

Estudio de Riesgo Climático para la implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2

CO-T3812-002

Plan de Trabajo, Metodología Detallada y Planificación del Proceso

(Entregable 1)

Preparado para:



**MINISTERIO DE AMBIENTE Y
DESARROLLO SOSTENIBLE**



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Enero de 2023

Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A # 84-14 OF 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C., Colombia
www.ingeniar-risk.com



Equipo de trabajo

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico

Omar Darío Cardona A.

Director del Proyecto: Experto en evaluación probabilista, gestión del riesgo y adaptación para el mejoramiento de resiliencia

Gabriel Andrés Bernal G.

Experto en diseño de modelos hidrometeorológicos probabilistas

María del Pilar Pérez R.

Experta en la aplicación de RDM
Experta en género, gestión de proyectos de cambio climático y sostenibilidad

Mabel C. Marulanda.

Experta en modelación del riesgo por fenómenos naturales

Martha-Liliana Carreño

Experta en evaluación de vulnerabilidad física, modelación de la exposición y evaluación holística del riesgo

Dora Catalina Suárez Olave

Experta en talleres de concertación en temas ambientales y de sostenibilidad

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

José Daniel Pabón

Experto en variabilidad y cambio climático

Sthefania Grajales Noreña

Experta en modelos hidrometeorológicos y SIG, INGENIAR

Diana Marcela González

Experta en modelamiento de exposición y vulnerabilidad, INGENIAR

Andrew Maskrey

Experto en política pública en gestión del riesgo y cambio climático

Eduardo Calvo Buendía

Experto en política pública en adaptación al cambio climático

Citación:

Cardona, O.D., Marulanda, M. C., Bernal, G.A., Carreño, M.L., Pérez, M.P., Suárez, D.C., (2023). Producto 1: Plan de Trabajo con la Metodología Detallada y Planificación del Proceso. Preparado para el Banco Interamericano de Desarrollo por INGENIAR: Risk Intelligence Ltda. Bogotá.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLAN DE TRABAJO	3
2.1 MUNICIPIOS SELECCIONADOS.....	5
3. ACTIVIDADES Y ENTREGABLES	9
3.1 TAREA 1: FASE DE INICIO: PLAN DE TRABAJO DE LA CONSULTORÍA	9
3.1.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	9
3.1.2 REVISIÓN DE RESULTADOS DE LA FASE 1, DE ESTUDIOS E INFORMACIÓN DISPONIBLE	10
3.1.3 SELECCIÓN DE MUNICIPIOS, PLANIFICACIÓN DEL PROCESO E INFORME DE INICIO.....	11
3.2 TAREA 2: ANÁLISIS DEL RIESGO CLIMÁTICO, PROCESO PRA Y RDM DE LÍNEA BASE	13
3.2.1. ANÁLISIS MULTIAMENAZA DE RIESGO CLIMÁTICO PRA PARA LOS MUNICIPIOS.....	13
3.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS	15
3.2.3 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD DE LA EXPOSICIÓN	16
3.2.4. MARCO TEÓRICO POR UTILIZAR PARA LA TOMA DE DECISIONES ROBUSTA RDM	19
3.2.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MÚLTIPLES EVALUACIONES DE RIESGO (PROBABILISTA Y HOLÍSTICA)	19
3.2.6. PUESTA EN COMÚN DE METODOLOGÍA Y VARIABLES, CAPACITACIÓN – TALLER 1	25
3.3 TAREA 3: RIESGO CLIMÁTICO CON MEDIDAS DE ADAPTACIÓN E INSUMOS PARA EL PNACC.....	26
3.3.1. FORMULACIÓN DE POSIBLES MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO/ADAPTACIÓN.....	27
3.3.2. ANÁLISIS DE RIESGO MULTIAMENAZA CON TOMA DE DECISIONES ROBUSTA RDM.....	30
3.3.3. RESULTADOS DE RIESGO Y PRIORIZACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN Y TALLER 2.....	31
3.3.4. ARTICULACIÓN DE RESULTADOS CON EL PNACC Y TALLER DE FINALIZACIÓN, TALLER 3	34
REFERENCIAS.....	36

1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la Estrategia Climática de Largo Plazo -E2050-, como instrumento de política que orienta las acciones nacionales, sectoriales y territoriales para construir un futuro resiliente al clima en Colombia, que busca contribuir con el logro de los objetivos globales plasmados en el Acuerdo de París, se estableció una evaluación de riesgo probabilista en Fase 1, que se fundamentó en técnicas de modelación del riesgo catastrófico para la cuantificación de posibles pérdidas causadas sobre los elementos expuestos por la ocurrencia natural de fenómenos amenazantes. Las pérdidas modeladas tienen diferentes características según el tipo de amenaza y elementos expuestos estudiados, que son relevantes para su correcta interpretación. El estudio Fase 1 calculó tres tipos específicos de pérdida:

- Para el caso de edificaciones e infraestructura las pérdidas se estiman a partir de los daños causados por la ocurrencia de inundaciones, huracanes y deslizamientos. Estas son pérdidas sobre activos físicos. Significa que los valores expuestos son valores de reposición, es decir, corresponden al valor que el propietario del bien afectado tendría que pagar para reponerlo a su estado original, en caso de ser afectado por alguno de estos fenómenos. Son generalmente pérdidas de gran magnitud y baja frecuencia.
- Las pérdidas causadas en el sector agrícola por sequías son pérdidas en producción, es decir una disminución en el ingreso resultante de la actividad agrícola. Es decir, no se mide el daño o detrimento en un activo físico, sino la disminución en un flujo económico. Estas pérdidas son, usualmente, de baja magnitud y alta frecuencia.
- Las pérdidas resultantes de la ocurrencia de incendios forestales son pérdidas en flujos de servicios ecosistémicos. Guardan cierta similitud con las pérdidas al sector agrícola, con la diferencia que los montos de pérdida son en general mucho más grandes, dada la importancia relativa de los servicios ecosistémicos en diferentes dimensiones. Son entonces pérdidas de gran magnitud y alta frecuencia.

Con excepción de la evaluación por huracán, en todos los casos se calculó el riesgo considerando 6 climas diferentes estudiados: Clima base (clima actual caracterizado por la climatología histórica); CP 2.6 (clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 2.6); RCP 4.5 (clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 4.5); RCP 6 (clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 6.0); RCP 8.5 (clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 8.5); CC IDEAM (clima descrito según lo proyectado por IDEAM en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático). Para el caso de huracán, el modelo de cambio climático corresponde a el escenario de emisiones A1B definido en el AR 4 del IPCC.

Todas las proyecciones del clima son al 2050. En todos los casos se obtiene resultados en términos de métricas probabilistas del riesgo, como la Pérdida Anual Esperada (PAE) y la Pérdida Máxima probable (PML). En particular, se calculó la curva de riesgo, que no es más que la curva de PML o la curva de pérdidas en función del periodo de retorno. Todas las métricas y curvas resultantes son imprecisas, revelando la naturaleza no probabilista de la incertidumbre asociada al desconocimiento de las condiciones reales del clima futuro. Los resultados deben interpretarse como intervalos dentro de los cuales se espera se encuentren los valores de las métricas, independientemente de cómo se desarrolle el clima en el 2050.

El estudio incluye un marco teórico en el cual se desarrollan temas como la evaluación de amenazas y del cambio climático, la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo, así como el análisis macroeconómico del riesgo derivado del clima, donde se encuentra el gasto público y las pérdidas por desastres, la reactivación económica post-COVID y las pérdidas por desastres; y también sobre la toma de decisiones bajo incertidumbre profunda, considerando la ingeniería de control del riesgo (RCE).

Los resultados muestran que, en general, la PAE total del país con cambio climático y para la totalidad de portafolios, oscila entre 3.55 y 4.33 billones de pesos, dependiendo de los diferentes escenarios de trayectorias de emisiones considerados. Igualmente, las pérdidas con el clima actual (es decir, no alterado por cambio climático), son importantes, donde la PAE es de 3.28 billones de pesos, lo que significa que el país hoy en día presenta un nivel de riesgo ya configurado no asociado al cambio climático, que no es despreciable y cuya reducción representa un reto de grandes proporciones. Ahora bien, es evidente el incremento en el riesgo que se puede atribuir al cambio climático, incrementando la PAE entre un 8% y un 39%, dependiendo del escenario de emisiones que se considere.

La Fase 2 de este estudio, el cual se plantea desarrollar con esta consultoría, busca llegar a nivel municipal, para los territorios seleccionados, considerando las mismas amenazas climáticas (i.e., inundaciones, sequías, incendios de cobertura vegetal, huracanes y deslizamientos) y los sectores priorizados y analizados en la Fase 1 (i.e., construcciones, infraestructura, agrícola y servicios ecosistémicos).

En concordancia con la Fase 1, la metodología a ser utilizada para este estudio corresponde a aplicar los enfoques del Análisis Probabilista de Riesgo (APR) y Toma de Decisión Robusta (RDM en inglés) de manera simultánea, donde el APR funciona como el motor de cálculo y el RDM funciona como un marco participativo de análisis y toma de decisiones. el cálculo de riesgo deberá aplicar una visión integral, cuantificando el riesgo físico (sobre activos - daños y pérdidas económicas) e incorporando los posibles factores socioeconómicos y de capacidad adaptativa que pueden modificar o exacerbar el riesgo físico, para así obtener así una medida del riesgo total.

Para lograr el nivel de detalle y el uso de la RDM, se implementará un enfoque participativo y de consulta a actores locales, considerando principalmente los nodos regionales de cambio climático, examinando igualmente medidas de adaptación con una escala municipal.

En este primer entregable se presenta el Plan de trabajo con la metodología detallada y la planificación del proceso con los tiempos de ejecución.

2. PLAN DE TRABAJO

El objetivo principal de esta consultoría consiste en la evaluación el riesgo climático y las correspondientes medidas de adaptación a largo plazo, en una escala territorial más local y con mayor detalle (mayor de resolución), a nivel municipal, estableciendo una propuesta para su aplicación territorial, por medio de un enfoque de Toma de Decisiones Robustas (RDM), incorporado en el modelo de Evaluación Probabilista del Riesgo (PRA).

La Figura 1 muestra la estructura general del proyecto, según las actividades y entregables incluidos en los Términos de Referencia.

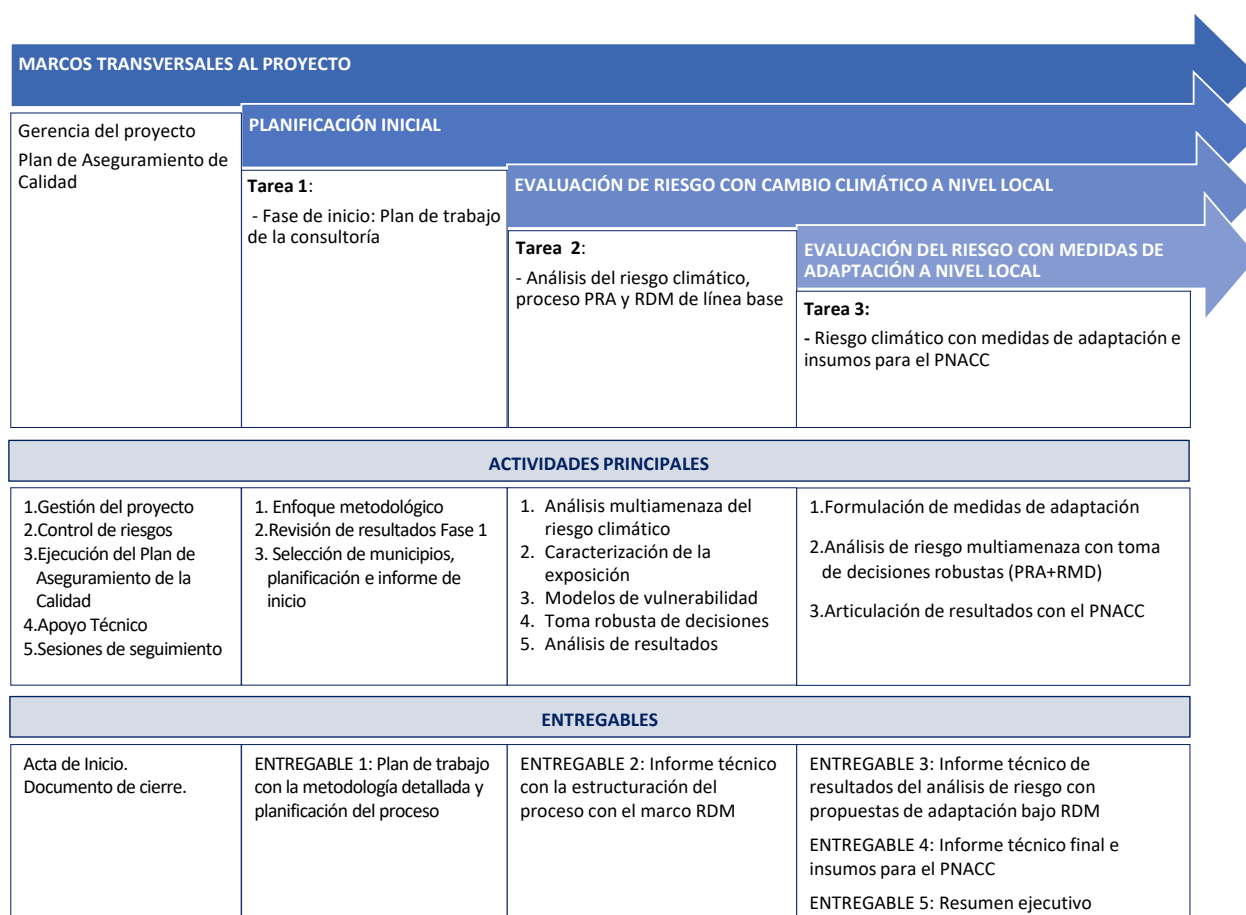


Figura 1. Desglose de actividades del proyecto

Los hitos se componen de informes finales de cada una de las actividades, que se describen en detalle en los Términos de Referencia. La fecha de entrega de hitos se realiza en el último mes de cada actividad, que considera los tiempos de entrega inicial de parte del equipo consultor; y no se considera el tiempo de revisión de parte del equipo supervisor, el tiempo de revisión y producción de la versión final de cada informe o producto. La Figura 2 muestra el cronograma general del proyecto.

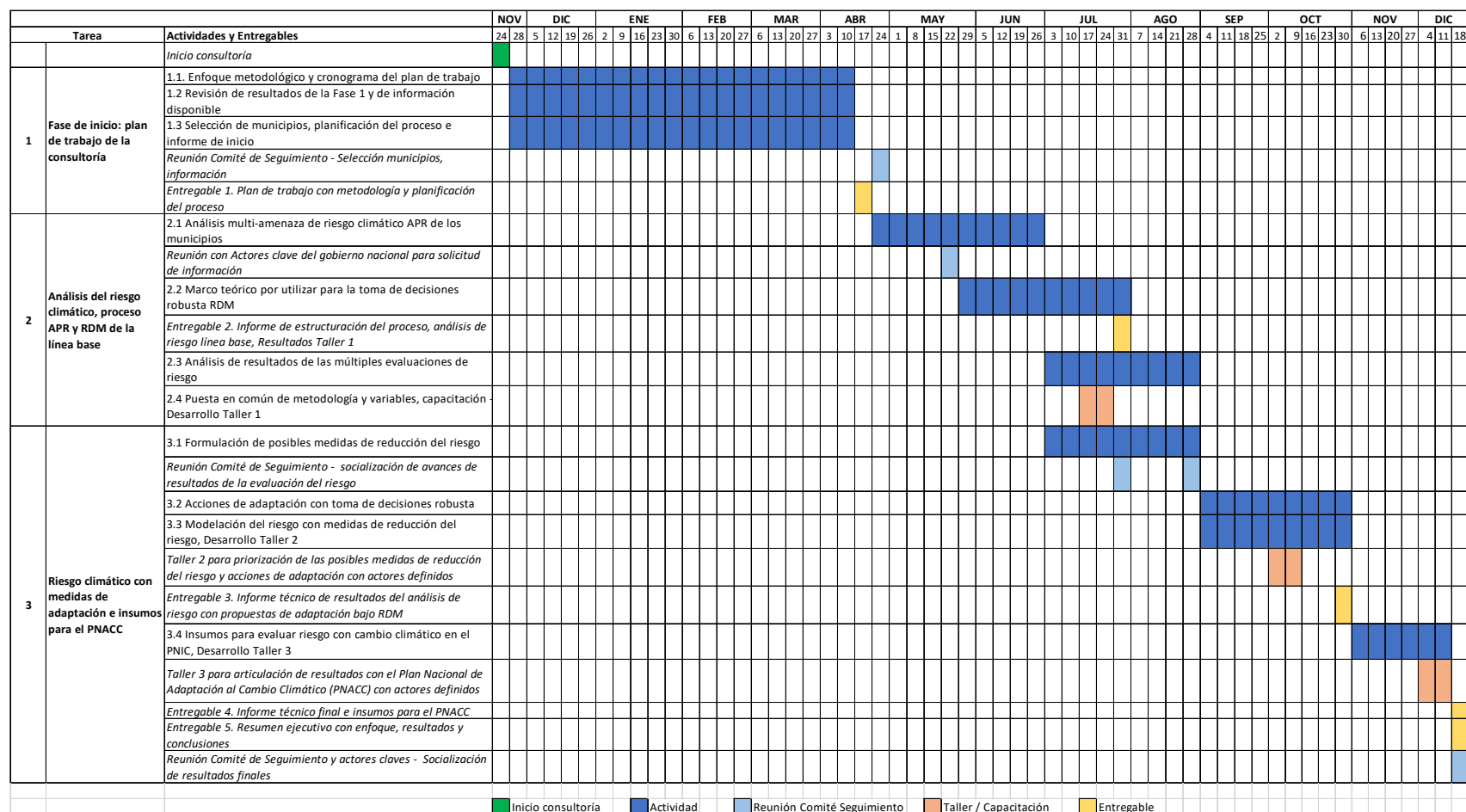


Figura 2. Cronograma general de actividades

2.1 Municipios seleccionados

En la propuesta técnica, INGENIAR puso a consideración municipios y departamentos para ser seleccionados como objeto de estudio. De los comentarios al respecto recibidos por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (MADS) y el equipo BID, se depuró la preselección, llegando a una segunda propuesta de municipios y departamentos. Sobre dicha segunda propuesta, la División de Cambio Climático y Adaptación del MADS realizó comentarios y sugerencias, socializados a la firma consultora y el BID en reunión virtual sostenida el 15 de marzo de 2023, y entregados por escrito el 21 de marzo de 2023. Estos fueron incorporados en los criterios tenidos en cuenta para la selección final de municipios, presentada en esta sección.

Dentro de los criterios empleados se encuentran: la existencia, posibilidad de acceso y calidad de la información necesaria para llevar a cabo un proceso de modelación probabilista del riesgo, la existencia de estudios previos, los resultados obtenidos en la Evaluación del Riesgo de la E2050 Fase 1, la existencia y recurrencia de las amenazas en el territorio, el estado de la institucionalidad y demás actores a tener en cuenta para el desarrollo del proyecto y el cumplimiento de los objetivos relacionados con la Toma Robusta de Decisiones (RDM), lo cual es un compromiso contractual para el consultor, y como se mencionó anteriormente, los comentarios realizados por el MADS en cuanto a la posibilidad de una más amplia distribución espacial (desconcentración) y tener en cuenta la inclusión de municipios TOAA (Territorio para el Ordenamiento Alrededor del Agua).

A continuación, se indican los municipios seleccionados por cada tipo de riesgo incluido en este estudio.

3.1.1 Riesgo por huracán

Sector y elementos expuestos: Construcciones

Departamento	Municipios
Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	<ul style="list-style-type: none"> • San Andrés • Providencia
La Guajira	<ul style="list-style-type: none"> • Uribia • Manaure • Riohacha

Esta propuesta no ha sufrido modificaciones desde su planteamiento inicial. El MADS ha manifestado estar de acuerdo con este listado de municipios, teniendo en cuenta además que San Andrés, Providencia y Riohacha son TOAA. Así mismo, según el Estudio de Riesgo de E2050 - Fase 1, los municipios seleccionados son en los que se manifiesta mayor riesgo por huracán. Adicionalmente, Riohacha hace parte de la Ciénaga Grande de Santa Marta y de la Sierra Nevada de Santa Marta (CGSM-SNSM).

3.1.1 Riesgo por incendios de cobertura vegetal

Sector y elementos expuestos: Servicios Ecosistémicos (Bosques)

Departamento	Municipios
Huila	<ul style="list-style-type: none"> Palermo
Casanare	<ul style="list-style-type: none"> Orocué
Caquetá	<ul style="list-style-type: none"> San Vicente del Caguán
Vichada	<ul style="list-style-type: none"> Cumaribo

Con respecto a la propuesta original de INGENIAR, se mantienen los municipios de Palermo (Huila) y Orocué (Casanare), y se incluyen dos municipios, uno de la Amazonia y uno de la Orinoquia, que corresponden a San Vicente del Caguán (Caquetá) y Cumaribo (Vichada), respectivamente. Los municipios incluidos reportan impactos significativos por incendios de cobertura vegetal, son municipios TOAA y permiten desconcentrar espacialmente las evaluaciones. Adicionalmente, su cercanía a Parques Naturales como *Tuparro* y *Chiribiquete* abre la posibilidad de trabajar aunadamente con la Unidad de Parques Nacionales como actor del proceso.

En cuanto a los municipios que se conservan de la propuesta original de INGENIAR, cabe mencionar que Orocué es uno de los municipios con mayores áreas afectadas por fuego, mientras que Palermo reporta una muy alta recurrencia de quemaduras e incendios.

3.1.1 Riesgo por deslizamientos

Sector y elementos expuestos: Infraestructura vial

Escala de deslizamientos	Municipios / Departamentos
Urbanos	<ul style="list-style-type: none"> Manizales
Urbanos	<ul style="list-style-type: none"> Bogotá
Departamental (corredores viales)	<ul style="list-style-type: none"> Caldas
Departamental (corredores viales)	<ul style="list-style-type: none"> Cauca

Se mantiene en su mayoría la propuesta original de INGENIAR, pero se incluye el departamento de Cauca de acuerdo con lo solicitado por el MADS. Esta modificación se respalda adicionalmente en la información consultada en el Atlas del Riesgo de Colombia (UNGRD, 2019) y en el Índice Municipal de Riesgo por Capacidades (DNP, 2019), en donde se evidencian las condiciones de susceptibilidad a los deslizamientos propias de los departamentos de Caldas y Cauca.

3.1.1 Riesgo por sequía

Sector y elementos expuestos: Agrícola, cultivos de maíz blanco

Departamento	Municipios
Tolima	<ul style="list-style-type: none"> • Espinal • Guamo
Córdoba	<ul style="list-style-type: none"> • Lorica
Sucre	<ul style="list-style-type: none"> • San Onofre

La selección de estos municipios obedece, de manera fundamental, al tipo de efecto causado por la sequía y que es susceptible de ser modelado en este trabajo, el cual corresponde a las pérdidas en rendimiento de cultivos agrícolas y no a disminución en volúmenes de agua para abastecimiento y consumo humano. Esto debido al alcance del Estudio de Riesgo de E2050 – Fase 1, del cual se deriva el presente estudio.

De acuerdo con lo anterior, con respecto a la propuesta original de INGENIAR se mantuvieron los municipios de Espinal y Guano (Tolima) y se incluyeron Lorica (Córdoba), sugerido por el MADS, y San Onofre (Sucre), que tiene un nivel de riesgo importante de acuerdo con los resultados del Estudio de Riesgo de E2050 – Fase 1.

3.1.1 Riesgo por inundación

Sector y elementos expuestos: Construcciones – Infraestructura

Departamento	Municipios
Bolívar	<ul style="list-style-type: none"> • Magangué
Córdoba	<ul style="list-style-type: none"> • Ayapel
Sucre	<ul style="list-style-type: none"> • San Marcos • Guaranda

En el caso del riesgo por inundación, se evaluó la propuesta realizada por el MADS, que consiste en eliminar dos de los cuatro municipios propuestos en la región de la Mojana, para incluir Beltrán (Cundinamarca) y algún municipio del Chocó de entre Litoral del San Juan, Lloró, Novita o Istmina. Lamentablemente, en este caso y a juicio de este consultor, debe primar la disponibilidad de información de detalle, como la existente para los 11 municipios que conforman la región de la Mojana¹. La modelación de inundaciones

¹ Información de muy alto detalle existente y levantada durante el estudio de inundación de la Mojana financiado por el fondo Adaptación en 2013, que incluye imágenes LiDAR con resolución espacial de 10 centímetros, batimetrías de los principales cauces y caños en la región, levantamiento detallado de elementos expuestos, entre otras capas de información. No existe un estudio similar en términos de calidad y detalle de información para otra región del país.

requiere, a diferencia de las otras amenazas consideradas en este estudio, información de mucho detalle que permita simulaciones hidráulicas apropiadas.

Adicionalmente, en ninguno de estos municipios se ha evaluado el riesgo por inundación bajo condiciones de cambio climático, lo cual es posible realizar en este estudio dado que la información de detalle existe. Así mismo, consideramos que la modelación en esta región es de especial interés por tratarse de territorios TOAA, por la situación recurrente y actual de la Mojana que implica una necesidad de tomar decisiones integrales en gestión del riesgo más allá de la respuesta a emergencias, y por el interés nacional en promover proyectos de desarrollo que pueden beneficiarse de documentos CONPES adelantados y aprobados para la región. De acuerdo con lo anterior, INGENIAR reitera su propuesta original que en este caso no sería pertinente ajustar o modificar.

3. ACTIVIDADES Y ENTREGABLES

En esta sección se describe el enfoque técnico y la metodología adoptada para implementar las tareas que conforman la ejecución del proyecto. Se proponen tres grandes tareas que incluyen las actividades que permitan consolidar los entregables con los resultados planteados y esperados por el BID en menor tiempo e incluyendo un alcance mayor a lo previsto en materia de evaluación del riesgo.

3.1 Tarea 1: Fase de inicio: Plan de trabajo de la consultoría

3.1.1 Enfoque metodológico

La metodología propuesta está fundamentada en la aplicación de enfoques de toma de decisiones robustas con base en la modelación probabilista del riesgo. Este tipo de enfoques han sido previamente aplicado con éxito por parte de INGENIAR en otros contextos (por ejemplo, en la modelación del riesgo para la estrategia climática E2050 de Colombia, Fase 1). Entender el riesgo climático implica comprender el papel que juega la incertidumbre, tanto en su manifestación, como en el conjunto de posibles acciones de adaptación orientadas para reducirlo. INGENIAR cuenta con los modelos físicos -matemáticos requeridos para enfocar la evaluación desde una perspectiva técnico-científica y probabilista, en donde la incertidumbre es considerada y propagada de forma analítica por todas las fases de la modelación.

Si bien el enfoque metodológico final será acordado con el BID y el comité de seguimiento² en función de las amenazas y sectores de la Fase 1 que se acuerden para llevar a cabo la evaluación a nivel municipal, dicho enfoque debe responder a las necesidades planteadas en los términos de referencia en lo que se refiere al tipo de enfoque y modelos a aplicar. La modelación propuesta por INGENIAR responde a estas necesidades, cumpliendo con las características listadas a continuación, las cuales se consideran las mínimas requeridas para una apropiada modelación del riesgo a nivel municipal con cambio climático que incorpore medidas de adaptación:

- *Multiamenaza.* Esta característica es fundamental dado que se requiere incorporar modelos que den cuenta de la dinámica propia de las diferentes amenazas climáticas y de forma acoplada entre ellas, de tal manera que la visión del riesgo sea completa y no solamente asociada a una de dichas amenazas. Esta característica plantea, adicionalmente, la necesidad de desarrollar diferentes modelos para cada combinación de amenaza- sector. Además, es necesario expresar el riesgo de la misma manera, de tal forma que los impactos de las diferentes amenazas sobre los sectores de cálculo sean conmensurables y aditivos.
- *Probabilista.* La altísima incertidumbre inherente a la actividad climática y los forzamientos que causan la ocurrencia de amenazas hidrometeorológicas genera la necesidad de contar con un marco conceptual y matemático que permita incorporar, de forma razonable, la incertidumbre en el resultado del riesgo. El enfoque de evaluación del riesgo catastrófico propuesto por INGENIAR, el cual está basado en los preceptos fundamentales de la Teoría de Ruina (factibilidad de insolvencia), permite caracterizar los daños y pérdidas potenciales causados por la actividad climática, por medio de distribuciones de probabilidad. De esta manera, los resultados se expresan

² Integrado por Minambiente, la UNGRD y el IDEAM, y se sugiere el Fondo Adaptación y de ser posible INVIAS.

como métricas probabilistas, dando una orientación integrada, completa y transparente al tomador de decisiones sobre el riesgo que enfrenta.

- *Estocástico.* No es lo mismo que el punto anterior. Significa que el modelo debe basarse tanto en la física de los fenómenos de origen hidrometeorológico como en la aleatoriedad de su ocurrencia. Esto implica que se necesitan, por lo general, miles de simulaciones de eventos amenaza para construir un conjunto razonablemente exhaustivo de los posibles daños o pérdidas que pueden sufrir los elementos expuestos de los sectores considerados y, por lo tanto, las consecuencias que se derivan desde el punto de vista económico, social, ambiental.
- *No estacionario.* Los modelos probabilistas de riesgo de desastres suelen ser estacionarios, es decir, no se admite una variación sensible de la frecuencia de ocurrencia de los eventos de amenaza en el tiempo. Esta característica es apropiada para fenómenos no relacionados con el clima, como los terremotos, por ejemplo. Por el contrario, en la modelación de amenazas que son influenciadas por el cambio climático, es necesario un enfoque que permita incorporar tendencias de fondo que alteran las tasas de ocurrencia de los eventos, lo cual implica un modelo de riesgo no estacionario. Esto a su vez implica métricas de riesgo que se expresan como función del tiempo.
- *Fundamentado en incertidumbre profunda.* Adicionalmente al punto anterior, la incorporación del cambio climático en el modelo de riesgo implica introducir una variable para la cual no podemos asignar de forma significativa una distribución de probabilidad. Adicionalmente, el efecto sobre el riesgo que tienen las medidas de adaptación, considerando el vasto universo de posibles futuros inciertos, significa que nos enfrentamos a una incertidumbre profunda. Desde el punto de vista matemático, el modelo debe estar en capacidad de permitir el tratamiento de ciertas variables por medio de estructuras de incertidumbre no probabilistas⁶, que permitan simular el verdadero estado de incertidumbre y, consecuentemente, la expresión de las métricas de riesgo en forma de probabilidades imprecisas.
- *Orientado a la toma de decisiones.* Más allá de los aspectos físicos y matemáticos que soportan la modelación, el modelo mismo debe estar orientado a un propósito. Una correcta orientación, en la cual los resultados realmente informen y guíen la toma de decisiones permite involucrar a las partes interesadas en el problema del riesgo y adaptación, y proporciona una información enfocada a responder a sus necesidades. El modelo de riesgo debe tener en cuenta entonces la magnitud de los impactos previstos y su probabilidad de ocurrencia, pero lo más importante es que permita probar la eficacia de las estrategias de adaptación al cambio climático que puedan ser factibles de acuerdo con el contexto local y el grado de aversión del riesgo.

3.1.2 Revisión de resultados de la Fase 1, de estudios e información disponible

INGENIAR cuenta con toda la información de la Fase 1 y disponible que ha sido entregada en el desarrollo de esta iniciativa. Esta información es base y punto de partida como insumo a la modelación a realizar a nivel de los municipios que se seleccionen. Para cada municipio se generará una calificación de la información recibida, detallada y actualizada sobre topografía, hidrología, hidráulica, clima, población, indicadores socioeconómicos, de pobreza, producción, ordenamiento territorial, tipo de elementos expuestos y sus características para los sectores relevantes (ecosistemas – servicios ecosistémicos,

construcciones, infraestructura, cultivos), entre otras capas de información, en función de su completitud temporal y espacial (si aplica) y su pertinencia como insumo a los modelos de amenaza, riesgo y adaptación.

Las particularidades físicas del territorio colombiano le agregan una complejidad especial a la evaluación del riesgo y la incorporación de medidas de adaptación, por lo cual es fundamental una revisión del estado del conocimiento plasmado en diferentes estudios e investigaciones a nivel institucional y académico, que permitan ajustar la metodología propuesta con el mayor nivel de resolución factible y algunos detalles específicos que puedan ser necesarios para representar el riesgo climático de forma apropiada dados los objetivos de la evaluación.

Con el propósito de enmarcar el desarrollo de esta consultoría en un contexto institucional acotado, se delimitará el dominio del estudio a partir de la definición del marco institucional, ámbito espacial, actores e interacciones, y entidades nacionales, subnacionales y municipales que tendrán injerencia o se beneficiarán del estudio, así como relaciones entre sectores. Esta actividad permitirá definir los municipios, unidades de análisis o regiones de evaluación que sean coherentes y provean información relevante para los diferentes actores.

3.1.3 Selección de municipios, planificación del proceso e informe de inicio

INGENIAR es una firma que conoce ampliamente los territorios y la institucionalidad de Colombia, ha realizado múltiples estudios a nivel local, planes en todos los niveles y la legislación vigente, conoce qué información existe y se puede utilizar. Sin embargo, INGENIAR considera que aparte de priorizar con base en los resultados de la Fase 1, es importante tener en cuenta la relevancia y las posibilidades de éxito en el involucramiento de los actores de los diferentes niveles, incluidos las administraciones municipales, departamentales, las corporaciones regionales y los nodos de cambio climático. Los términos de referencia indican que al menos deben estudiarse 4 municipios por amenaza y con base en la Fase 1, esto sin considerar que los tamaños y amenazas pueden ser determinantes en la complejidad de los estudios. Dado que no sólo se depende de la información disponible, INGENIAR espera proponer, para la concertación municipios, en dónde haya buenas expectativas de gestión del riesgo y de implementación de las medidas de adaptación, en función de su capacidad institucional, el acompañamiento de la academia y en general del interés de participar en los procesos asociados a la toma de decisiones robusta RDM (del cual se hace una descripción más adelante). Es decir, la planificación del proceso RDM es un aspecto fundamental en el mismo proceso de identificación de los municipios a estudiar e involucrar, debido a que al mismo tiempo hay que identificar los actores clave, sus interacciones en el proceso analítico y participativo de RDM y la realización exitosa de los talleres previstos con enfoque de género. Los participantes serán definidos en conjunto con el Comité de Seguimiento, asegurando un mínimo de 35% de participación de mujeres.

Como se indica en los términos de referencia, las amenazas y sectores en que se enfocará el estudio serán acordadas con base en la Fase 1 en función de las necesidades estratégicas de las instituciones colombianas, así como del estado de la información disponible a nivel de los municipios. Al respecto cabe mencionar que INGENIAR cuenta con una muy amplia experiencia en modelación del riesgo climático y tiene, por lo tanto, la capacidad de abordar la modelación de cualquiera de las combinaciones de amenazas y sectores requeridos.

Las capacidades actuales de modelación del motor de cálculo de riesgo catastrófico y cambio climático de INGENIAR (sistema CAPRA ROBOT), en su componente climática, se resumen en la Tabla 1. Como valor agregado y dadas las capacidades de modelación con que cuenta INGENIAR, se podrían incluir otros sectores y otras amenazas no tenidas en cuenta en la Fase 1, de ser conveniente, adicionalmente a los municipios, las amenazas y sectores atendido en la Fase 1.

Tabla 1. Resumen de capacidades de modelación del motor CAPRA ROBOT de INGENIAR. Las combinaciones amenaza-sector soportadas se indican con el símbolo ■.

Amenazas \ Sectores	Población	Ambiente construido		Sistemas productivos			Ecosistemas ³
		Edificaciones ⁴	Infraestructura ⁵	Cultivos	Ganadería	Pesca	
Peligros (fenómenos derivados de la variabilidad climática)							
Huracanes	■	■	■	■		■	■
Inundaciones	■	■	■	■			
Sequías	■			■	■		■
Tormentas	■	■	■				
Incendios forestales	■	■	■	■	■		■
Deslizamientos	■	■	■	■	■		
Olas de Calor	■			■	■		
Heladas	■			■	■		
Epidemias	■						
Tensionantes (cambios en promedios climáticos)							
Cambios en precipitación				■	■		■
Cambios en temperatura				■	■		■
Cambios en PH marino						■	■
Aumento del nivel del mar						■	■

Todos los modelos indicados en la Tabla 1 son totalmente probabilistas, permiten la incorporación del cambio climático en las estimaciones y dan el mismo tratamiento a las pérdidas; es decir, permiten expresar el riesgo por medio de métricas probabilistas ampliamente usadas como la curva de excedencia de pérdidas (CEP), la pérdida anual espera (PAE) y la pérdida máxima probable (PMP).

Entregables de la TAREA 1

Como productos derivados del desarrollo de la TAREA 1 se plantean:

- *Entregable 1:* Plan de trabajo con la metodología detallada y planificación del proceso: con los tiempos de ejecución, una revisión de los resultados Fase 1, el listado de los municipios para los cuales se evaluarán las pérdidas para las diferentes amenazas y la planificación del proceso RDM.

El presente informe corresponde a dicho entregable.

³ Incluye ecosistemas terrestres, marino/costeros y acuáticos (lénticos y lóticos)

⁴ Incluye construcciones regulares, de atención a la comunidad, e infraestructura basada en edificaciones (e.g. salud, educación, turismo)

⁵ Incluye: Energía (generación y distribución); Transporte (vial, férreo, aéreo, fluvial y marítimo); Agua y saneamiento; Oil & Gas; Comunicaciones; Infraestructura productiva (agrícola, pecuaria, acuícola).

3.2 Tarea 2: Análisis del riesgo climático, proceso PRA y RDM de línea base

La modelación probabilista del riesgo derivado del clima consiste en determinar todas las posibles consecuencias que un conjunto de elementos expuestos puede sufrir, por cuenta de la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos, exacerbados por el cambio climático. Una buena modelación del riesgo es fundamental en la construcción de un proceso de desarrollo sostenible y resiliente, considerando los trade-offs de los posibles perjuicios y beneficios. En otras palabras, dicho proceso solo puede ser debidamente orientado, si se cuenta con una modelación de riesgo de desastres suficientemente robusta, en términos de la verosimilitud de daños o pérdidas, que facilite las decisiones que se pueden tomar con un apropiado soporte técnico, sin arbitrariedad y más allá de toda duda razonable ante la incertidumbre inherente.

Para esta tarea, se usará como base toda la información disponible de la Fase 1, así como los análisis y estudios de amenaza, exposición y vulnerabilidad existentes para Colombia, en particular los realizados para el Plan Nacional de Adaptación, así como los estudios adelantados por la UNGRD, las proyecciones definidas por el IDEAM para la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático, las priorizaciones del CONPES de Variabilidad Climática aprobado en 2021, los productos mallados de información meteorológica, entre otra información oficial relevante y disponible.

3.2.1. Análisis multiamenaza de riesgo climático PRA para los municipios

La amenaza se modela a partir de los registros históricos de precipitación, temperatura y otras variables meteorológicas, con el fin de generar series estocásticas correlacionadas de parámetros climáticos e identificar condiciones de clima extremo (exceso o déficit de lluvias y temperatura extremas) que podrían ocurrir con una baja frecuencia. Estas condiciones extremas derivan en eventos de amenaza como sequía, inundación fluvial o incendios forestales, por mencionar algunos. La incorporación de los potenciales impactos del cambio climático se hace al perturbar las series estocásticas para incluir los cambios en temperatura y precipitación dados por las proyecciones, para luego recalcular los indicadores de cada amenaza. Con el enfoque de la evaluación prospectiva del riesgo por fenómenos meteorológicos, el componente de amenaza se define como un conjunto de cientos o miles de eventos estocásticos que son colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes.

La metodología propuesta utiliza un generador de clima sintético a partir de distribuciones paramétricas de probabilidad para definir conjuntos de datos climáticos históricos y estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de variables meteorológicas (e.g. precipitación, temperatura, evapotranspiración, velocidad del viento, entre otras), incluso fuera del rango de observaciones históricas. La metodología toma cada día del año hidrológico en un análisis separado, y encuentra la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a los registros históricos. Posteriormente, se genera aleatoriamente cada variable meteorológica a nivel diario para un determinado número de años de simulación, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas. Las series sintéticas son correlacionadas temporal y espacialmente, y son luego utilizadas para encontrar eventos extremos de amenaza, no observados en la historia, para la totalidad de amenazas consideradas.

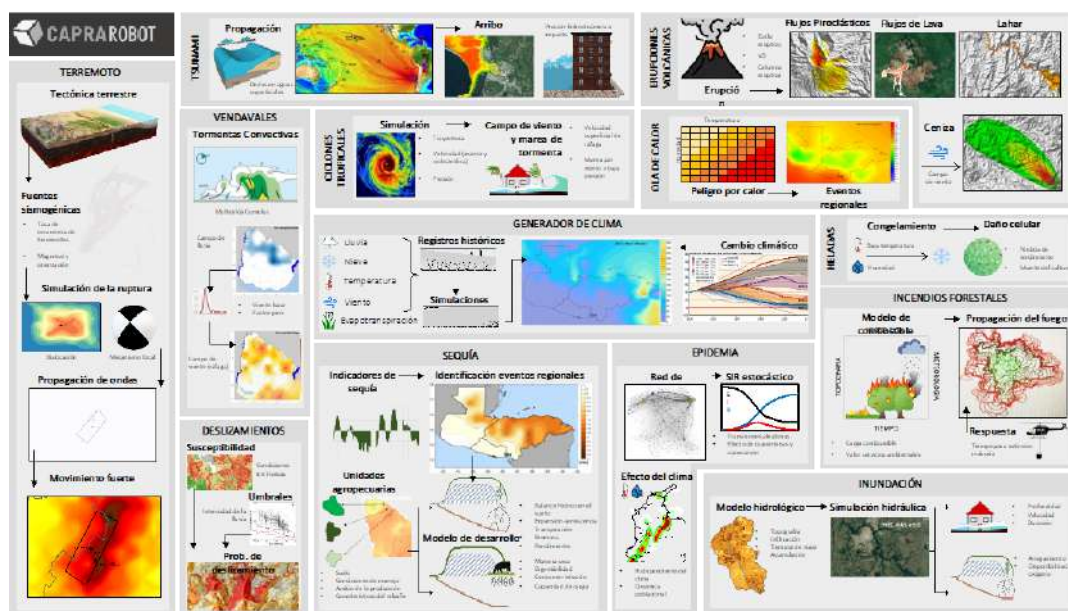


Figura 3. Resumen de modelos incorporados en la plataforma CAPRA ROBOT de INGENIAR

Sobre las series simuladas para el clima histórico, se generan perturbaciones basadas en las proyecciones dadas por modelos de cambio climático que sea representativos de los cambios esperados en Colombia⁶. Esto modifica completamente la colección de eventos de amenazas particulares que se obtienen bajo climatologías alteradas por cambio climático. Esto significa que se crearán conjuntos diferentes de eventos, generados estocásticamente, para cada amenaza y por cada clima considerado (un clima base y todos los climas futuros incluidos para diferentes proyecciones de emisiones de gases de efecto invernadero al 2030 y 2050).

De las series meteorológicas simuladas se extrae el forzamiento climático que induce la ocurrencia de eventos de amenaza, los cuales son cuantificados a partir de modelos físicos representativos de cada uno. Figura 3 muestra esquemáticamente el proceso de generación de series meteorológicas y su correlación con la modelación de la amenaza y riesgo derivados del clima, implementados dentro de la plataforma de

⁶ Se incorporarán las proyecciones generadas para Colombia por parte del IDEAM, u otras generadas para el país que se consideren relevantes. Así mismo, INGENIAR seleccionará de entre los modelos de circulación global (GCM) disponibles aquel que mejor represente las condiciones climáticas del país, con el objetivo de incorporar proyecciones de diferentes fuentes ante diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero. Se usarán entre otros los siguientes GCM (incluyendo múltiples versiones): Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS 1); Beijing Climate Center Climate System Model versión 1.1 (BCC-CSM 1.1); Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM); Canadian Earth System Model (CanESM2); Community Climate System Model (CCSM4); Community Earth System Model Version 1 (CESM1); Centro Euro-Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC); Centre National de Recherches Météorologiques - Coupled Model 5 (CNRM-CM5); Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO-Mk3-6-0); Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System, Gridpoint version 2 (FGOALS-g2); First Institute of Oceanography-Earth System Model (FIO-ESM); Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - Earth System Model 2G (GFDL-ESM2G); Goddard Institute for Space Studies-E2 (GISS-E2); Hadley Centre Coupled Model Version 3 (HadCM3); Hadley Centre Global Environmental Model, version 2 (HadGEM2-ES); Institute for Numerical Mathematics Climate Model 4 (INMCM4); Institut Pierre Simon Laplace Model (IPSL-CM5A); Model for Interdisciplinary Research on Climate 4 (MIROC4h); Model for Interdisciplinary Research on Climate Earth System Model (MIROC-ESM); Max Planck Institut für Meteorologie Earth System Model (MPI-ESM); Meteorological Research Institute Global Climate Model 3 (MRI-CGCM3); Norwegian Earth System Model (NorESM1).

cálculo CAPRA ROBOT, desarrollada por INGENIAR y que será usada para dar cuenta de resultados bajo incertidumbre profunda. La Figura 1 ilustra las potencialidades con que cuenta INGENIAR para la modelación de amenazas y riesgos derivados del clima, lo que aporta al análisis de toma de decisiones el insumo del riesgo con las diferentes condiciones factibles de cambio climático, que exacerban o reducen los peligros o amenazas.

3.2.2 Caracterización de los elementos expuestos

Se generarán tantas bases de elementos como sectores considerados en la Fase 1, y por cada municipio seleccionado. INGENIAR tiene amplia experiencia en la conformación de modelos de exposición de edificaciones regulares y prioritarias, sistemas de infraestructura (en sectores como energía, agua y saneamiento, transporte y vías, comunicaciones, hidrocarburos, por mencionar algunos), sistemas productivos agropecuarios y servicios ecosistémicos.

En portafolios de edificaciones, los impactos se miden en términos de los daños directos estructurales y no estructurales sufridos por las edificaciones. Las edificaciones suelen agruparse en portafolios en función del responsable final sobre las pérdidas modeladas, permitiendo la simulación de los efectos sobre grandes grupos de elementos expuestos, en este caso de los municipios seleccionados.

Los sistemas de infraestructura, por su parte, constituyen uno de los tipos de exposición de mayor complejidad para la modelación. Estos sistemas se componen de elementos individuales que se interconectan, conformando nodos y líneas o redes por donde fluye algún servicio específico. Por lo tanto, los elementos que componen el sistema tienen interdependencia. INGENIAR ha desarrollado modelos de afectación en sistemas de infraestructura, en donde se considera tanto el daño directo a los elementos individuales, como los cambios que ese daño directo implica a la oferta del servicio prestado.

En el caso de la producción agropecuaria, INGENIAR cuenta con modelos donde el elemento expuesto se entiende como una unidad de tierra cultivada, unidad de tierra ganadera productiva o unidad acuícola. En esta unidad confluyen múltiples aspectos como el tipo de cultivo, ganado o producto presente, el ciclo productivo, la estacionalidad del ciclo, el tipo de suelo, entre otros. La afectación se refiere principalmente a la reducción en el rendimiento del cultivo o sistema ganadero, lo que conlleva una pérdida en producción. Esta pérdida se refiere a un flujo económico, y no a la pérdida de un activo, como en el caso de daños en edificaciones e infraestructura.

Finalmente, los ecosistemas son tal vez el tipo de exposición más complejo y difícil de modelar. Si bien es aun fuertemente debatido a nivel internacional qué exactamente constituye el elemento expuesto cuando se hace referencia a ecosistemas, en el enfoque propuesto por INGENIAR se consideran los servicios ecosistémicos como los elementos en riesgo. Los servicios ecosistémicos tienen que ver con los servicios ambientales de regulación, alimentación, paisajísticos y culturales que prestan los ecosistemas, y que pueden ser valorados mediante técnicas de estimación de beneficios totales. Por esta razón, son usualmente los elementos más costosos; es decir, que su pérdida implica un impacto tan grande que suele ser muy superior a las de otro tipo de exposición. Esta pérdida se refiere a la reducción en el flujo del servicio ecosistémico evaluado. Colombia tiene dentro de sus prioridades de la Visión 2050, del Departamento Nacional de Planeación, la valoración de los servicios ecosistémicos.

3.3.3 Funciones de vulnerabilidad de la exposición

En esta evaluación la vulnerabilidad consiste, para un modelo de los elementos que componen un portafolio de exposición, el grado de susceptibilidad de que estos sufran daño en caso de manifestarse un evento de amenaza que genere una cierta intensidad en su ubicación. Es ampliamente aceptado el uso de funciones de vulnerabilidad para describir, de forma probabilista, la variación del daño con la intensidad que afecta un tipo de elemento expuesto. El daño o pérdida asociado a un nivel dado de intensidad se modela como una variable aleatoria, usualmente una distribución Beta⁷, dando así un carácter probabilista al impacto causado por el evento de cada amenaza considerada sobre los elementos expuestos.

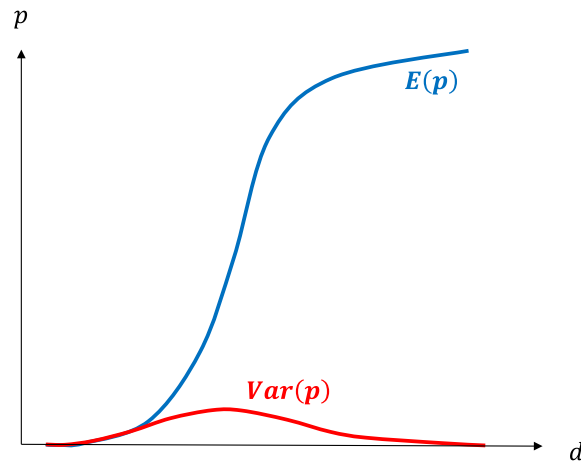


Figura 4. Ilustración de una función de vulnerabilidad. $E(p)$ es el valor esperado del daño y $Var(p)$ es su varianza, para una intensidad d .

INGENIAR cuenta con una base amplia de funciones de vulnerabilidad para sistemas constructivos típicos de Latino América (incluida Colombia), ante diferentes amenazas. Estas funciones de vulnerabilidad responden a tipificaciones en los estilos constructivos, lo que significa que son representativas para un amplio número de elementos expuestos afectados por un mismo evento, reduciendo paulatinamente la incertidumbre en la estimación de la pérdida a medida que aumenta la exposición (ley de los grandes números).

Ahora bien, para sistemas de infraestructura, el uso de funciones de vulnerabilidad tradicionales empieza a limitar la descripción correcta de la afectación. Para estos sistemas, INGENIAR propone, como valor agregado, un enfoque diferente basado en probabilidad imprecisa. Al cuantificar los impactos causados en elementos de infraestructura que son sometidos a intensidades cada vez mayores de amenaza, es posible definir diferentes estados de operación. Para intensidades bajas, es posible decir que no se causan daños importantes, pero tampoco impactos a la operación de la infraestructura; es decir, el elemento puede seguir operando en condiciones normales, siendo necesarias únicamente labores preventivas de mantenimiento. En este caso estamos en un primer nivel de *Tolerancia* del elemento al fenómeno. Si se incrementa la intensidad, es posible que se requieran labores de mantenimiento más intensas, y a un mayor costo, para habilitar la operación del elemento, incluso realizando posibles reparaciones menores. En este caso se entra en una región de *Perturbación* al elemento expuesto, en la cual se requiere una

⁷ Se emplea la distribución Beta por facilidad, dado que se encuentra definida en un dominio acotado (intervalo 0-1) y requiere solamente de dos parámetros.

intervención para mantener su operación. Finalmente, ante mayores intensidades, se entra en una fase de *Daño* al elemento, y en consecuencia en la interrupción en su operación, lo cual puede implicar grandes pérdidas y costos para reponer el elemento y restituir el servicio prestado. Cada estado de operación se causa para un intervalo dado de intensidad, e implica un intervalo dado de pérdida, en ese sentido, es posible aproximar una función de vulnerabilidad imprecisa mediante la cual se definen un límite superior y un límite inferior, de tal manera que ante cualquier intensidad la pérdida causada es un intervalo; es decir, no se asume una distribución de probabilidad.

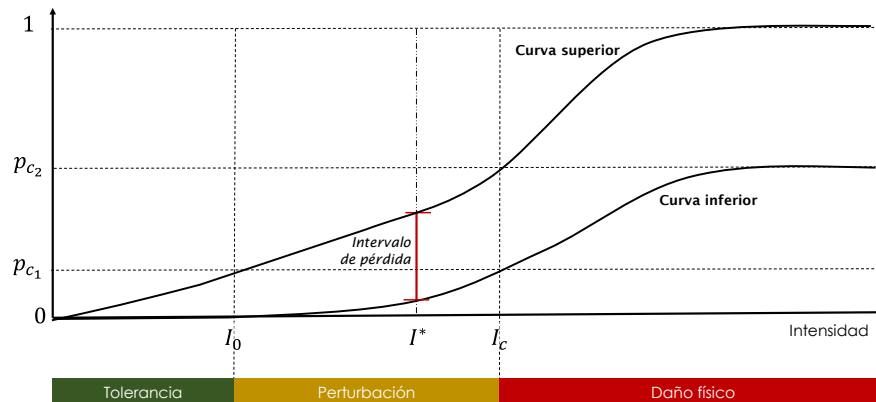


Figura 5. Función de vulnerabilidad por intervalos para infraestructura

En el caso de la actividad agrícola o ganadera, el modelo de vulnerabilidad no puede ser representado por medio de funciones, sino que se requiere estudiar la respuesta del sistema productivo a la intensidad que causa el evento climático de amenaza. INGENIAR propone, como valor agregado, el uso de su modelo de respuesta al agua y temperatura para cultivos, en donde la pérdida se evalúa como la diferencia entre el rendimiento óptimo y la producción bajo el evento climático (e.g. bajo estrés hídrico o térmico). Dicha disminución en el rendimiento se evalúa mediante un modelo de crecimiento y desarrollo de cultivos que es el estándar de evaluación de la FAO, y ha sido adaptado por INGENIAR para la evaluación del riesgo con enfoque probabilista. El modelo permite calcular los efectos de los forzamientos climáticos en el crecimiento de la cobertura vegetal, la conductancia estomática, la senescencia temprana, la profundización de la raíz y el índice de cosecha. La Figura 6 muestra estos cinco procesos (líneas punteadas), dentro del esquema general de desarrollo de rendimiento en cultivos.

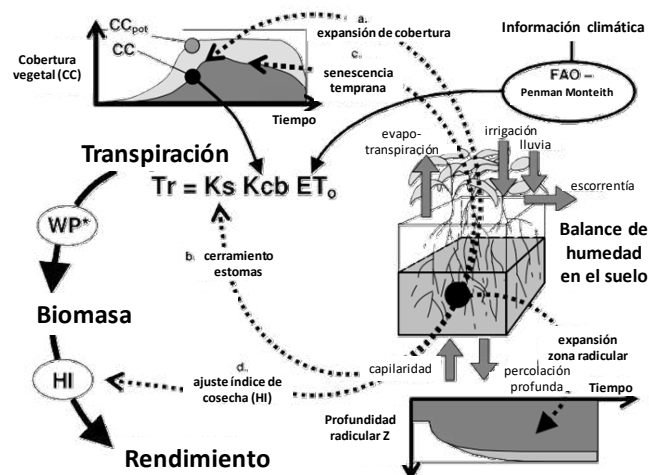


Figura 6. Representación esquemática del modelo de respuesta de cultivos

Para el caso de ganadería de pastoreo y en caso de que se considere importante incluir este sector, INGENIAR propone como valor agregado el uso de su modelo en el cual se verifica el balance necesario entre la cantidad de alimento que aporta la materia seca de la pastura, con los requerimientos de alimentación de cada uno de los animales en el rebaño, el cual depende a su vez de las condiciones fisiológicas de cada animal (sexo, edad, gestante o no, lactante o no, etc.). El forzamiento climático se incorpora mediante un modelo de respuesta de la pastura a las condiciones de agua y temperatura (el mismo presentado anteriormente para cultivos) y que permite modificar la cantidad de alimento que una cierta área productiva puede proveer; es decir, su capacidad de carga, la cual se compara con la carga real para determinar posibles pérdidas en producción. La Figura 7 muestra un esquema del proceso de cuantificación de la materia seca disponible en la pastura.

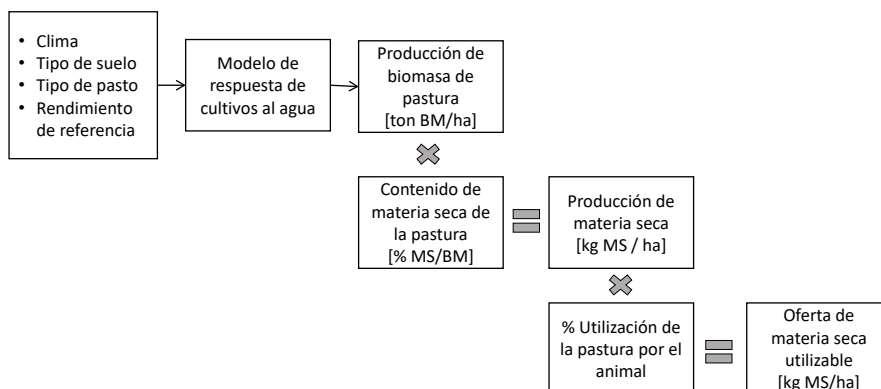


Figura 7. Esquema del proceso de cuantificación de la materia seca disponible en la pastura

La vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos puede ser representada de diferentes maneras según el tipo de amenaza considerada. Por ejemplo, para incendios forestales, el modelo propuesto por INGENIAR asume la vegetación como un combustible geográficamente distribuido por el territorio, con diferentes cargas, humedades y velocidades de reacción, lo que permite modelar el avance del fuego en incendios forestales, así como las medidas necesarias para su extinción. Si, por otra parte, la amenaza corresponde

a un evento tensionante de largo plazo (como cambios en los promedios climáticos) entonces la vulnerabilidad del servicio ecosistémico tiene que ver con la capacidad que tiene el clima futuro de inducir una transición de zona de vida. Según sea el caso, se aplica el modelo de vulnerabilidad específico que permita cuantificar la alteración en la prestación del servicio ecosistémico y de ahí derivar.

3.2.4. Marco teórico por utilizar para la toma de decisiones robusta RDM

Recientemente varios autores han propuesto enfoques para abordar problemas con incertidumbre profunda y orientar la toma de decisiones. Resalta el enfoque, mencionado previamente, conocido como Toma de Decisiones Robusta (RDM en inglés) (Lempert, 2019), el cual sigue una metodología denominada XLRM⁸, en donde X se refiere a la incertidumbre (I en nomenclatura DAMI), L a las posibles acciones a formular (A en nomenclatura DAMI), R al modelo del sistema (M en nomenclatura DAMI) y M son las métricas de éxito de las posibles acciones (D en nomenclatura DAMI). De acuerdo con Lempert (2019), los pasos para lograr una toma de decisiones robusta son: 1) enmarcar el análisis por medio de la definición de un modelo (R) que describa suficientemente bien el problema; 2) simulación, considerando la incertidumbre (X) del efecto de las posibles acciones (L) en el sistema; 3) exploración de resultados y cuantificación de métricas de éxito (M); 4) comparación y análisis del éxito de las acciones en lograr el objetivo planteado y; 5) iteración y reevaluación. En resumen, se reconoce que no es posible lograr una toma de decisiones robusta sin considerar las múltiples ramificaciones que definen el dominio de las posibilidades futuras.

3.2.5 Análisis de resultados de múltiples evaluaciones de riesgo (probabilista y holística)

La evaluación del riesgo se realiza siguiendo la metodología de modelación probabilista del riesgo catastrófico (Cardona, 1986 a, b, c), que tiene como objetivo estimar la distribución de probabilidad de la pérdida que puede presentarse en un conjunto de elementos expuestos, tras la ocurrencia de un evento climático. La modelación probabilista permite entonces realizar pronósticos sobre los niveles futuros de pérdida, considerando las amenazas propias de Colombia y la incertidumbre en su estimación, así como la vulnerabilidad inherente de los elementos expuestos y su respectiva incertidumbre.

El riesgo se modela en términos de pérdidas expresadas en unidades económicas. Para el caso de edificaciones e infraestructura las pérdidas se estiman a partir de los daños probables, para el sector agropecuario las pérdidas se estiman a partir de la reducción en la producción y para el caso de servicios ecosistémicos las pérdidas se estiman a partir del flujo que se deja de percibir. El riesgo se expresa en términos de la curva de excedencia de pérdidas que sigue una ley potencial (las muy grandes son remotas y las menores son las más frecuentes), la pérdida anual esperada y las pérdidas máximas probables. Estas son métricas de riesgo cuantitativas que son útiles para informar de manera robusta, idónea y eficaz los procesos de toma de decisiones. El procedimiento de modelación probabilista del riesgo propuesto por INGENIAR puede resumirse como se ilustra en la Figura 8.

⁸ Llamada también DAMI en español (Desempeño, Acciones, Modelación, Incertidumbre).

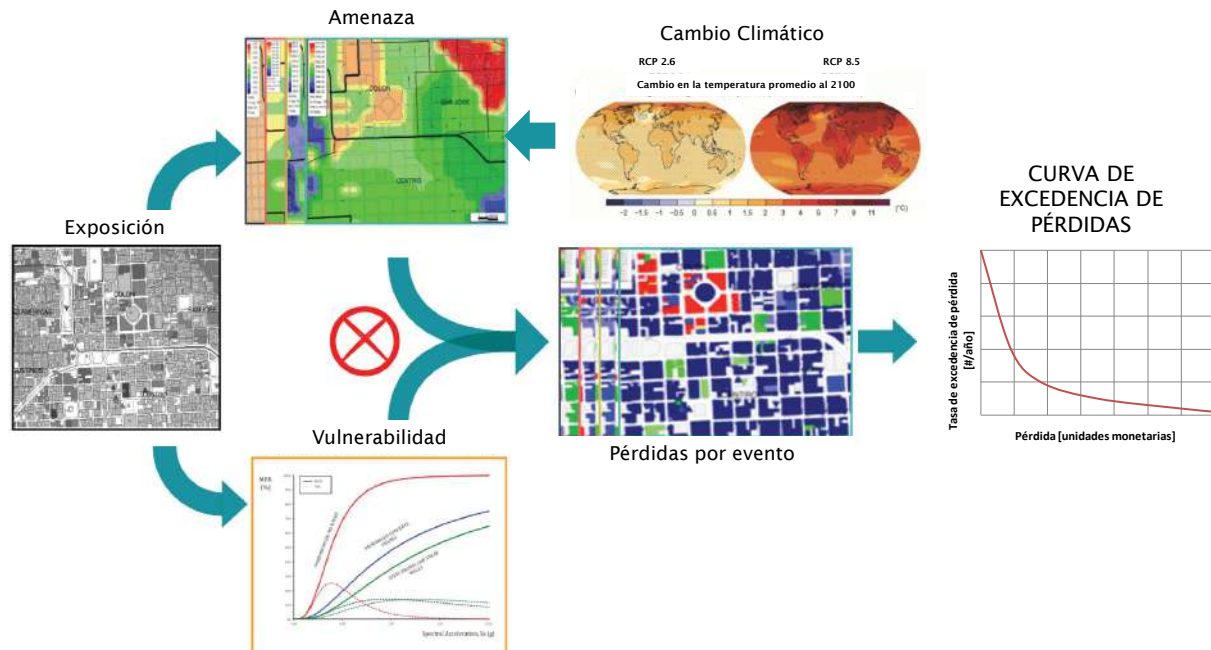


Figura 8. Procedimiento de modelación probabilista del riesgo

El procedimiento de cálculo probabilista del riesgo permite estimar la tasa de excedencia de las cuantías de pérdida que ocurren en todos los elementos expuestos para todos los eventos incluidos en el modelo de amenaza. Como se muestra en la Figura 9, la evaluación probabilista del riesgo se puede resumir en los siguientes pasos: 1) para cada evento, o suceso, se determina la pérdida en todos y cada uno de los elementos expuestos; 2) se calcula la pérdida causada por cada evento como la suma de las pérdidas individuales causadas en cada elemento expuesto; 3) una vez se cuantifican las pérdidas de todos eventos o sucesos que caracterizan la amenaza, se calculan las tasas de excedencia. Al cuantificar la tasa para diferentes montos de pérdida, se obtiene la curva de excedencia de pérdidas, la cual es el resultado principal del análisis probabilista del riesgo APR.

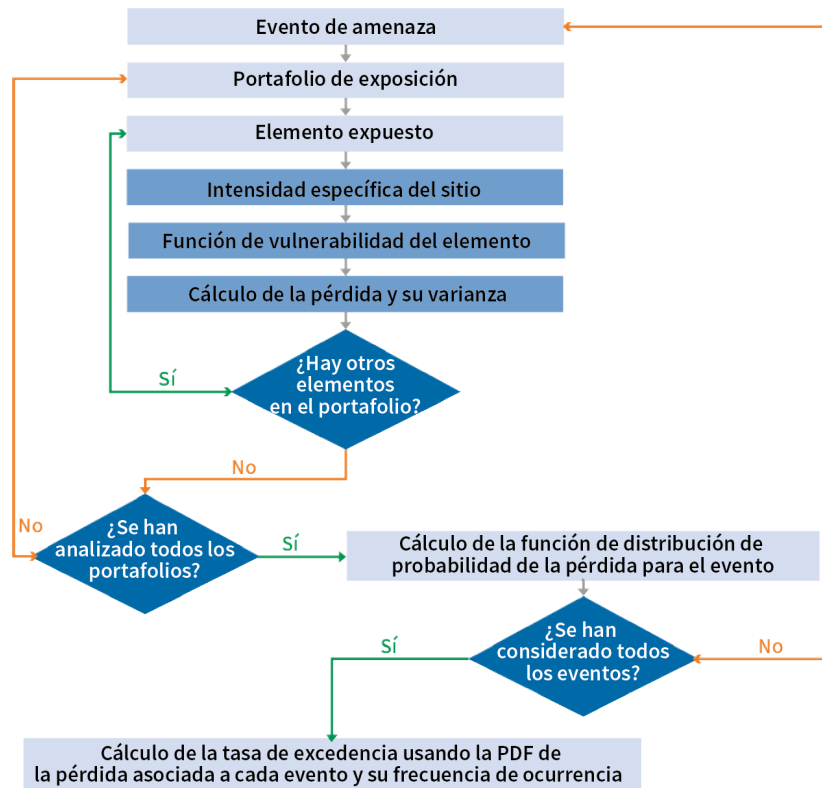


Figura 9. Diagrama de flujo de la evaluación probabilista del riesgo

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de la toma de decisiones robusta RMD y la adaptación al cambio climático. Estas métricas proporcionan una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos indicadores, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa. Esto diferencia este tipo de enfoque de aproximaciones cualitativas de riesgo, que usualmente no son suficientemente robustas y rigurosas y que no facilitan el soporte y determinación de las inversiones en reducción del riesgo y adaptación.

Pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual promedio que, de sumarse, en el largo plazo, equivaldría al total de todas las pérdidas futuras (menores o mayores) que puedan llegar a presentarse. La PAE sería la prima pura anual justa para cubrir anualmente todas las pérdidas factibles. La PAE es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los eventos peligrosos sobre los elementos expuestos vulnerables. Es el indicador más robusto del riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de pérdidas en un solo indicador, sino por ser relativamente insensible a la incertidumbre, debido a que corresponde a la esperanza matemática de las pérdidas en forma anualizada.

Pérdida máxima probable (PML)

Si bien el principal resultado de la evaluación del riesgo es la curva de excedencia de pérdidas, la curva de PML⁹ es usualmente preferida debido a que, en general, es más fácil de comprender la noción de un periodo de retorno que la de una tasa de excedencia. La curva de excedencia de pérdidas y la curva de PML son equivalentes en la información contenida. De la curva de PML se pueden determinar los valores de pérdida para periodos de retorno arbitrarios. La selección del periodo de retorno para una PML como referente depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. La Figura 10 muestra un ejemplo de una curva de PML, en donde, a partir de un período de retorno seleccionado en el eje horizontal, que en este ejemplo es de 400 años, se puede determinar el valor de la pérdida en el eje vertical, lo que indica que esta pérdida se superará en promedio cada 400 años.

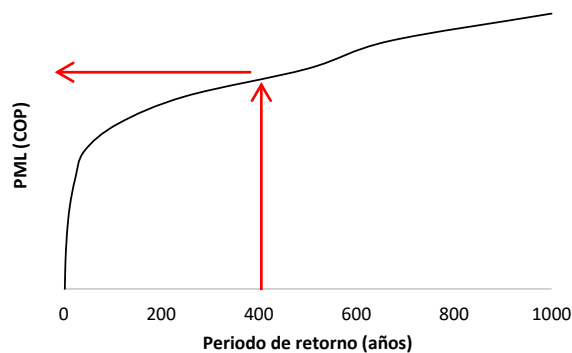


Figura 10. Ejemplo de curva de PML

Probabilidad de ocurrencia en un tiempo de exposición

Equivale a la denominada probabilidad de quiebra (P_Q) que no es más que la probabilidad de exceder un nivel de pérdida dado en un tiempo de relevancia establecido, que podría ser el tiempo en el que se espera hacer uso del elemento en riesgo. Es común presentar un juego de curvas de P_Q , definidas para diferentes tiempos de exposición (ver Figura 11). Al seleccionar un monto de pérdida en el eje horizontal, se determina del gráfico la probabilidad que dicho monto se supere por lo menos una vez en la curva correspondiente a cada tiempo de exposición.

⁹ Probable Maximum Loss

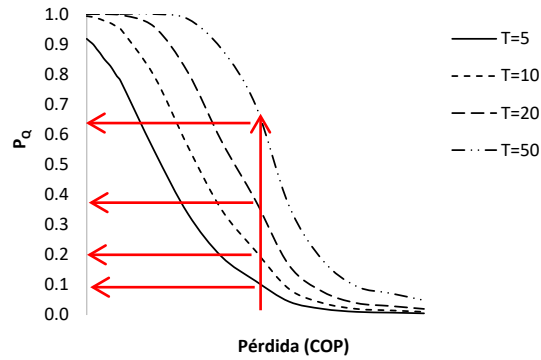


Figura 11. Ejemplo de curvas de P_Q , para diferentes tiempos T de exposición (T en años)

Probabilidad de excedencia de pérdidas en el próximo evento

Esta curva indica cuál es la probabilidad de exceder un cierto valor de pérdida tras la ocurrencia del próximo evento, o de un evento cualquiera tomado al azar. Esta curva no está asociada al tiempo entre eventos peligrosos. Por el contrario, determina la probabilidad de que las pérdidas asociadas a un evento o escenario superen un cierto valor, considerando como si dicho evento ya hubiera ocurrido. La Figura 12 presenta un ejemplo de probabilidad de excedencia del valor de la pérdida en el siguiente evento, en donde a partir de un valor de pérdida seleccionado en el eje horizontal, se puede determinar la probabilidad de que ese valor se supere en el próximo evento, sin importar dentro de cuánto tiempo ocurra.

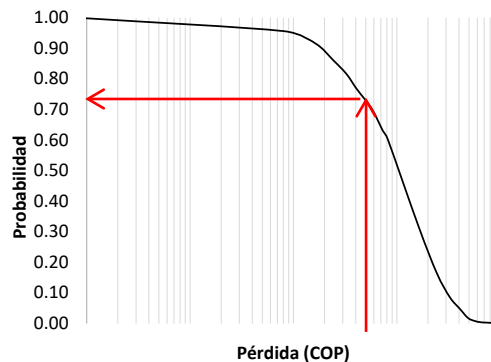


Figura 12. Ejemplo de curva de probabilidad de excedencia de pérdida en el próximo evento

El riesgo abordado desde un punto de vista físico es el punto de partida para analizar los impactos posteriores del cambio climático en la sociedad. Los desastres resultantes de fenómenos climáticos dañan el entorno construido, afectando a las personas y sus actividades de diferentes maneras. Es ampliamente reconocido que el nivel de desarrollo de la sociedad suele determinar la gravedad de las consecuencias derivadas de los desastres. Cardona (2001) desarrolló la metodología de *Evaluación Holística del Riesgo*, como el fin de incorporar variables del contexto en su evaluación, dando cuenta a aspectos sociales, económicos, institucionales, ambientales, de gobernanza, entre otros, asociados con el desarrollo, y que se relacionan con el impacto potencial y la resiliencia, y son también *risk drivers*, impulsores o condicionantes, del riesgo visto desde una perspectiva integral.

La cuantificación física del riesgo es fundamental en el dimensionamiento del problema, así como insumo para el proceso de selección de medidas de adaptación asociadas a la reducción del riesgo y la toma de decisiones robustas. Ahora bien, con el objetivo de darle una visión integral al problema se requiere considerar que condiciones relacionadas con la fragilidad social y la falta de resiliencia pueden contribuir a exacerbar las consecuencias asociadas a la ocurrencia de amenazas climáticas, como ha sido señalado y evaluado con enfoques matemáticos probabilistas por Cardona (2001, 2004), Carreño et al. (2007) y Marulanda et al. (2009).

Con este objetivo, INGENIAR propone, como valor agregado, aplicar el método de evaluación holística del riesgo para orientar la toma de decisiones. En primera instancia es necesario evaluar el daño físico potencial, tal y como se ha indicado anteriormente. El paso siguiente es considerar las condiciones sociales del contexto que pueden agravar los efectos físicos y que son identificadas o reconocidas por diferentes actores interesados. Esto significa que es posible definir el riesgo total a partir del riesgo físico exacerbado por un coeficiente de agravamiento o factor de impacto que incorpora las condiciones de fragilidad socioeconómica y falta de resiliencia que se puede atribuir y medir en forma relativa en unidades de análisis. La Figura 13 ilustra este marco conceptual utilizado a un nivel global.

El coeficiente de agravamiento se determina por medio de un sistema de indicadores, seleccionados según su capacidad para capturar dimensiones importantes y factores subyacentes condicionantes de riesgo en una sociedad, así como la cobertura y disponibilidad de los datos. Adicionalmente, se busca que estas variables abarquen un amplio espectro de cuestiones que subyacen a la noción de riesgo en términos de condiciones de vulnerabilidad predominantes más allá de la susceptibilidad física, es decir, factores relacionados con la fragilidad social y falta de resiliencia que favorecen impactos indirectos e intangibles, afectando la capacidad de la sociedad para hacer frente a los desastres, aumentando la incapacidad para absorber las consecuencias, responder eficientemente y recuperarse del impacto.

El enfoque de evaluación holística establece que para reducir el riesgo existente o para prevenir la generación de nuevos riesgos se requiere de un sistema integral de gestión del riesgo y adaptación, basado en una estructura institucional acompañada de la implementación de políticas y estrategias para intervenir los elementos vulnerables y también diversos factores del entorno que crean o aumentan el riesgo. De la misma manera, en caso de que se materialice una amenaza que derive en un desastre, se deben realizar acciones de respuesta y recuperación de emergencia como parte del marco de gestión del riesgo, adaptación y transformación.

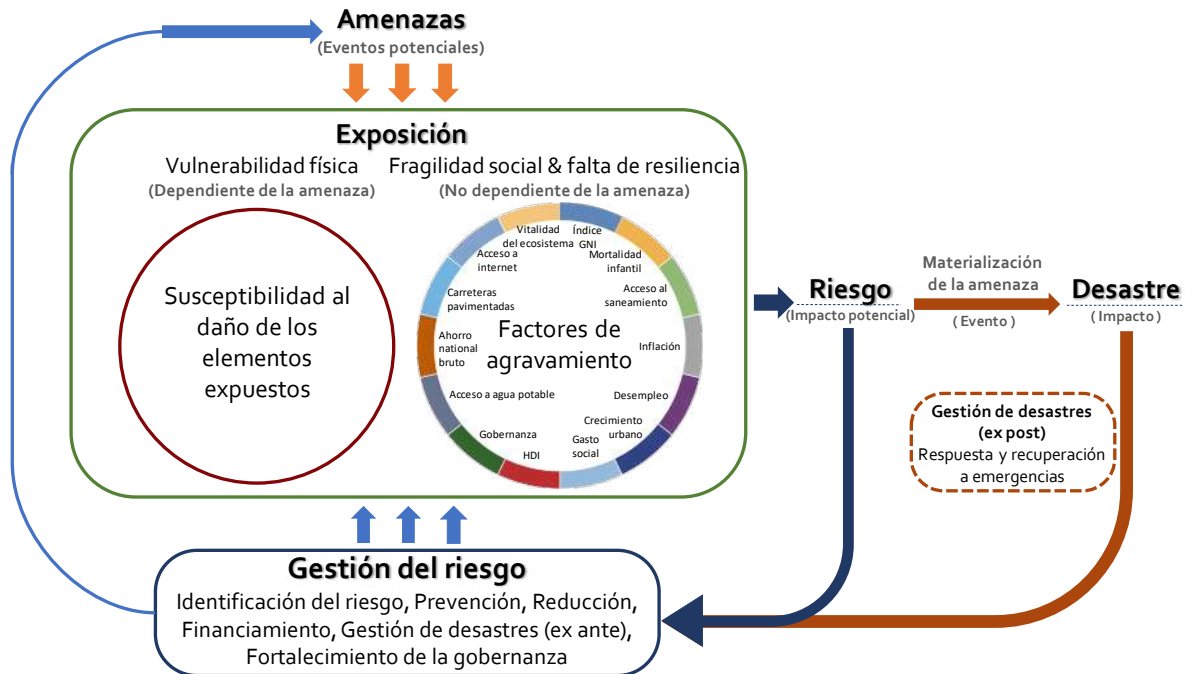


Figura 13. Ilustración del enfoque holístico de riesgo de desastres

3.2.6. Puesta en común de metodología y variables, capacitación – Taller 1

La planificación a largo plazo trae consigo retos y complejidades que pueden ser considerados bajo el enfoque de toma de decisión robusta RDM, con el cual se podrá lograr, entre otros: Un marco que sirva o para identificar vulnerabilidades de estrategias actuales, reflejar objetivos e ideas de manera participativa multidisciplinar y con enfoque de género y reconocer diferentes acciones que respondan a múltiples objetivos de desarrollo en varias condiciones. Para ello es importante tener en cuenta el paso a paso de la RDM y en particular para el proceso participativo en la definición de la matriz DAMI/XLRM, previamente mencionada, que será la base para el continuo del proceso y toma de decisiones.

Se hará un proceso de análisis participativo en el Taller 1 para la puesta en común de las variables del proceso DAMI: Medidas de desempeño (D) para evaluar la adaptación a largo plazo, ¿Qué objetivos de adaptación son importantes de lograr en el largo plazo?, ¿Como se puede decir que una estrategia de largo plazo es exitosa?; políticas y acciones (A) que contribuyan al logro del desempeño, ¿Qué políticas y acciones pueden implementarse para lograr el éxito?; datos y modelación (M), ¿Qué datos/resultados y modelos se deben utilizar para definir el desempeño?; y las incertidumbres profundas (I), ¿Qué factores inciertos pueden incidir en el logro de los objetivos a largo plazo?.

Entregables de la TAREA 2

Como productos derivados del desarrollo de la TAREA 2 se plantean:

- *Entregable 2:* Informe técnico con la estructuración del proceso con el marco RDM: Análisis de riesgo de la línea base, propuesta preliminar de las variables para las dimensiones XLRM y los resultados del taller 1 (incluyendo memorias y variables finales para el marco RDM).

3.3 Tarea 3: Riesgo climático con medidas de adaptación e insumos para el PNACC

El país cuenta con normativa, instrumentos e instancias relacionadas con la gestión del cambio climático y en particular con la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo de desastres, que orientan la ejecución de programas y proyectos en los territorios. Desde el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), hasta la Contribución Nacional Determinada (NDC) y los Planes Integrales de Gestión de Cambio Climático Territoriales (PIGCC), se debe buscar generar insumos que permitan llegar a acciones cada vez más concretas y la valoración económica de las mismas para su selección e implementación, articuladas efectivamente también con aquellas de gestión del riesgo de desastres y los planes respectivos.

Este trabajo le aporta, por ejemplo, al objetivo del PNACC de gestionar el conocimiento sobre el cambio climático y sus impactos potenciales, así como genera insumos para el objetivo 3: promover la transformación del desarrollo para la resiliencia al cambio climático, considerando las infraestructuras básicas y sectoriales que deben corregir condiciones de riesgo, por mencionar algunos. Igualmente, la NDC, en su proceso permanente de actualización, contempla metas a partir de estudios de riesgo climático (actualmente de la Tercera Comunicación de Cambio Climático, TCCC, 2016), para el sector vivienda, transporte, agricultura y ambiente, que pueden beneficiarse de este estudio.

La adaptación es el conjunto acciones y medidas encaminadas a reducir los efectos adversos del cambio climático en las comunidades, sus medios de vida, el medio ambiente y el ambiente construido. Hay medidas de adaptación que contribuyen a la resiliencia y la sostenibilidad y algunas son especialmente efectivas y directas para reducir el riesgo. En condiciones climáticas futuras desfavorables, el riesgo de desastres depende en gran medida de las condiciones socioeconómicas y ambientales del entorno en el cual ocurren los desastres, que se han ido configurando progresivamente mediante un proceso acumulativo que deriva inevitablemente en las actuales condiciones de exposición y vulnerabilidad. Es decir, el riesgo existente se ha configurado, en su mayoría, de manera independiente al calentamiento global y el cambio climático, pero puede agravarse a causa de la cantidad de las emisiones de gases de efecto invernadero, que pueden modificar el clima global en forma significativa.

Por lo tanto, y desde un punto de vista netamente práctico, es posible romper la tensión existente a nivel ontológico entre adaptación al cambio climático y gestión del riesgo de desastres, toda vez que las acciones resultantes de ambos buscan intervenir las causas que llevan a la existencia del riesgo y su efectividad puede ser medida en términos de la reducción del riesgo (Cardona, 2012; Cardona et al. 2012). De esta manera es posible interpretar las métricas probabilistas del riesgo como indicadores intermedios en una cuantificación de mayor alcance, en la cual participan diferentes medidas de adaptación que impondrán condiciones para reducir en mayor o menor medida el riesgo en los portafolios evaluados. El nivel de reducción alcanzado, con las medidas de adaptación se cuantifica en términos de una reducción en las métricas de riesgo en caso de llevarse a cabo.

3.3.1. Formulación de posibles medidas de reducción del riesgo/adaptación

Existen diferentes maneras de intervenir los factores que conducen a la existencia del riesgo de desastres, con diferentes grados de factibilidad y efectividad. En general, no es posible afirmar que una medida sea más apropiada que otra sin incorporar el contexto, la factibilidad técnica y política, la capacidad de ejecución institucional, entre otros factores. INGENIAR propondrá una colección de medidas de adaptación para ser evaluadas, seleccionadas de forma participativa¹⁰ y considerando como base las identificadas en la NDC de Colombia, las cuales se verá la factibilidad de ser incorporadas al modelo, considerando su factibilidad de implementación real en el futuro, así como la posibilidad de simular de manera apropiada su efecto en la modelación del riesgo. Los costos de implementación de las diferentes medidas de adaptación son estimados a partir de la información disponible sobre valores reales para establecer un orden de magnitud de la inversión requerida en adaptación. Se considerarán medidas de adaptación estructurales y soluciones basadas en la naturaleza, así como acciones no estructurales holísticas que influyan en el bienestar social, económico y ambiental. Nótese que las medidas de adaptación no se implementan de forma individual y separada, sino como componentes de una estrategia que las agrupa y cuyo impacto es, por lo tanto, agregado.

Apelando al principio de gradualidad, como principio orientador de la adaptación al cambio climático, no se considera factible que los procesos de adaptación que se deriven de la selección de una estrategia óptima puedan necesariamente ser plasmados en un plan de acción debido a la capacidad de ejecución financiera y técnica de las instituciones colombianas. En este sentido, se establecerán diferentes niveles de adaptación, con el fin de proveer a Minambiente y la UNGRD de una cuantificación de las implicaciones de una mayor o menor adaptación sobre el riesgo derivado del clima, pero dejando abierta la posibilidad a intervenciones graduales que, en el largo plazo, lleven al país a un nivel de riesgo reducido y tolerable. Por esta razón, en el proceso de encontrar un óptimo en la combinación de medidas de adaptación, se incluye siempre la posibilidad de no implementar ninguna medida.

Lo anterior se logra encontrando estrategias de adaptación que son óptimas para diferentes niveles de inversión, desde inversión cero (no acción) hasta un valor máximo considerado. De esta manera se establecen montos de inversión de manera creciente y se determinan las acciones a ser implementadas para cada monto que reducen de manera más efectiva la pérdida. Cada monto de inversión deriva entonces en una estrategia de adaptación diferente. A medida que el monto de inversión aumenta se implementan medidas sobre un porcentaje mayor del portafolio de exposición, lo que implica una disminución en la PAE del portafolio estudiado¹¹. Por supuesto, el efecto de cada estrategia de adaptación será diferente para cada posible clima futuro. La Figura 14 ilustra la variación en la PAE para un portafolio de edificaciones residenciales en Colombia ante inundaciones por desbordamiento de ríos, estimada en la

¹⁰ Se llevarán a cabo talleres con los actores previamente identificados para formular de manera participativa las medidas de adaptación a ser evaluadas. El número total de talleres a realizar se definirá con el Comité de Seguimiento en función de los municipios y sectores y no menos de los que se consideran como el mínimo en los términos de referencia.

¹¹ Para el caso presentado como ejemplo, se trata de riesgo climático multiamenaza en el portafolio de viviendas de nivel socioeconómico bajo. Las medidas de adaptación son: protección de viviendas con defensas (diques), reubicación de vivienda, adaptación de viviendas con palafitos (a diferentes alturas: 0.5m, 1.0m, 4.5m y 2.0m). Los climas considerados corresponden a las proyecciones dadas por el modelo HadGEM 2 AO para los RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, y las dadas por el modelo ensamble construido por el Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM de Colombia.

Fase 1, con respecto a los montos de inversión requeridos para llevar el riesgo a los niveles indicados. A cada nivel de inversión le corresponde una cierta distribución de medidas de adaptación, obtenida de forma robusta mediante la optimización de sus capacidades en reducción del riesgo y el costo requerido de implementación, por medio de la metodología propuesta por INGENIAR para esta consultoría, ya a nivel municipal, que combina la evaluación probabilista del riesgo con la toma de decisiones robustas.

En la Figura 14 se puede visualizar como a medida que el monto de inversión aumenta, es decir, a medida que más y más elementos expuestos son intervenidos por alguna de las medidas de adaptación definidas, el intervalo de variación de la PAE para los diferentes climas se hace cada vez más pequeño, y las curvas se estabilizan en un valor de PAE constante. En este punto se ha alcanzado el límite superior de la adaptación. Este límite tiene dos características fundamentales: i) a partir de este punto las posibles variaciones en el clima futuro no representan un cambio sensible en el riesgo y ii) mayores inversiones no implican mayores reducciones en la pérdida pues se ha alcanzado el límite de efectividad de la combinación de las medidas consideradas. Por lo tanto, este límite indica un nivel máximo de adaptación. La pérdida remanente corresponde al riesgo residual que no es posible reducir con las medidas consideradas.

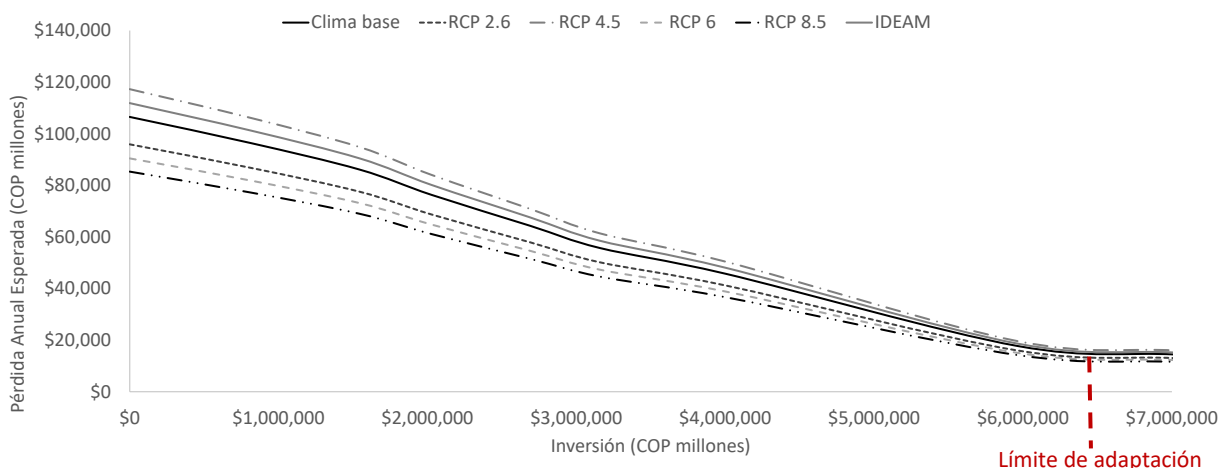


Figura 14. Reducción en el riesgo climático alcanzada con diferentes montos de inversión en adaptación. Se indica en rojo el límite de adaptación. (Tomado del modelo realizado por INGENIAR para E2050 Colombia)

Ahora bien, cada monto de inversión en la Figura 15 implica una estrategia de adaptación distinta, es decir, una colección de medidas de adaptación cuya aplicación conjunta tiene el costo mostrado y puede reducir el riesgo al nivel indicado. En la Figura 15 se ilustran dos ejemplos de dichas estrategias, seleccionadas para montos de inversión arbitrarios. Los diagramas presentados muestran el porcentaje de elementos expuestos intervenidos por cada tipo de intervención, a nivel nacional, que se requieren dentro de cada estrategia de adaptación óptima cuyo monto de inversión es el indicado. Es decir, la distribución de acciones presentada no es arbitraria, sino obtenida mediante un proceso de optimización en donde es posible encontrar la combinación de medidas más apropiada para reducir el riesgo lo máximo posible a un costo fijo. Esta metodología ha sido desarrollada por INGENIAR bajo el nombre de Ingeniería de Control del Riesgo (RCE – Risk Control Engineering) y su uso se propone como un valor agregado a esta consultoría en la medida que incorpora los insumos de la toma de decisiones robusta RDM. Nótese que los dos montos

de inversión presentados en la Figura 15, corresponden a dos posiciones en el eje horizontal de la Figura 15. Esto ilustra que, en el enfoque metodológico propuesto, no se evaluará una única estrategia de adaptación, sino que se obtendrá un conjunto completo (menú de posibilidades), para que sean los tomadores de decisiones de las instituciones colombianas quienes, dentro del ámbito de su competencia, decidan la inversión en adaptación que debe realizar el país. Este ejemplo, que incluye los departamentos ilustra lo que es posible realizar en los municipios con una mayor resolución y una evaluación específica.

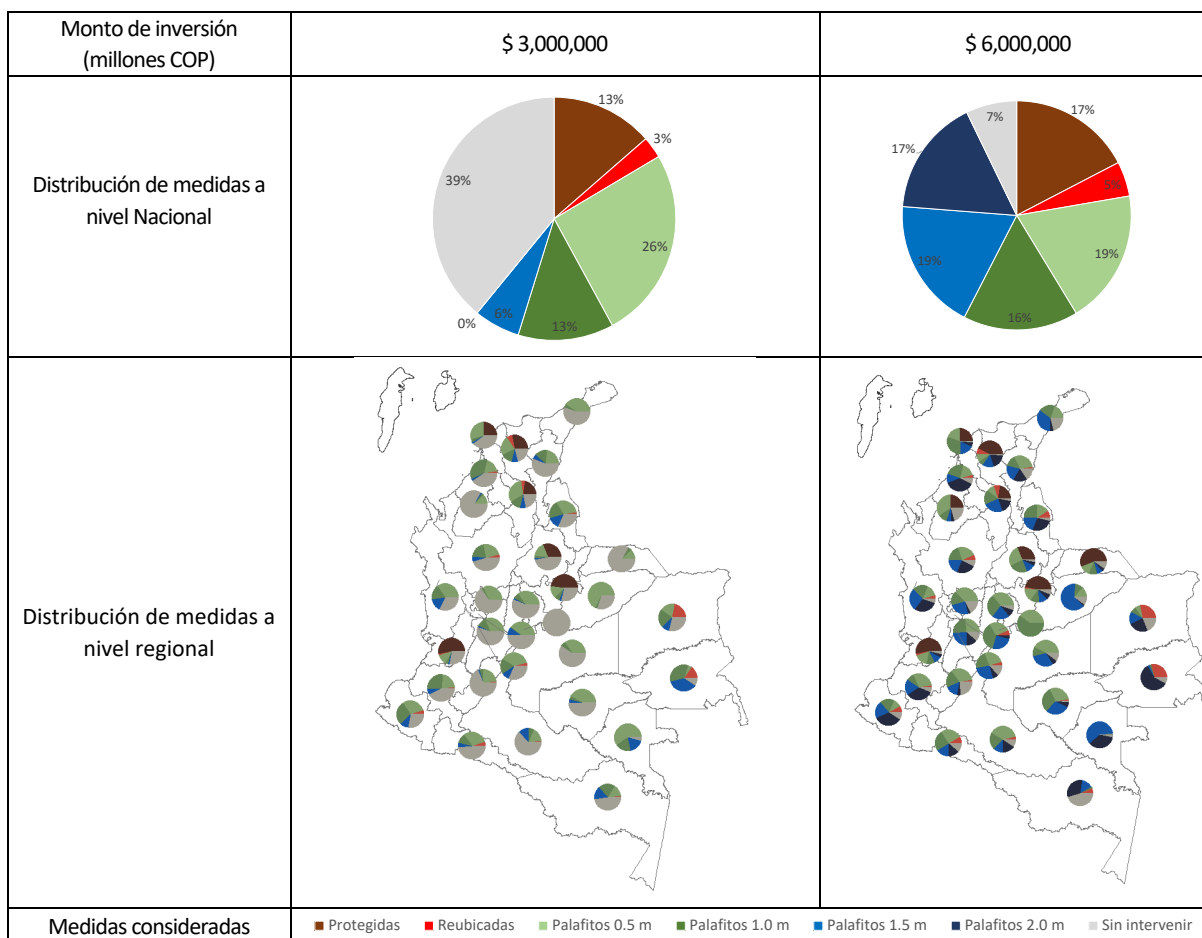


Figura 15. Distribución de medidas de adaptación a nivel nacional y regional para dos estrategias con un monto de inversión dado. (Tomado del modelo realizado por INGENIAR para E2050 Colombia)

Las cifras y distribución de medidas mostradas en la primera parte de la Figura 14 son para el orden nacional. No obstante, la manera como cada medida se implementa a nivel departamental cambia considerablemente, pues depende de las condiciones particulares de amenaza, exposición y vulnerabilidad que, en cada departamento, conducen a la existencia de riesgo climático. Entonces, ha sido necesario subdividir la estrategia nacional, para cada monto de inversión, en estrategias departamentales, que dan cuenta de las particularidades de cada departamento y que, agregadas, conforman la estrategia nacional para el monto de inversión seleccionado. La metodología propuesta por INGENIAR para esta consultoría, a nivel municipal, permite definir con mayor soporte las estrategias de adaptación que deben explorarse a nivel municipal/sectorial y con los actores locales.

3.3.2. Análisis de riesgo multiamenaza con toma de decisiones robusta RDM

Tanto el riesgo catastrófico asociado al cambio climático como la manera como las medidas de adaptación modifican su impacto, son estados hipotéticos cuya cuantificación exacta no es posible. Esto implica que la modelación del riesgo derivado del clima requiere de una cuantificación rigurosa de la incertidumbre, de lo contrario, no se está hablando de riesgo de desastres. Del mismo modo, la incorporación de medidas de adaptación que intervienen las condiciones que conducen a la existencia de riesgo, debe seguir un enfoque que permita conocer todas las posibles variaciones de la forma en que puede darse la intervención. No solo se trata de un problema fuertemente no lineal, sino profundamente incierto. A esto se le conoce como *incertidumbre profunda*. Hacer frente a la incertidumbre profunda requiere de enfoques novedosos que faciliten el proceso de toma de decisiones, llevándolo más allá de la visión clásica cualitativa y determinista (incompleta e insuficiente) en la que el problema y su solución pueden ser perfectamente determinados, a una visión centrada en la incertidumbre, basada en los planteamientos de la ciencia postnormal, en donde se reconoce el vasto dominio de posibilidades como puede desarrollarse el problema y se busca una solución que sea efectiva en la mayoría de futuros inciertos.

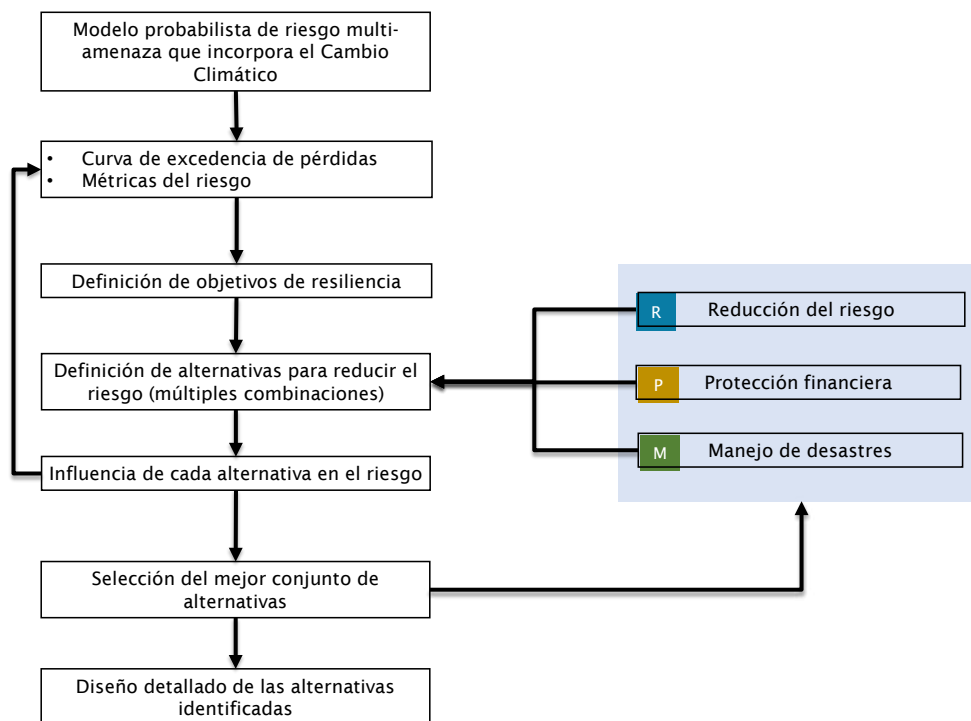


Figura 16. Proceso de Ingeniería de Control del Riesgo (RCE)

Siguiendo los metaconceptos de la teoría de control, INGENIAR ha desarrollado, como se mencionó previamente, en años recientes la llamada Ingeniería de Control del Riesgo (Risk Control Engineering – RCE, ver Bernal et al. 2021), como metodología para la cuantificación de las posibles maneras como puede controlarse el riesgo de desastres a partir de diferentes tipos de intervención. La RCE es un marco metodológico de cómputo diseñado específicamente para ayudar a los gobiernos, las instituciones y las partes interesadas del sector privado a orientar la toma de decisiones bajo incertidumbre profunda en el contexto de la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático. El proceso de la RCE se resume en la Figura 16. La RCE sigue los lineamientos planteados por Lempert (2019) e integra el proceso participativo

La metodología RCE considera tres tipos de acciones o medidas de adaptación que pueden ser incorporadas en la modelación con el fin de medir su efectividad. Primero, acciones de *reducción del riesgo*, las cuales buscan disminuir la exposición y la vulnerabilidad, y en algunos casos especiales la amenaza. Estas son acciones de mitigación, prevención y planificación que concretamente corrigen la exposición o la vulnerabilidad creadas, o evitan la configuración de nueva exposición y vulnerabilidad, y en consecuencia reducen directamente la curva de excedencia de pérdidas.

Se consideran también medidas de *protección financiera*, las cuales buscan brindar los mecanismos necesarios para garantizar la liquidez y disponibilidad de recursos con los cuales puedan sufragarse los costos de los desastres. En estos mecanismos es usual ceder o transferir parte del riesgo a un tercero, que tiene la responsabilidad, a cambio de una compensación económica, de cubrir parte de las pérdidas con sus propios recursos. Si bien estas medidas no inciden directamente en la pérdida directa, si reducen la pérdida neta del responsable del riesgo.

Finalmente, las acciones de *manejo de desastres* permiten limitar los impactos totales una vez ha ocurrido el desastre. Los procesos de atención inmediata, así como la reconstrucción, recuperación y restitución de servicios esenciales, deben ser definidos con base en el modelo de riesgo y tienen una incidencia importante en la reinstalación o no de las condiciones de exposición y vulnerabilidad preexistentes, de cara a eventos futuros.

Como se mencionó anteriormente, una estrategia de adaptación consiste en la combinación de múltiples medidas de adaptación. Puede definirse en términos de: i) las medidas que la componen; ii) la capacidad de reducción del riesgo de cada medida; y iii) el costo de implementación de cada medida. La incorporación de las medidas de adaptación en el modelo de riesgo se realiza modificando los aspectos que se espera sean modificados por la medida, por ejemplo:

- El reforzamiento estructural modifica la vulnerabilidad de las construcciones e infraestructura expuestas, reduciendo la potencial pérdida una vez ocurren los eventos de amenaza.
- Un proceso de reubicación cambia directamente la exposición, reduciendo el valor expuesto al evento. Los elementos son trasladados a otra ubicación, con exposición y vulnerabilidad diferentes a los originales.
- Un mecanismo de protección financiera reduce la pérdida para el responsable del riesgo, limitando las pérdidas netas como máximo a las porciones en retención.

La reducción del riesgo a un nivel aceptable puede lograrse por medio de una amplia cantidad de combinaciones de medidas de adaptación. La mejor combinación de medidas es usualmente muy difícil de establecer sin arbitrariedad. Por esta razón, en la RCE se establecen de forma estocástica múltiples posibles estrategias de adaptación con el fin de probar la efectividad de todas dentro del modelo de riesgo. Dado que la búsqueda aleatoria de la combinación óptima puede ser demasiado extensa, se emplea computación evolutiva con el fin de aproximarse a la estrategia o combinación de medidas que permitan reducir el riesgo a menor costo. A continuación, se resume el algoritmo genético de optimización implementado dentro de la RCE:

1. Se crean al azar un gran número de combinaciones de medidas de adaptación para poblar una primera generación de estrategias. Cada estrategia se considera un individuo. El genotipo de un individuo es el conjunto de medidas de adaptación que lo componen (ver Figura 18). Cada

individuo tiene una capacidad diferente de reducir el riesgo. Aquel que reduzca el riesgo a un menor costo se considera el *Campeón* de la primera generación.

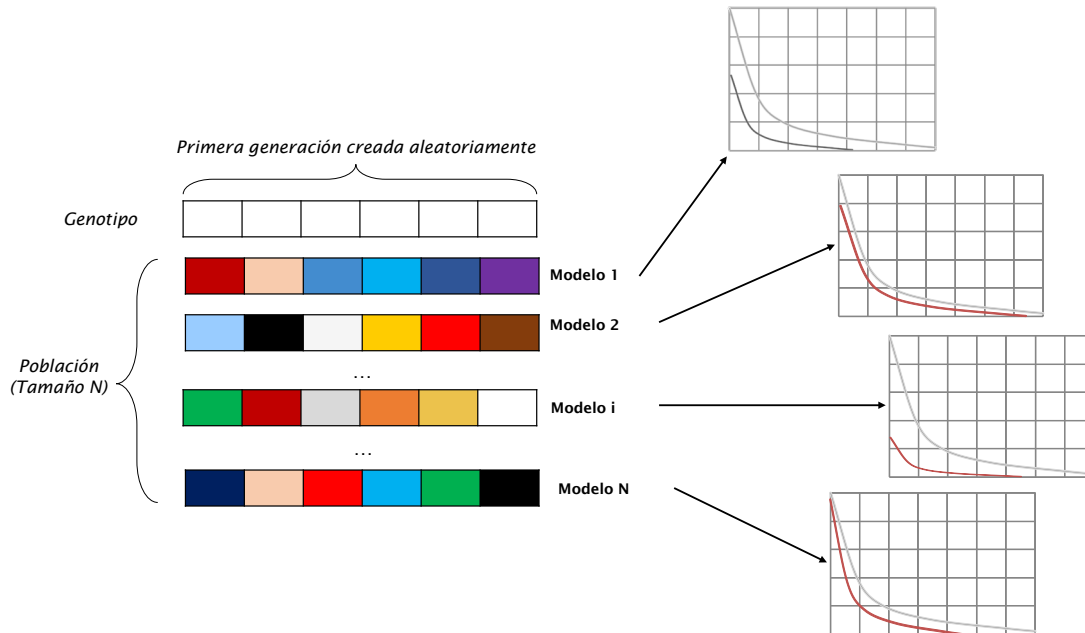


Figura 18. Ilustración de la creación de una primera generación de estrategias de adaptación. Los colores en los cuadros son para ilustrar las diferentes características dentro de cada medida.

2. El proceso evolutivo comienza de manera que se crean aleatoriamente nuevas combinaciones de alternativas como resultado del cruce y mutación de los individuos de la generación anterior. El proceso se repite por un cierto número de generaciones. El Campeón de la última generación tiene la combinación óptima de medidas de adaptación. Esta combinación es un fuerte candidato para convertirse en la estrategia de adaptación a llevar a cabo.

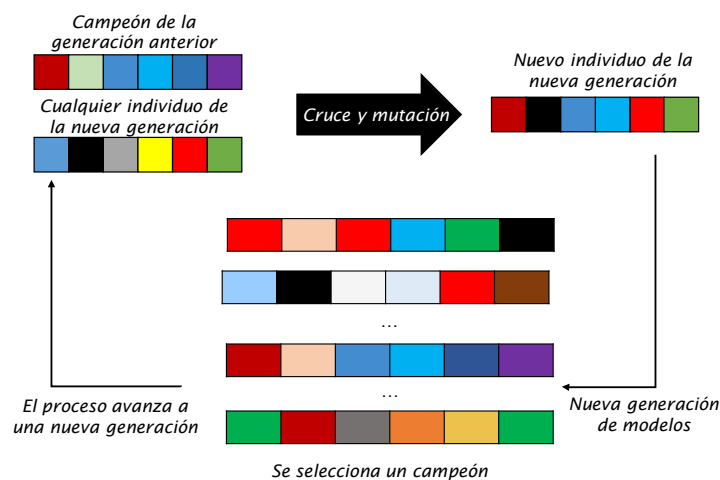


Figura 19. Ilustración del proceso evolutivo para la optimización de combinación de medidas de adaptación

Dado que se trata de un enfoque basado en optimización de búsqueda aleatoria, las estrategias de adaptación obtenidas del proceso pueden variar si se ejecuta varias veces. Es posible entonces definir un grupo de posibles estrategias de adaptación, que cumplen con los criterios de optimización u otros criterios restrictivos (como por ejemplo un determinado presupuesto máximo de inversión), con el fin de presentar un conjunto de posibles estrategias al tomador de decisiones. Es decir que, en un proceso de toma de decisiones robustas, la optimización es simplemente una herramienta de ayuda a la preselección de estrategias de adaptación dentro del vasto dominio de posibilidades.

3.3.4. Articulación de resultados con el PNACC y taller de finalización, Taller 3

Como componente final de esta consultoría, se generará una propuesta de acciones e insumos que permitan mejorar las capacidades locales en evaluación del riesgo y mejorar la metodología de evaluación del riesgo de desastres por cambio climático para el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, PNACC, el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, PNGRD, los Planes Departamentales y Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres que se actualicen en el futuro por cuenta de las instituciones colombianas. Con este objetivo, se revisará la metodología existente y se generarán recomendaciones de mejora específicas con base en los aprendizajes logrados en el desarrollo de esta consultoría a nivel municipal y en general a nivel departamental y nacional, que se pondrá en consideración con los resultados en el Taller 3.

Adicionalmente, y como valor agregado, INGENIAR propone el desarrollo de un curso de modelación del riesgo por cambio climático, en el cual se desarrollen a nivel teórico detallado los diferentes aspectos técnicos de la modelación adelantada, así como prácticas con los módulos de software de modelación de la suite CAPRA ROBOT. Este sería un curso virtual, disponible durante la duración del proyecto, orientado a funcionarios de las instituciones y docentes e investigadores de las universidades colombianas que deseen aprender las bases científicas del proceso de modelación probabilista del riesgo y toma de decisiones robusta aplicado por INGENIAR en esta consultoría.

Se propone que este curso se desarrolle de manera virtual, con contenidos enfocados a la modelación probabilista del riesgo con cambio climático, modelación de amenazas, exposición y vulnerabilidad, y toma de decisiones robusta de adaptación, dentro del marco del alcance definido en esta consultoría. El contenido propuesto incluye sesiones de estudio en video, los cuales permiten al estudiante completar el curso en su propio tiempo y a su propio ritmo. Los videos comprenden tanto sesiones teóricas en las cuales se desarrolla un tema específico, así como sesiones prácticas (tutoriales) en el uso de módulos de la plataforma CAPRA ROBOT. INGENIAR cuenta con amplia experiencia en el desarrollo de este tipo de cursos, como por ejemplo el desarrollado para la Florida International University – FIU, mediante el cual actualmente se forman en modelación probabilista del riesgo ante diferentes fenómenos naturales, docentes e investigadores de universidades de Colombia, Costa Rica y Chile.

Entregables de la TAREA 3

Como productos derivados del desarrollo de la TAREA 3 se plantean:

- **Entregable 3:** Informe técnico de resultados del análisis de riesgo con propuestas de adaptación bajo RDM: Incluye la descripción detallada de las modificaciones a los diferentes componentes del modelo de riesgo y los resultados de pérdidas considerando las diferentes propuestas.

- **Entregable 4:** Informe técnico final e insumos para el PNACC: Incluye los resultados finales del estudio y su articulación con el PNACC, los resultados de los talleres 2 y 3 además de las conclusiones y recomendaciones a Largo Plazo con consideraciones de género.
- **Entregable 5:** Resumen ejecutivo con enfoque, resultados y conclusiones (a manera de nota técnica) de máximo 20 páginas con los principales aspectos metodológicos del proceso.

Tabla 3. Planteamiento sobre los talleres de la consultoría

Actividades de participación y seguimiento	Mes
1 reunión con el Comité de Seguimiento para discusión de información necesaria y disponible, para la selección de municipios/áreas/regiones, y para la selección de actores clave en los procesos de participación	3
1 reunión con actores clave del gobierno nacional para solicitud de información	4
1 reunión de socialización de avances de resultados de la evaluación del riesgo, con comité de seguimiento	6 y 7
1 taller para presentación de la metodología a desarrollar para la toma de decisiones robusta (RDM) (Taller 1) con actores definidos	7
1 taller para priorización de las posibles medidas de reducción del riesgo y acciones de adaptación (Taller 2) con actores definidos	8
1 taller para articulación de resultados con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) (Taller 3) con actores definidos	9
1 reunión de socialización de resultados finales, con el Comité de Seguimiento y actores claves	10

Los talleres o mesas técnicas están previstos para ocurrir en dos momentos o etapas durante el desarrollo del proyecto: para la delimitación de las áreas de análisis (municipio/área/región/departamento), caracterización del sector y posterior a la modelación del riesgo. En la Tarea 1, se realizarán mesas técnicas con algunos actores clave con el fin de vincularlos al proyecto, socializar aspectos metodológicos, explicar el objetivo y actividades del proyecto y recibir la información correspondiente para el desarrollo del proyecto desde el quehacer de cada institución, involucrándolas en el proceso RDM. En la Etapa 2 se promoverá la participación de los actores seleccionados para hacer la concertación de las posibles medidas de adaptación que puedan ser aplicadas en los diferentes niveles territoriales, sectores y para los diferentes tipos de amenazas con la técnica RCE (APR y RDM). Finalmente, se realizará la socialización con los usuarios directos y con los tomadores de decisiones directos.

REFERENCIAS

Bernal, G., Cardona, O.D., Marulanda, M., Carreño, M. L. (2021). Dealing with Uncertainty using Fully Probabilistic Risk Assessment for Decision Making. Chapter 14 in: Eslamian, S., & Eslamian, F. (Eds): Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience. Springer.

Cardona, O.D. (1986a). Análisis de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico. Seminario Nacional sobre Prevención y Manejo de Catástrofes Naturales, Asociación de Ingenieros Estructurales, octubre 1986, Medellín.

Cardona, O.D. (1986b). Estudios de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico: Planificación física y urbana en áreas propensas. Simposio International sobre Neotectónica y Riesgos Volcánicos, Revista CIAF No. 11, diciembre 1986, Bogotá.

Cardona, O.D. (1986c). Estudios de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico: Planificación física y urbana en áreas propensas. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reporte AIS-33. diciembre 1986, Bogotá.

Cardona, O.D. (2001). Estimación Holística del Riesgo Sísmico utilizando Sistemas Dinámicos Complejos, Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
<http://www.desenredando.org/public/varios/2001/ehrisusd/index.html>

Cardona, O.D. (2004). "The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management", in Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People, G. Bankoff, G. Frerks, D. Hilhorst (Ed), Earthscan Publishers, London.

Cardona, O.D. (2012). Un marco conceptual común para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático: Encuentros y desencuentros de una iniciativa insoslayable. En: Perspectivas de investigación y acción frente al cambio climático en Latinoamérica, F. Briones (Coordinador). La Red – CIGIR, pag 13-38, Talleres Gráficos Universitarios, ULA: Mérida, Venezuela.
https://www.desenredando.org/public/2012/LaRed_Desastres_y_Sociedad_2012-07_web.pdf

Cardona, O.D., van Aalst, M., Birkmann, J., Fordham, M., MacGregor G., Perez, R., Pulwarty, R., Schipper, L., Sinh B.T., Decamps, H., Keim, M. (2012). "Determinants of Risk: Exposure and Vulnerability" in Managing Extreme Events and Disaster to Advance in Adaptation to Climate Change. Edited by IPCC WG II, SREX, 65-108, ISBN 978-1-107-60780-4 Cambridge University Press. N

Carreño, M.L, Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2007). Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach, Journal of Natural Hazards, Online September 2006, Vol. 40, N 1, January, 137-172, Springer Netherlands.

Groves, David G., Michelle Miro, James Syme, Alejandro U. Becerra-Ornelas, Edmundo Molina Pérez, Valentina Saavedra Gómez, Adrien Vogt-Schilb2 (2021). Planificación de Infraestructura Hídrica para el Futuro Incierto En América Latina. Un Enfoque Eficiente en Costos y Tiempo Para Tomar Decisiones Robustas de Infraestructura, con un Estudio de Caso en Mendoza, Argentina (Documento de trabajo BID, 1162).

Lempert R.J. (2019) Robust Decision Making (RDM). En: Marchau V., Walker W., Bloemen P., Popper S. (eds) Decision Making under Deep Uncertainty. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_2

Marulanda, M.C., Cardona, O.D., Barbat, A.H. (2009). Robustness of the holistic seismic risk evaluation in urban centers using the USRi, Journal of Natural Hazards, DOI 10.1007/s 11069-008-9301-z, Vol 49 (3) (Junio):501-516, Springer Science+ Business