInfra	4	4				
M	23M_Obras para el control de ríos	AbInfra	4	4				
M	24M_Estabilización de taludes con vegetación	AbInfra	4	4				
M	25M_Estabilización de taludes con estructuras	AbInfra	4	4				
M	26M_Estabilización de taludes con estructuras	AbInfra	4	4				
M	27M_Estabilización de taludes con estructuras	AbInfra	12	12				
IF	T01IF_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc						
IF	T02IF_Conocimiento, investigación	AbEduc						
IF	T09IF_Sistema de alerta temprana	AbTecn						
IF	T12IF_Reglamentación de las actividades	AbLey						
IF	28IF_Franja aislante contra incendios	AbInfra						
IF	29IF_Puntos de agua o reservorios	AbInfra						
IF	31IF_Brigadas de bomberos forestales	AbServ						

Am	Medida	Enfoque	Pérdida de flora y fauna/Deteriorio de		Deterioro del suelo, susceptibilidad a la		Alteración del microclima por menor		Incremento del efecto invernadero	
			CP	LP	CP	LP	CP	LP	CP	LP
S	T01S_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	3						
S	T02S_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	3						
S	T03S_Aprovechamiento de biodiversidad	AbComp	3	3						
S	T04S_Evitar la tala de árboles nativos	AbComp	6	6						
S	T05S_Conservación de humedales	AbComp	9	9						
S	T12S_Reglamentación de las actividades	AbLey	0	12						
S	1S_Implementación de estructuras	AbInfra	-3	-3						
S	2S_Utilización de aguas subterráneas	AbInfra	0	-3						
S	3S_Reutilización de aguas grises	AbComp	3	3						
S	4S_Implementación de sistemas	AbTecn	3	3						
S	5S_Favorecimiento del reemplazo	AbComp	3	3						
S	6S_Diversificación de cultivos	AbComp	3	9						
S	7S_Manejo y conservación de suelos	AbComp	0	0						
S	8S_Manejo integrado de forrajes	AbComp	0	0						
S	9S_Seguro de cosechas y cubiertas	AbEcon	0	3						
S	10S_Diversificación de las fuentes	AbTecn	0	0						
S	11S_Disminución del consumo de agua	AbTecn	0	0						
S	12S_Reglamentación de multas	AbLey	0	3						
V	T01V_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	2						
V	T09V_Sistema de alerta temprana	AbTecn	2	2						
V	T11V_Adecuación y adaptación	AbComp	0	0						
M	T01M_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc								
M	T02M_Conocimiento, investigación	AbEduc								
M	T06M_No construir ni asentarse	AbComp								
M	T07M_Elaboración de mapas de riesgo	AbInfo								
M	T08M_Regulación del uso de la tierra	AbLey								
M	T09M_Sistema de alerta temprana	AbTecn								
M	T10M_Reubicación de población	AbPGob								
M	22M_Reducción o abatimiento de ruidos	AbInfra								
M	23M_Obras para el control de ruidos	AbInfra								
M	24M_Estabilización de taludes costeros	AbInfra								
M	25M_Estabilización de taludes costeros	AbInfra								
M	26M_Estabilización de taludes costeros	AbInfra								
M	27M_Estabilización de taludes marinos	AbInfra								
IF	T01IF_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	6	0	5	0	5	0	3
IF	T02IF_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	6	0	5	0	5	0	3
IF	T09IF_Sistema de alerta temprana	AbTecn	0	6	0	5	0	5	0	3
IF	T12IF_Reglamentación de las actividades	AbLey	6	12	5	10	5	10	3	6
IF	28IF_Franja aislante contra fuegos	AbInfra	24	18	20	15	15	10	3	3
IF	29IF_Puntos de agua o reservorios	AbInfra	12	12	10	10	5	5	3	3
IF	31IF_Brigadas de bomberos forestales	AbServ	12	12	10	10	10	10	6	6

Am	Medida	Enfoque	Pérdida de producción		Obstaculización del paso de vehículos de		Aumento de precios de la energía	
			CP	LP	CP	LP	CP	LP
S	T01S_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	10			0	10
S	T02S_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	10			0	10
S	T03S_Aprovechamiento de biodiversidad	AbComp	0	0			0	0
S	T04S_Evitar la tala de árboles nativos	AbComp	0	0			0	0
S	T05S_Conservación de humedales	AbComp	0	0			0	0
S	T12S_Reglamentación de las actividades	AbLey	0	10			0	0
S	1S_Implementación de estructuras	AbInfra	50	20			10	10
S	2S_Utilización de aguas subterráneas	AbInfra	50	20			10	10
S	3S_Reutilización de aguas grises	AbComp	10	10			0	0
S	4S_Implementación de sistemas de riego	AbTecn	50	40			10	10
S	5S_Favorecimiento del reemplazo de especies	AbComp	40	60			10	20
S	6S_Diversificación de cultivos	AbComp	20	30			10	10
S	7S_Manejo y conservación de suelos	AbComp	20	30			0	0
S	8S_Manejo integrado de forraje	AbComp	30	20			0	0
S	9S_Seguro de cosechas y cubiertas verdes	AbEcon	40	20			10	10
S	10S_Diversificación de las fuentes de agua	AbTecn	0	0			40	40
S	11S_Disminución del consumo de agua	AbTecn	0	0			30	30
S	12S_Reglamentación de multas por contaminación	AbLey	0	10			0	10
V	T01V_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	3				
V	T09V_Sistema de alerta temprana	AbTecn	3	3				
V	T11V_Adecuación y adaptación de cultivos	AbComp	0	0				
M	T01M_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	4	0	8		
M	T02M_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	4	0	8		
M	T06M_No construir ni asentarse en zonas de riesgo	AbComp	0	12	0	32		
M	T07M_Elaboración de mapas de riesgo	AbInfo	0	4	0	16		
M	T08M_Regulación del uso de las zonas de riesgo	AbLey	0	12	0	32		
M	T09M_Sistema de alerta temprana	AbTecn	0	0	0	0		
M	T10M_Reubicación de población en zonas de riesgo	AbPGob	0	8	0	16		
M	22M_Reducción o abatimiento de riego	AbInfra	8	8	24	24		
M	23M_Obras para el control de riego	AbInfra	4	4	8	8		
M	24M_Estabilización de taludes con riego	AbInfra	4	4	24	16		
M	25M_Estabilización de taludes con riego	AbInfra	4	4	16	24		
M	26M_Estabilización de taludes con riego	AbInfra	4	4	16	24		
M	27M_Estabilización de taludes con riego	AbInfra	8	12	16	24		
IF	T01IF_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc						
IF	T02IF_Conocimiento, investigación	AbEduc						
IF	T09IF_Sistema de alerta temprana	AbTecn						
IF	T12IF_Reglamentación de las actividades	AbLey						
IF	28IF_Franja aislante contra fuegos	AbInfra						
IF	29IF_Puntos de agua o reservorios	AbInfra						
IF	31IF_Brigadas de bomberos forestales	AbServ						

Am	Medida	Enfoque	Aumento de los costos del agua		Pérdida de servicios ecosistémicos		Pérdida de elementos	
			CP	LP	CP	LP	CP	LP
S	T01S_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	10	0	5		
S	T02S_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	10	0	5		
S	T03S_Aprovechamiento de biodiversidad	AbComp	0	0	5	5		
S	T04S_Evitar la tala de árboles nativos	AbComp	0	0	5	5		
S	T05S_Conservación de humedales	AbComp	0	0	20	20		
S	T12S_Reglamentación de las actividades	AbLey	0	10	0	15		
S	1S_Implementación de estructuras	AbInfra	10	10	-5	-5		
S	2S_Utilización de aguas subterráneas	AbInfra	10	10	-5	-5		
S	3S_Reutilización de aguas grises	AbComp	10	10	5	5		
S	4S_Implementación de sistemas	AbTecn	10	10	5	5		
S	5S_Favorecimiento del reemplazo	AbComp	10	20	5	15		
S	6S_Diversificación de cultivos	AbComp	0	10	0	10		
S	7S_Manejo y conservación de suelos	AbComp	0	10	0	0		
S	8S_Manejo integrado de forraje	AbComp	0	10	0	0		
S	9S_Seguro de cosechas y cubiertas	AbEcon	10	10	0	5		
S	10S_Diversificación de las fuentes	AbTecn	30	30	0	0		
S	11S_Disminución del consumo de agua	AbTecn	0	10	0	0		
S	12S_Reglamentación de multas	AbLey	0	10	0	5		
V	T01V_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc						
V	T09V_Sistema de alerta temprana	AbTecn						
V	T11V_Adecuación y adaptación	AbComp						
M	T01M_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc						
M	T02M_Conocimiento, investigación	AbEduc						
M	T06M_No construir ni asentarse	AbComp						
M	T07M_Elaboración de mapas de riesgo	AbInfo						
M	T08M_Regulación del uso de la tierra	AbLey						
M	T09M_Sistema de alerta temprana	AbTecn						
M	T10M_Reubicación de población	AbPGob						
M	22M_Reducción o abatimiento de ríos	AbInfra						
M	23M_Obras para el control de ríos	AbInfra						
M	24M_Estabilización de taludes con vegetación	AbInfra						
M	25M_Estabilización de taludes con vegetación	AbInfra						
M	26M_Estabilización de taludes con vegetación	AbInfra						
M	27M_Estabilización de taludes con vegetación	AbInfra						
IF	T01IF_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc					0	7
IF	T02IF_Conocimiento, investigación	AbEduc					0	7
IF	T09IF_Sistema de alerta temprana	AbTecn					14	28
IF	T12IF_Reglamentación de las actividades	AbLey					7	14
IF	28IF_Franja aislante contrafuego	AbInfra					35	35
IF	29IF_Puntos de agua o reservorios	AbInfra					28	28
IF	31IF_Brigadas de bomberos forestales	AbServ					21	21

Am	Medida	Enfoque	Muertes y/o lesiones en la población		Desempleo rural y disminución de		Inseguridad del agua para consumo		Inseguridad alimentaria y	
			CP	LP	CP	LP	CP	LP	CP	LP
S	T01S_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc			0	10	0	10	0	10
S	T02S_Conocimiento, investigación	AbEduc			0	10	0	10	0	10
S	T03S_Aprovechamiento de biodiversidad	AbComp			20	40	0	0	10	30
S	T04S_Evitar la tala de árboles nativos	AbComp			0	0	0	0	0	0
S	T05S_Conservación de humedales	AbComp			0	0	10	10	20	20
S	T12S_Reglamentación de las actividades	AbLey			0	0	0	10	0	10
S	15_Implementación de estructuras	AbInfra			30	20	80	80	50	30
S	25_Utilización de aguas subterráneas	AbInfra			30	20	80	80	50	30
S	35_Reutilización de aguas grises	AbComp			10	10	10	10	10	10
S	45_Implementación de sistemas	AbTecn			40	30	30	40	30	40
S	55_Favorecimiento del reemplazo	AbComp			20	50	40	70	40	60
S	65_Diversificación de cultivos	AbComp			0	20	0	10	0	40
S	75_Manejo y conservación de suelos	AbComp			10	30	0	10	10	30
S	85_Manejo integrado de forrajes	AbComp			10	20	0	10	10	30
S	95_Seguro de cosechas y cubiertas	AbEcon			20	20	10	20	10	20
S	105_Diversificación de las fuentes	AbTecn			0	0	0	0	0	0
S	115_Disminución del consumo de agua	AbTecn			0	10	0	0	0	0
S	125_Reglamentación de multas	AbLey			0	10	0	10	0	10
V	T01V_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	3						
V	T09V_Sistema de alerta temprana	AbTecn	3	3						
V	T11V_Adecuación y adaptación	AbComp	15	15						
M	T01M_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	8	0	5				
M	T02M_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	8	0	5				
M	T06M_No construir ni asentarse	AbComp	8	56	0	0				
M	T07M_Elaboración de mapas de riesgo	AbInfo	0	24	0	0				
M	T08M_Regulación del uso de la tierra	AbLey	0	32	0	10				
M	T09M_Sistema de alerta temprana	AbTecn	16	48	0	0				
M	T10M_Reubicación de población	AbPGob	64	48	0	0				
M	22M_Reducción o abatimiento de riesgos	AbInfra	32	32	0	0				
M	23M_Obras para el control de riesgos	AbInfra	8	8	0	0				
M	24M_Estabilización de taludes críticos	AbInfra	8	8	0	0				
M	25M_Estabilización de taludes críticos	AbInfra	8	16	0	0				
M	26M_Estabilización de taludes críticos	AbInfra	8	8	0	0				
M	27M_Estabilización de taludes críticos	AbInfra	16	16	5	5				
IF	T01IF_Educación, formar y sensibilizar	AbEduc	0	4	0	4				
IF	T02IF_Conocimiento, investigación	AbEduc	0	4	0	4				
IF	T09IF_Sistema de alerta temprana	AbTecn	20	28	0	4				
IF	T12IF_Reglamentación de las actividades	AbLey	4	8	4	8				
IF	28IF_Franja aislante contra fuegos	AbInfra	28	28	8	8				
IF	29IF_Puntos de agua o reservorios	AbInfra	20	20	0	4				
IF	31IF_Brigadas de bomberos forestales	AbServ	36	36	4	8				

Am	Medida	VBD ↓	VBD ↓	VBD ↓	VBD ↓	VBD ↓
		Costo de implementación	Costo de mto	Complejidad técnica	Complejidad institucional	Aversión social
S	T01S_Educar,	20	Bajo anual	Baja	Baja	Baja
S	T02S_Conocim	30	Medio anual	Baja	Moderada	Baja
S	T03S_Aprovech	30	Medio anual	Baja	Alta	Baja
S	T04S_Evitar la	10	Bajo cada 3-5 años	Muy baja	Moderada	Moderada
S	T05S_Conserva	20	Bajo anual	Baja	Moderada	Moderada
S	T12S_Reglame	10	Ninguno	Muy baja	Muy baja	Alta
S	1S_Implement	50	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Baja
S	2S_Utilización	50	Medio anual	Alta	Baja	Baja
S	3S_Reutilizaci	10	Bajo cada 3-5 años	Moderada	Muy baja	Alta
S	4S_Implement	40	Bajo anual	Moderada	Baja	Moderada
S	5S_Favorecimi	60	Medio anual	Alta	Moderada	Moderada
S	6S_Diversificad	30	Bajo anual	Alta	Baja	Moderada
S	7S_Manejo y d	20	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Moderada
S	8S_Manejo int	20	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Moderada
S	9S_Seguro de	70	Alto anual	Moderada	Muy alta	Muy baja
S	10S_Diversifica	60	Bajo anual	Moderada	Moderada	Moderada
S	11S_Disminuci	10	Bajo cada 3-5 años	Baja	Baja	Baja
S	12S_Reglame	10	Ninguno	Baja	Muy baja	Alta
V	T01V_Educar,	20	Bajo anual	Baja	Baja	Baja
V	T09V_Sistema	40	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Moderada
V	T11V_Adecuac	10	Bajo cada 3-5 años	Baja	Muy baja	Moderada
M	T01M_Educar,	20	Bajo anual	Baja	Baja	Baja
M	T02M_Conocim	30	Medio anual	Baja	Moderada	Baja
M	T06M_No cons	0	Ninguno	Muy baja	Muy baja	Alta
M	T07M_Elabora	30	Ninguno	Moderada	Muy baja	Muy baja
M	T08M_Regulac	10	Ninguno	Moderada	Moderada	Moderada
M	T09M_Sistema	40	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Moderada
M	T10M_Reubica	60	Ninguno	Moderada	Moderada	Muy alta
M	22M_Reducció	30	Medio cada 3-5 años	Moderada	Muy baja	Baja
M	23M_Obras pa	30	Bajo cada 3-5 años	Baja	Muy baja	Baja
M	24M_Estabiliza	30	Bajo cada 3-5 años	Moderada	Muy baja	Baja
M	25M_Estabiliza	40	Medio cada 3-5 años	Moderada	Muy baja	Baja
M	26M_Estabiliza	30	Medio cada 3-5 años	Moderada	Muy baja	Baja
M	27M_Estabiliza	30	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Baja
IF	T01IF_Educar,	20	Bajo anual	Baja	Baja	Baja
IF	T02IF_Conocim	30	Medio anual	Baja	Moderada	Baja
IF	T09IF_Sistema	40	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Moderada
IF	T12IF_Reglame	10	Ninguno	Muy baja	Muy baja	Alta
IF	28IF_Franja ais	40	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Baja
IF	29IF_Puntos d	40	Bajo anual	Moderada	Muy baja	Baja
IF	31IF_Brigadas	40	Medio anual	Baja	Baja	Baja

C. Anexo: Gravedad de los impactos según la amenaza (territorio de pueblo en ladera)

Impactos en la dimensión de infraestructura

Amenaza	Daños estructurales en edificaciones	Daños y obstrucciones en vías de transporte	Daños en servicios de electricidad, agua, comunicaciones, alcantarillado y manejo de desechos sólidos
Sequía	0	0	0
Vendaval	4	0	4
Movimiento en masa	9	8	8
Incendio forestal	5	0	7

Impactos en la dimensión de ambiente

Amenaza	Contaminación de fuentes hídricas como pozos abiertos o fuentes de agua subterránea	Reducción de la calidad del agua	Erosión de tierras	Pérdida de flora y fauna/Deterioro de ecosistemas
Sequía	0	6	3	3
Vendaval	0	0	0	2
Movimiento en masa	4	0	0	0
Incendio forestal	0	0	0	6

Amenaza	Deterioro del suelo, susceptibilidad a la erosión	Alteración del microclima por menor cantidad de plantas que retengan oxígeno.	Incremento del efecto invernadero en la atmósfera terrestre por humo producto de la combustión.
Sequía	0	0	0
Vendaval	0	0	0
Movimiento en masa	0	0	0
Incendio forestal	5	5	3

Impactos en la dimensión de economía

Amenaza	Pérdida de producción agrícola/forestal/pesqu	Obstaculización del paso de vehículos de	Aumento de precios de la energía
Sequía	10	0	10
Vendaval	3	0	0
Movimiento en masa	4	8	0
Incendio forestal	7	0	0

Amenaza	Aumento de los costos del agua	Pérdida de servicios ecosistémicos	Pérdida de elementos del sistema productivo (máquina de caña,
Sequía	10	5	0
Vendaval	0	0	0
Movimiento en masa	0	0	0
Incendio forestal	0	0	7

Impactos en la dimensión de sociedad

Amenaza	Muertes y/o lesiones en la población	Desempleo rural y disminución de ingresos de los campesinos	Inseguridad del agua para consumo humano	Inseguridad alimentaria y deterioro del estado nutricional
Sequía	0	10	10	10
Vendaval	3	0	0	0
Movimiento en masa	8	5	0	0
Incendio forestal	4	4	0	0

D. Anexo: Construcción del modelo BCR (Estrategia 1)

Preferencias establecidas en la jerarquía del modelo

Preferencias en la red principal

Inconsistency:		
1. Efecti~		0.50000
2. Costos		0.30000
3. Riesgos		0.20000

Preferencias en la subred de efectividad

Inconsistency: 0.00000		
Corto pla~		0.40000
Largo pla~		0.60000

Preferencias en la subred de costos

Inconsistency: 0.00000		
1Costo de~		0.60000
2Costo de~		0.40000

Preferencias en la subred de riesgos

Inconsistency: 0.00000		
1Compleji~		0.33333
2Compleji~		0.33333
3Aversión~		0.33333

Preferencias en subredes CP y LP - dimensiones

Inconsistency: 0.00000		
1INFRAEST~		0.20000
2AMBIENTE~		0.25000
3ECONOMIA~		0.25000
4SOCIEDAD~		0.30000

Preferencias en subredes CP y LP - Infraestructura

Inconsistency: 0.00000		
11Daños e~		0.33333
12Daños e~		0.33333
13Daños e~		0.33333

Preferencias en subredes CP y LP - Ambiente

Inconsistency: 0.00000		
21Contam ~		0.20000
22Reduc c~		0.20000
23Erosión~		0.18000
24Pérdida~		0.15000
25Deterio~		0.10000
26Alterac~		0.10000
27Increme~		0.07000

Preferencias en subredes CP y LP - Economía

Inconsistency: 0.00000		
31Pérdida~		0.22000
32Interru~		0.12000
33Aumento~		0.18000
34Aumento~		0.16000
35Pérdida~		0.20000
36Pérdida~		0.12000

Preferencias en subredes CP y LP - Sociedad

Inconsistency: 0.00000		
41Muertes~		0.35000
42Desempl~		0.20000
43Insegur~		0.25000
44Insegur~		0.20000

Escala de ratings para valoración de las alternativas respecto a los criterios

Efectividad de corto plazo

Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire	Direct
Negativa (-5 a -3)		0.004		
Nula (0)		0.013		
Casi nula (2 a 4)		0.025		
Muy baja (5 a 10)		0.05		
Baja (12 a 16)		0.076		
Media (18 a 25)		0.101		
Buena (28 a 35)		0.126		
Muy buena (36 a 45)		0.151		
Muy alta (48 a 64)		0.202		
Súper alta (80)		0.252		

Efectividad de largo plazo

Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire	Direct
Negativa (-5 a -3)		0.004		
Nula (0)		0.013		
Casi nula (2 a 4)		0.025		
Muy baja (5 a 10)		0.05		
Baja (12 a 16)		0.076		
Media (18 a 25)		0.101		
Buena (27 a 35)		0.126		
Muy buena (36 a 45)		0.151		
Muy alta (48 a 60)		0.202		
Súper alta (70 a 80)		0.252		

Costos de implementación

0	0.00001
10	0.02997
20	0.05994
30	0.08995
40	0.11998
50	0.16982
60	0.23016
70	0.30017

Costos de mantenimiento

Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire	Direct
Ninguno		0.00001		
Bajo cada 3-5 años		0.03999		
Medio cada 3-5 años		0.07999		
Alto cada 3-5 años		0.12996		
Bajo anual		0.18978		
Medio anual		0.24996		
Alto anual		0.31031		

Riesgos

Muy baja	0.04
Baja	0.11
Moderada	0.19
Alta	0.28
Muy alta	0.38

E. Anexo: Relaciones entre las alternativas

Am.	ID	Medida	Relaciones
S	T01	T01S_Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de sequía	Facilita a: T04S, T05S, 3, 5, 6, 10
S	T02	T02S_Conocimiento, investigación e innovación tecnológica – sequía	Facilita a: 5, 6, 10, 11
S	T03	T03S_Aprovechamiento de biodiversidad -sequía	
S	T04	T04S_Evitar la tala de árboles nativos - sequía	
S	T05	T05S_Conservación de humedales - sequía	
S	T12	T12S_Reglamentación de las actividades de quema y fijación de multas por malas prácticas - sequía	
S	1	1S_Implementación de estructuras para recolección y almacenamiento y /o circulación de agua - sequía	
S	2	2S_Utilización de aguas subterráneas y recarga artificial de acuíferos	
S	3	3S_Reutilización de aguas grises	
S	4	4S_Implementación de sistemas de riego eficientes - sequía	
S	5	5S_Favorecimiento del reemplazo, o adaptación de los cultivos según sus condiciones térmicas - sequía	
S	6	6S_Diversificación de cultivos	
S	7	7S_Manejo y conservación de suelos agrícolas	
S	8	8S_Manejo integrado de forrajes y pastos	
S	9	9S_Seguro de cosechas y cubrimiento de daños según riesgo climático	
S	10	10S_Diversificación de las fuentes de producción energética	
S	11	11S_Disminución del consumo de energía eléctrica en las edificaciones.	
S	12	12S_Reglamentación de multas por desperdicio de agua	
I	T01	T01I_Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de inundación	Facilita a: T04I, T05I, T06I, T09I, T11I
I	T02	T02I_Conocimiento, investigación e innovación tecnológica - inundaciones	Facilita a: T07I, T09I
I	T03	T03I_Aprovechamiento de biodiversidad - inundaciones	
I	T04	T04I_Evitar la tala de árboles nativos - inundaciones	
I	T05	T05I_Conservación de humedales - inundaciones	

Am.	ID	Medida	Relaciones
I	T06	T06I_No construir ni asentarse en zonas de riesgo de inundación	
I	T07	T07I_Elaboración de mapas de riesgo para inundaciones	Es precondition de: T06I, T08I, T10I
I	T08	T08I_Regulación del uso de la tierra - inundaciones	Facilita a: T06I
I	T09	T09I_Sistema de alerta temprana - inundaciones	
I	T10	T10I_Reubicación de población asentada en zonas de riesgo de inundación	
I	T11	T11I_Adecuación y adaptación de la infraestructura - inundaciones	
I	13	13I_Mantenimiento del sistema de drenaje urbano y del alcantarillado	
I	14	14I_Separación de las redes de alcantarillado del drenaje urbano	
I	15	15I_Mantenimiento de cauces	
I	16	16I_Revegetalización de taludes adyacentes al río	
I	17	17I_Pavimentos/suelos permeables	
I	18	18I_Construcción de canales (o cauces) de alivio	
I	19	19I_Cobertura de quebradas	
I	20	20I_Construcción de diques o jarillones	
I	21	21I_Restauración de cauces y componentes del sistema fluvial	
M	T01	T01M_Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de movimiento en masa	Facilita a: T06M, T09M
M	T02	T02M_Conocimiento, investigación e innovación tecnológica – movimientos en masa	Facilita a: T07M, T09M
M	T06	T06M_No construir ni asentarse en zonas de riesgo de movimientos en masa	
M	T07	T07M_Elaboración de mapas de riesgo de movimientos en masa	Es precondition de: T06M, T08M, T10M
M	T08	T08M_Regulación del uso de la tierra - movimientos en masa	Facilita a: T06M
M	T09	T09M_Sistema de alerta temprana - movimientos en masa	
M	T10	T10M_Reubicación de población asentada en zonas de riesgo de movimientos en masa	
M	22	22M_Reducción o abatimiento del ángulo de las pendientes	
M	23	23M_Obras para el control de material caído	
M	24	24M_Estabilización de taludes con revestimiento de cemento	Es contradictoria con: 25, 26
M	25	25M_Estabilización de taludes con revestimiento de vegetación	Es contradictoria con: 24, 26
M	26	26M_Estabilización de taludes con revestimiento mixto: vegetación y cemento	Es contradictoria con: 24, 25
M	27	27M_Estabilización de taludes mediante el control de aguas	
V	T01	T01V_Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de vendaval	Facilita a: T09V, T11V
V	T09	T09V_Sistema de alerta temprana - vendavales	

Am.	ID	Medida	Relaciones
V	T11	T11V_Adecuación y adaptación de la infraestructura - vendavales	
IF	T01	T01IF_Educación, formar y sensibilizar a la ciudadanía sobre la amenaza de incendio forestal	Facilita a: T09IF
IF	T02	T02IF_Conocimiento, investigación e innovación tecnológica - incendios forestales	Facilita a: T09IF
IF	T09	T09IF_Sistema de alerta temprana - incendios forestales	
IF	T12	T12IF_Reglamentación de las actividades de quema y fijación de multas por malas prácticas - incendios forestales	
IF	28	28IF_Franja aislante contrafuego	
IF	29	29IF_Puntos de agua o reservorios	
IF	31	31IF_Brigadas de bomberos forestales	

Am.: amenaza natural. ID: identificador de la medida.

Fuente: Medidas identificadas en proyecto de investigación de la Universidad Nacional de Colombia y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015), relaciones de dependencia asumidas por la autora.

F. Anexo: Resultados de la Estrategia 1: modelo BCR en SuperDecisions

Graphic	Alternatives	Ranking B+1/C+1/√I	Ranking Efectividad	Ranking Costos	Ranking Riesgos
0,5030	T10M_Reubicación de población	1	1	16	1
0,3998	22M_Reducción o abatimiento de	2	2	29	27
0,3942	55_Favorecimiento del reemplazo	3	3	6	2
0,3648	31IF_Brigadas de bomberos fores	4	4	5	39
0,3619	15_Implementación de estructur	5	5	3	25
0,3607	T06M_No construir ni asentarse e	6	8	41	23
0,3544	25_Utilización de aguas subterrÁ	7	6	27	9
0,3425	28IF_Franja aislante contrafuego	8	7	14	32
0,3136	27M_Estabilización de taludes - c	9	9	18	31
0,2978	4S_Implementación de sistemas d	10	10	4	11
0,2789	T08M_Regulación del uso de la tí	11	11	39	6
0,2674	29IF_Puntos de agua o reservorio	12	12	15	33
0,2639	T09M_Sistema de alerta tempran	13	13	12	17
0,2632	T09IF_Sistema de alerta tempran	14	14	13	18
0,2537	25M_Estabilización de taludes - w	15	15	26	29
0,2299	26M_Estabilización de taludes - m	16	16	30	30
0,2281	24M_Estabilización de taludes - c	17	17	33	28
0,2008	9S_Seguro de cosechas	18	18	1	3
0,1956	T07M_Elaboración de mapas de r	19	19	34	40
0,1926	T11V_Adecuación y adaptación d	20	20	31	26
0,1740	23M_Obras para el control de ma	21	21	32	41
0,1598	6S_Diversificación de cultivos	22	22	17	4
0,1552	T12IF_Reglamentación de las acti	23	23	40	24
0,1536	7S_Manejo y conservación de su	24	24	21	14
0,1444	8S_Manejo integrado de forrajes	25	25	22	15
0,1326	T01M_Educación, formar y sensibiliza	26	27	24	37
0,1315	3S_Reutilización de aguas grises	27	26	28	7
0,1313	T02M_Conocimiento, investigaci	28	28	9	20
0,1254	T05S_Conservación de humedales	29	29	20	10
0,1227	T03S_Aprovechamiento de biodiv	30	30	8	8
0,1060	T01S_Educación, formar y sensibiliza	31	31	19	34
0,1053	T12S_Reglamentación de las activ	32	34	37	22
0,1046	T02S_Conocimiento, investigaci	33	32	7	19
0,1043	12S_Reglamentación de multas pe	34	33	38	12
0,0923	10S_Diversif. de las fuentes de pr	35	35	2	5
0,0876	T01IF_Educación, formar y sensibiliza	36	36	25	38
0,0862	T02IF_Conocimiento, investigaci	37	37	10	21
0,0824	11S_Disminución del consumo de	38	38	36	35
0,0699	T09V_Sistema de alerta temprana	39	39	11	16
0,0595	T04S_Evitar la tala de Árboles na	40	40	35	13
0,0588	T01V_Educación, formar y sensibiliza	41	41	23	36

G. Anexo: Resultados de la Estrategia 2: modelo de optimización

ID	Xi	Ecp =	Elp=	ET= Ecp+Elp	Costo
		$\sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} W_k * Ecp_{i,k} * X_i$	$\sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} W_K * Elp_{i,k} * X_i$		
T01S	0	0	0	0	20
T02S	0	0	0	0	30
T03S	0	0	0	0	30
T04S	0	0	0	0	10
T05S	0	0	0	0	20
T12S	0	0	0	0	10
1S	0	0	0	0	50
2S	0	0	0	0	50
3S	0	0	0	0	10
4S	0	0	0	0	40
5S	0	0	0	0	60
6S	0	0	0	0	30
7S	0	0	0	0	20
8S	0	0	0	0	20
9S	0	0	0	0	70
10S	0	0	0	0	60
11S	0	0	0	0	10
12S	0	0	0	0	10
T01V	0	0	0	0	20
T09V	0	0	0	0	40
T11V	1	8,566292781	8,566292781	17,13258556	10
T01M	1	0	5,209773067	5,209773067	20
T02M	1	0	5,209773067	5,209773067	30
T06M	1	4,06557377	31,74173138	35,80730515	0
T07M	1	0	13,86425079	13,86425079	30
T08M	1	0	20,28275607	20,28275607	10
T09M	1	8,131147541	24,39344262	32,52459016	40
T10M	1	35,39257981	28,24975006	63,64232987	60
22M	1	19,61817111	19,61817111	39,23634222	30
23M	0	0	0	0	30
24M	0	0	0	0	30
25M	0	0	0	0	40
26M	0	0	0	0	30
27M	1	10,48407905	11,56374543	22,04782448	30

ID	Xi	Ecp =		Elp=		ET= Ecp+Elp	Costo
		$\sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} W_k * Ecp_{i,k} * X_i$		$\sum_{i=1}^{41} \sum_{k=1}^{20} W_K * Elp_{i,k} * X_i$			
T01F	1		0		2,941068518	2,941068518	20
T02IF	0		0		0	0	30
T09IF	1		10,76100086		16,17891724	26,9399181	40
T12IF	1		2,941068518		5,882137037	8,823205555	10
28IF	1		17,89659942		17,21470343	35,11130285	40
29IF	1		12,31422819		12,31422819	24,62845639	40
31IF	1		21,04003177		21,13781722	42,17784899	40
Total	16		151,2107728		244,368558	395,5793308	

Resultados del componente de facilitación en la función objetivo

X_i	$X_{j \in F(i)}$	$X_i * X_j$	Aumento en la Efectividad $\Delta_j^F * Elp_j$		Efectividad total: Elp_j
T01S	0 T04S	0	0	0	11
T01S	0 T05S	0	0	0	62
T01S	0 3S	0	0	0	64
T01S	0 5S	0	0	0	310
T01S	0 6S	0	0	0	145
T01S	0 10S	0	0	0	70
T02S	0 5S	0	0	0	310
T02S	0 6S	0	0	0	145
T02S	0 10S	0	0	0	70
T02S	0 11S	0	0	0	50
T01M	1 T06M	1	1	15,75	175
T01M	1 T09M	1	1	4,32	48
T02M	1 T07M	1	1	8,46	94
T02M	1 T09M	1	1	4,32	48
T08M	1 T06M	1	1	15,75	175
T01V	0 T09V	0	0	0	16
T01V	0 T11V	1	0	0	55
T01F	1 T09IF	1	1	10,35	115
T02F	0 T09IF	1	0	0	115
Total				58,95	

Resultado de efectividad total en la función objetivo = 58,95 + 395,57 = 454,53

H. Anexo: Análisis de sensibilidad del presupuesto

Presupuesto	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
Efectividad total	232,3	268,7	303,6	334,7	357,8	373,3	402,5	464,2	492,0	514,4	531,6	548,4	562,3	572,8	582,3	591,8	600,1	606,3	609,7	609,7	615,1
Var. de la efectividad		16%	13%	10%	7%	4%	8%	15%	6%	5%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	0%	1%
T01S_Educación, formar y sensibilizar	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T02S_Conocimiento, investigación e innovación	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T03S_Aprovechamiento de biodiversidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
T04S_Evitar la tala de árboles nativos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
T05S_Conservación de humedales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T12S_Reglamentación de las actividades de quema y fijación de multas por malas prácticas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
1S_Implementación de estructuras para recolección y almacenamiento y/o circulación de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
2S_Utilización de aguas subterráneas y recarga artificial de acuíferos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Presupuesto	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
Efectividad total	232,3	268,7	303,6	334,7	357,8	373,3	402,5	464,2	492,0	514,4	531,6	548,4	562,3	572,8	582,3	591,8	600,1	606,3	609,7	609,7	615,1
Var. de la efectividad		16%	13%	10%	7%	4%	8%	15%	6%	5%	3%	3%	3%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	0%	1%
T09IF_Sistema de alerta temprana	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T12IF_Reglamentación de las actividades de quema y fijación de multas por malas prácticas	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28IF_Franja aislante contrafuego	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29IF_Puntos de agua o reservorios	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31IF_Brigadas de bomberos forestales	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Total de medidas	9	10	11	13	15	16	18	21	22	24	26	28	28	30	31	32	35	37	38	38	39