

Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia – Fase 1

20MR1217

Informe de inicio

(Entregable 1)

Preparado para:



Octubre de 2020

Consultor

Colombia

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.
www.ingeniar-risk.com



Equipo de trabajo

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico

Omar Darío Cardona A.

Jefe de equipo

Jose Daniel Pabón C.

Modelador de cambio climático

Martha Liliana Carreño T.

Modelador de exposición y vulnerabilidad

Gabriel Andrés Bernal G.

Especialista en riesgo de desastres

Mabel Cristina Marulanda F.

Modelador de amenazas naturales

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

Julián Alfonso Tristancho

Especialista INGENIAR

Diana Marcela González

Especialista INGENIAR

Paula Marulanda

Especialista INGENIAR

César Augusto Velásquez

Especialista INGENIAR

Claudia Villegas

Especialista INGENIAR

Citación:

Cardona, O.D., Bernal, G., Pabón, J.D., M. A., Marulanda, M. C., Carreño, M. L., (2020). Entregable 1: Plan de trabajo y enfoque metodológico. Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia – Fase 1. Preparado para Expertise France. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	7
2	PLAN DE TRABAJO	8
2.1	AMENAZAS Y SECTORES POR EVALUAR	10
3	PLAN DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y APOYO TÉCNICO	12
3.1	SEGUIMIENTO, MONITOREO Y CONTROL DEL PROYECTO	13
3.2	APOYO TÉCNICO	15
4	ENFOQUE METODOLÓGICO.....	16
4.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	16
4.2	EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO.....	17
4.3	INCORPORACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO	21
4.4	MODELACIÓN DE AMENAZAS E INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO	23
4.5	EVALUACIÓN DE IMPACTO DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN EN EL RIESGO POR AMENAZAS CLIMÁTICAS	24
A. 1	MODELACIÓN DEL CLIMA INCORPORANDO CAMBIO CLIMÁTICO	30
A. 1.1	GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE SERIES CLIMÁTICAS	30
A. 1.2	GENERACIÓN DE SERIES ALEATORIAS	32
A. 1.3	INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA GENERACIÓN DE SERIES CLIMÁTICAS	34
A. 1.3.1	DISPERSIÓN DE LOS MODELOS GLOBALES DE CIRCULACIÓN	34
A. 1.3.2	SELECCIÓN DEL MODELO GLOBAL DE CIRCULACIÓN.....	35
A. 1.3.3	AJUSTE DE SERIES SIMULADAS A PREDICCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	39
A. 2	MODELACIÓN DEL RIESGO EN EDIFICACIONES E INFRAESTRUCTURA	40
A. 2.1	MODELO DE AMENAZA POR INUNDACIONES	40
A. 2.1.1	AMENAZA POR INUNDACIÓN A ESCALA NACIONAL.....	40
A. 2.1.2	MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA: CLARK MODIFICADO	41
A. 2.1.3	INUNDACIÓN ALUVIAL – MODELO 2D	44
A. 2.2	MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR HURACANES	44

A. 2.2.1	PERTURBACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE LOS CICLONES	45
A. 2.2.2	MODELACIÓN DE AMENAZA DE VIENTO.....	45
A. 2.3	CONFORMACIÓN DE UN PROXY DE EDIFICACIONES E INFRAESTRUCTURA	49
A. 2.3.1	INFORMACIÓN GENERAL DEL PAÍS	50
A. 2.3.2	BASE DE DATOS DE CONSTRUCCIONES.....	50
A. 2.3.3	BASE DE DATOS DE INFRAESTRUCTURA URBANA	51
A. 2.3.4	BASE DE DATOS DE INFRAESTRUCTURA NACIONAL	52
A. 2.4	VULNERABILIDAD FÍSICA DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS	52
A. 2.4.1	FUNCIONES DE VULNERABILIDAD	54
A. 2.4.2	FUNCIONES DE FRAGILIDAD.....	56
A. 2.4.3	RELACIÓN ENTRE FUNCIONES DE FRAGILIDAD Y DE VULNERABILIDAD	57
A. 2.5	CÁLCULO DEL RIESGO	57
A. 2.5.1	MÉTRICAS DEL RIESGO	59
A. 3	MODELACIÓN DEL RIESGO EN CULTIVOS Y COBERTURA VEGETAL	62
A. 3.1	MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR SEQUÍA	62
A. 3.1.1	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	62
5.1.1	INDICADORES	63
A. 3.2	MODELO DE EXPOSICIÓN DE CULTIVOS.....	66
A. 3.2.1	INFORMACIÓN DE ESTACIONALIDAD DE CULTIVOS	67
A. 3.2.2	RENDIMIENTOS Y AVALÚO DE CULTIVOS	67
A. 3.2.3	SUELO: CARACTERÍSTICAS AGRONÓMICAS	68
A. 3.3	VULNERABILIDAD DE CULTIVOS	71
A. 3.3.1	RENDIMIENTO COMO FUNCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA	71
A. 3.3.2	CLIMA.....	73
A. 3.3.3	CULTIVO.....	73
A. 3.3.4	SUELO.....	76
A. 3.3.5	MANEJO.....	77
A. 3.3.6	LA DINÁMICA DE LA RESPUESTA DE LOS CULTIVOS AL ESTRÉS HÍDRICO	77
A. 3.4	MODELACIÓN DE INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL	81
A. 3.4.1	VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO	82
A. 3.4.2	ÍNDICES DE SUSCEPTIBILIDAD DE INCENDIOS FORESTALES.....	87
A. 3.4.3	HUMEDAD DE COMBUSTIBLE FINO	92
A. 3.4.4	IGNICIÓN	93
A. 3.4.5	SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO A INCENDIOS FORESTALES	93
A. 3.4.6	COMBUSTIÓN Y PROPAGACIÓN.....	94
A. 3.4.7	EXTINCIÓN.....	106
A. 3.5	VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS QUE PRESTA LA VEGETACIÓN SUSCEPTIBLE A INCENDIOS FORESTALES	107
A. 3.6	PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE RIESGO.....	108
A. 3.6.1	CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS	110

A. 4 INCORPORACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN 112

1 INTRODUCCIÓN

La Gestión de Cambio Climático es una prioridad en Colombia, liderada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) a través de la Dirección de Cambio Climático y Gestión del Riesgo. Dentro del marco normativo que rige la Gestión de Cambio Climático, el Gobierno colombiano cuenta con el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), una Política Nacional de 2016, la Ley 1931 de 2018, la Ley 1844 de 2017 de Aprobación del Acuerdo de París y el Plan Nacional de Adaptación, entre otros, que buscan guiar las políticas e iniciativas del país. A corto plazo, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 define la agenda para articular esfuerzos intersectoriales. A mediano plazo, la Contribución Nacional NDC Enfoque 2030, en proceso de actualización, establece el compromiso del país en cuanto a reducir emisiones nacionales y adaptarse a las nuevas condiciones. A largo plazo, la Estrategia 2050 tiene como objetivo lograr una economía carbono-neutra y resiliente al clima. Los principios que rigen la política nacional incluyen la integralidad en los componentes de mitigación, adaptación y riesgo climático, articulando las metas para 2022, 2030 y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas. Complementando la Gestión de Cambio Climático, el Sistema Nacional para la Gestión de Riesgos de la Ley 1523 de 2012 creó instrumentos nacionales y territoriales para fortalecer la gestión del riesgo de desastres.

La Estrategia 2050 de Colombia está comprometida con fomentar el sector agropecuario, generar sistemas de ciudades sostenibles e integradas a sus regiones, contar con infraestructura y sistemas de movilidad eficientes, gestionar la biodiversidad y el recurso hídrico de forma integral, teniendo en general una menor incidencia o severidad de los impactos por cambio climático. En resumen, la Estrategia busca gestionar los riesgos por cambio climático al que los territorios y los sectores están expuestos. Ahora bien, el primer paso es conocer el riesgo, para cuantificar los potenciales impactos del cambio climático específicos por sector y particulares según las características del territorio.

En este documento se presenta el plan de trabajo a ser desarrollado por el consultor, así como el enfoque metodológico a ser empleado en conseguir los objetivos del proyecto. Este documento constituye el Entregable 1 según los términos de referencia establecidos.

2 PLAN DE TRABAJO

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

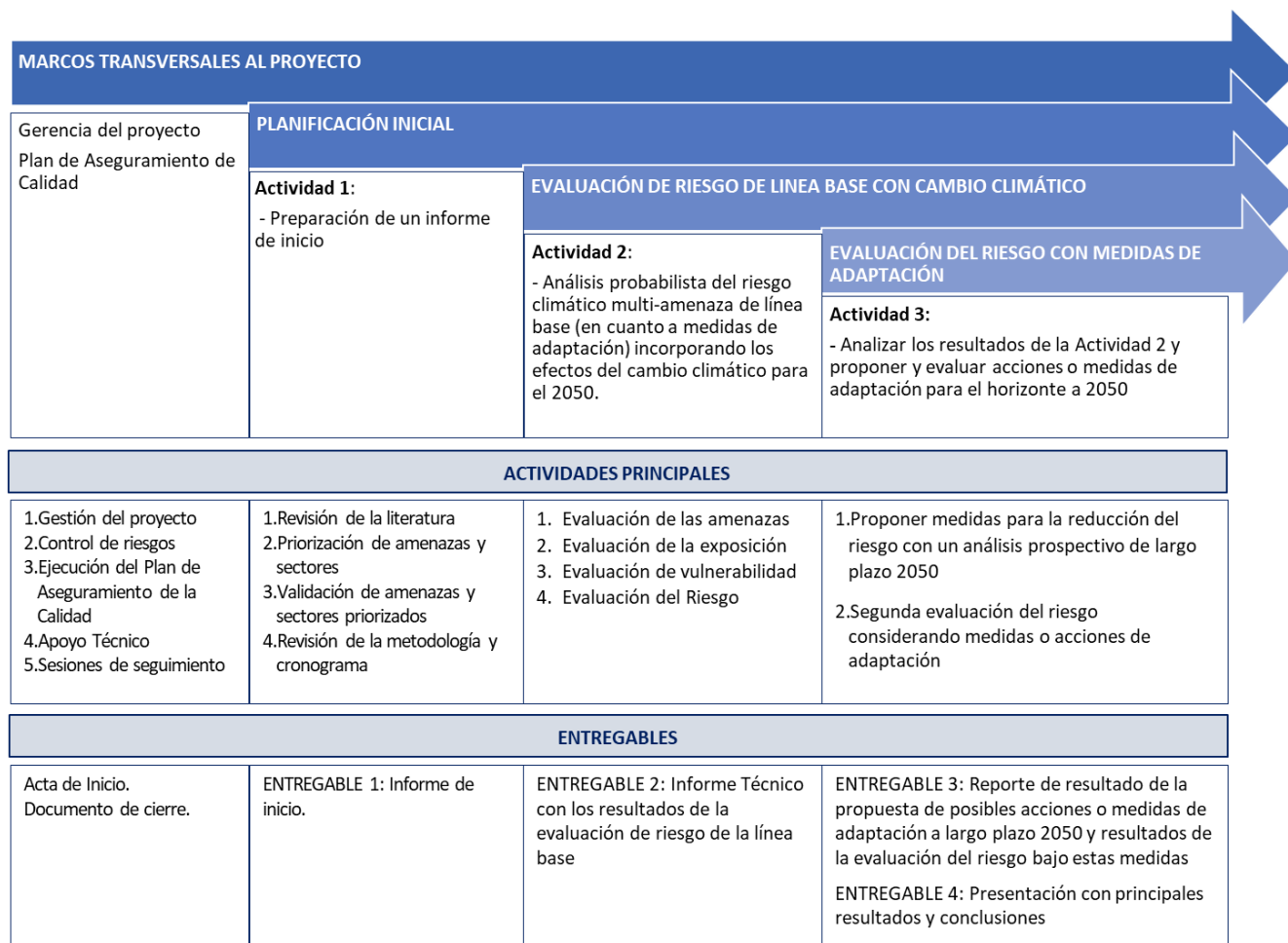


Figura 1. Desglose de actividades del proyecto (Elaboración propia)

El proyecto se divide en cinco fases: Inicio, Planificación, Ejecución, Monitoreo y Control, y Cierre.

	Inicio	<i>Acta de constitución del proyecto.</i>
	Planificación	<i>Actividad 1</i>
	Ejecución	<i>Actividad 2</i> <i>Actividad 3</i>
	Monitoreo y control	<i>Actividades transversales al proyecto</i>
	Cierre	<i>Acta de finalización del proyecto.</i>

Figura 2. Asignación de actividades por fases del proyecto (Elaboración propia)

Para el proyecto se considera que las tareas de Monitoreo y Control son la Gerencia de Proyectos y el Plan de Aseguramiento de Calidad que son transversales a todas las fases y se ejecutan a lo largo de la duración del proyecto. El primer componente por ejecutar es la planificación inicial, en la que se hace una revisión de la literatura, se definen las amenazas y sectores priorizados para la evaluación del riesgo, junto con los actores interesados (MADS, IDEAM, UNGRD). Luego se completa el segundo componente de evaluación del riesgo de línea base, incorporando los potenciales efectos del cambio climático en la evaluación del riesgo para las amenazas y sectores priorizados. El tercer componente del proyecto consiste en evaluar el efecto de implementar medidas de adaptación, definidas por todos los actores interesados en el proyecto, para reducir el riesgo por las amenazas seleccionados en los sectores priorizados. A partir de la estructura general del proyecto se establece el momento de inicio y fin de cada una de las fases del proyecto y se determina el cronograma, desagregando por actividades, y se definen los entregables de cada tarea. La duración total del proyecto será de 6 meses. La siguiente imagen presenta las principales actividades, los principales productos e hitos, organizados por componentes y entregables para cada una de las 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

Actividad	Detalle	M1				M2				M3				M4				M5				M6			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Actividad1: Preparación de un informe de inicio	1.1 Revisión de la literatura																								
	1.2 Priorización de amenazas y sectores																								
	1.3 Validación de amenazas y sectores priorizados																								
	1.4 Revisión de la metodología y cronograma																								
	1.5 Redacción del informe de inicio																								
	ENTREGABLE 1: Informe de inicio		★																						
ACTIVIDAD 2: Análisis probabilista del riesgo climático multi-amenaza de línea base (en cuanto a medidas de adaptación) incorporando los efectos del cambio climático para el 2050	2.1 Evaluación de las amenazas																								
	2.2 Evaluación de la exposición																								
	2.3 Evaluación de vulnerabilidad																								
	2.4 Evaluación del Riesgo																								
	ENTREGABLE 2: Informe Técnico con los resultados de la evaluación de riesgo de la línea base																								
ACTIVIDAD 3: Analizar los resultados de la Actividad 2 y proponer y evaluar acciones o medidas de adaptación para el horizonte a 2050	3.1 Proponer medidas para la reducción del riesgo con un análisis prospectivo de largo plazo 2050																								
	3.2 Segunda evaluación del riesgo considerando medidas o acciones de adaptación.																								
	ENTREGABLE 3: Reporte de resultado de la propuesta de posibles acciones o medidas de adaptación a largo plazo 2050 y resultados de la evaluación del riesgo bajo estas medidas																								★
	ENTREGABLE 4: Presentación con principales resultados y conclusiones																								★

Figura 3. Cronograma de actividades del proyecto. Celdas en amarillo indican fecha de entrega de productos.

2.1 Amenazas y sectores por evaluar

Según lo acordado en la reunión de inicio de proyecto con Expertise France y BID, la Tabla 1 resume las amenazas y sectores a ser evaluados dentro del alcance del proyecto. Esta definición responde a un balance entre los diferentes sectores relevantes, las amenazas asociadas al clima y el plazo de ejecución del proyecto.

Tabla 1. Amenazas y sectores por evaluar

Amenaza	Sector
Sequía	Agrícola
Inundación	Construcciones: Residencial, Comercial, Gobierno, Salud, Educación Infraestructura ¹ : Vial, Energía, Telecomunicaciones, Agua y saneamiento
Ciclones tropicales	Construcciones: Residencial, Comercial, Gobierno, Salud, Educación Infraestructura: Vial, Energía, Telecomunicaciones, Agua y saneamiento
Incendios de cobertura vegetal	Agrícola Servicios ecosistémicos
Deslizamientos	Infraestructura vial

	 Construcciones	 Infraestructura	 Agrícola	 Servicios ecosistémicos
 Inundaciones	✓	✓		
 Sequías			✓	
 Incendios de cobertura vegetal				✓
 Huracanes	✓	✓		

Figura 4. Esquema de amenazas y sectores a calcular

¹ Se desarrollará un modelo de inundación en infraestructura debido su la relevancia dentro de los objetivos del proyecto. No obstante, se resalta la relativa baja precisión de los resultados esperados debido a la naturaleza y escalas propias del fenómeno y los elementos expuestos. No se considerará la falla o ruptura de infraestructura de defensa y protección ante inundaciones, dado que esta situación define un condicionante para la amenaza que excede el alcance de este estudio.

3 PLAN DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y APOYO TÉCNICO

Entendemos que la calidad es un factor crítico para el éxito del proyecto y garantiza el alcance de los objetivos planteados en el mismo. La Gestión de la Calidad del proyecto abarca todas las actividades requeridas para la obtención de resultados, cumpliendo todos los objetivos y logrando la transferencia del conocimiento que contribuirá la Fase 2 del *Estudio de Riesgo por efectos del cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia*.

Los estándares de calidad que dirigen el trabajo de INGENIAR son:

- Los miembros del equipo de dirección y líderes de los equipos de trabajo, en cabeza del Gerente de proyecto, son responsables por la calidad del servicio prestado.
- Conocimiento: El equipo de trabajo está conformado por profesionales con amplia experiencia en gestión de proyectos, modelación, evaluación y gestión del riesgo climático, desarrollo de sistemas de información, tecnologías de información, transferencia del conocimiento, capacitación y gestión de grupos de interés.
- Revisión de papeles de trabajo: todos los papeles de trabajo son revisados por el Gerente del proyecto.
- Reuniones internas de seguimiento periódicas: nuestro equipo de trabajo sostiene reuniones de discusión para revisar los servicios prestados, identificar áreas de mejoramiento y acordar prioridades para atender y realizar seguimiento.
- Control de calidad: nuestros programas de control de calidad nos permiten verificar el cumplimiento de los estándares de calidad de la Firma en cada uno de sus trabajos.
- Entrenamiento a nuestros profesionales: todos nuestros profesionales son entrenados en las políticas y los estándares aquí mencionados, y también de los expuestos en los términos de referencia.

Para asegurar que el proyecto se complete y se alcancen los objetivos con altos niveles de calidad y cumpliendo las expectativas de los interesados, INGENIAR adopta el Plan de Aseguramiento de Calidad aquí presentado. Este plan será usado como guía de administración del proyecto, y contiene las herramientas a utilizar con el fin de proveer a los equipos de trabajo la guía necesaria para ejecutar el proyecto. El Plan de Aseguramiento de la calidad considera la fase de Planificación, Ejecución y Control, como se muestra en el siguiente esquema.

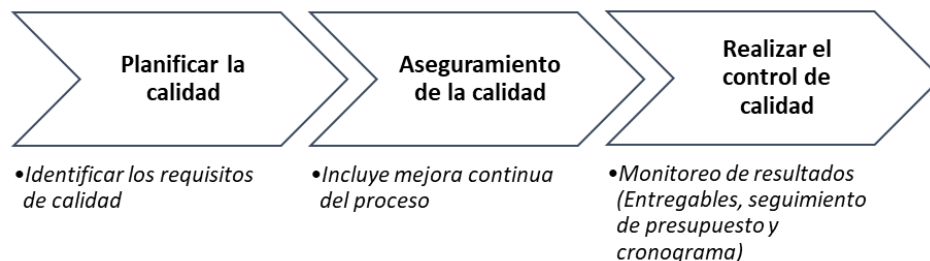


Figura 5. Fases del Plan de Aseguramiento de la Calidad (Elaboración propia)

- Planificar la calidad considera la identificación de los requisitos y normas que debe cumplir el proyecto y sus productos y las herramientas que se utilizarán para demostrar este cumplimiento. Esta planificación se hará de forma paralela a la planificación general del proyecto.

- Realizar el aseguramiento de la calidad considera la supervisión de los entregables para validar el cumplimiento de los requisitos de calidad. Esto está a cargo del líder del proyecto.
- El control de calidad considera el seguimiento y monitoreo de la ejecución de las actividades de calidad, para evaluar el desempeño del equipo y recomendar cambios si son necesarios. Se hará el registro y manejo de salidas no conformes, tratamiento en reuniones de seguimiento y la definición de planes de acción correctivos, todo dentro de un proceso iterativo de mejora continua.

3.1 Seguimiento, monitoreo y control del proyecto

Para este proyecto se definieron los objetivos de las fases y sus actividades principales como se muestra en los esquemas a continuación.

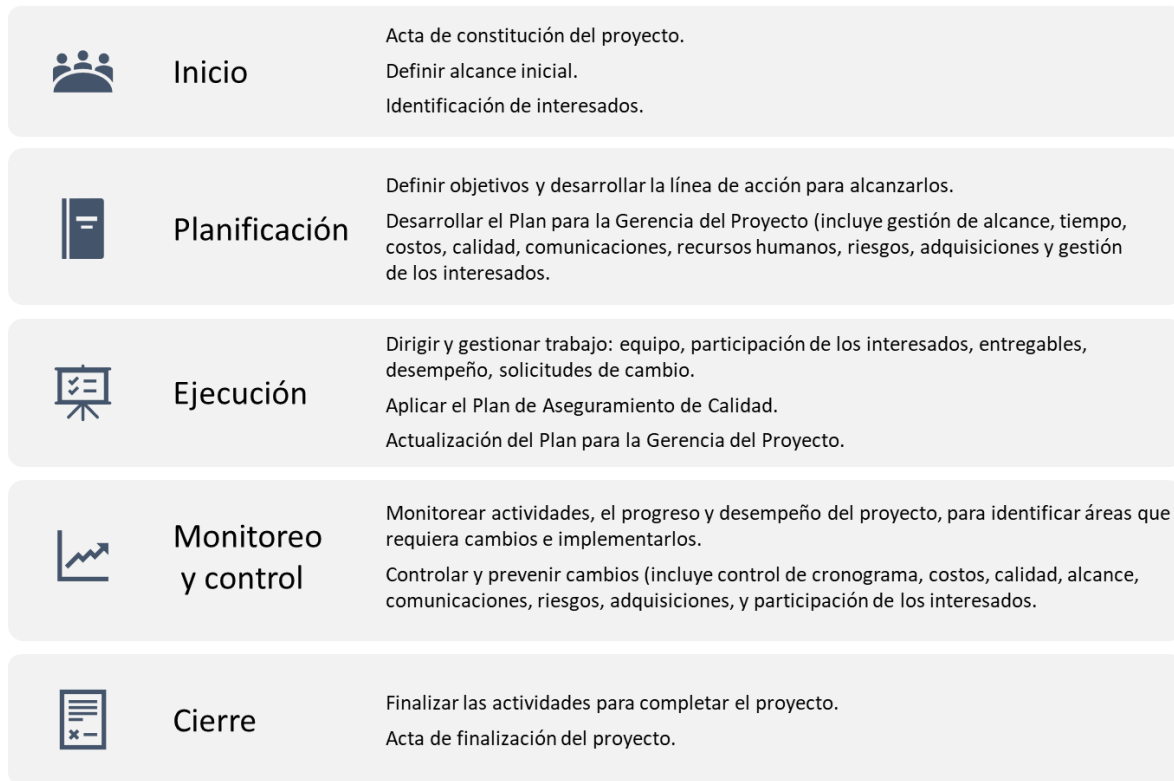


Figura 6. Principales actividades de Gerencia del Proyecto por fases

Con el objetivo de asegurar el cumplimiento de los objetivos y alcance del proyecto, incluyendo cumplimiento al cronograma y presupuesto en todas sus fases, se hará un monitoreo interno de las actividades y gestión de imprevistos. Para esto se implementarán las siguientes herramientas de manejo del proyecto:

Gestión de Cambios

El control de cambios del proyecto se deriva de la supervisión, monitoreo y control de las actividades y entregables. Se hará efectivo en las sesiones de seguimiento conforme a las solicitudes de cambio que las partes generen. Los cambios se documentarán en actas de reunión respaldadas con los correos

electrónicos que se intercambien en el marco de cada cambio, y una vez realizados, quedarán registrados en el formato de cambios del proyecto.

Gestión de riesgos del proyecto

Desde la fase de inicio, se identifican los riesgos que puedan afectar el proyecto para reducir la materialización de eventos de fuga de valor. El equipo de dirección, bajo el liderazgo del Gerente del Proyecto, revisará los riesgos proyectados al inicio del proyecto y los actualizará conforme el proyecto evolucione.

Gestión de conocimiento

En el marco de este proyecto, la gestión del conocimiento tendrá por objetivo recoger aprendizajes de la experiencia y sistematizarlas para que sean base del mejoramiento en fases posteriores (FASE 2). Se espera tener oportunidades de conversaciones para encontrar aprendizajes en las sesiones de socialización y de las reuniones de seguimiento.

Plan de Gestión de la Integración

La gestión de la integración de actores se dará en todas las fases del proyecto:

- En la fase de inicio y planificación: mediante la definición concertada de amenazas y sectores a evaluar, como ocurrió en la reunión de inicio ya realizada con Experise France y BID.
- En la ejecución: desarrollo de las actividades en cumplimiento de los establecido en el cronograma y presupuesto, ajustando lo necesario como resultado de las revisiones y evolución del proyecto.
- En el monitoreo y control: dar cumplimiento al plan de aseguramiento de calidad y al esquema de seguimiento, monitoreo y control que se establezca. Mantener un registro de cambios.
- En el cierre: asegurar la terminación de todas las actividades previa aprobación de los productos entregados y el proceso para llegar a esta instancia debidamente documentado.

Documentación del proyecto

- Estructura de documentos: se presentarán versiones preliminares de los entregables para validación con el equipo del EXPERTISE FR, como líder del Comité de Seguimiento, promoviendo ajustes en fases tempranas y evitando reprocesos en instancias finales de cada actividad.
- Almacenamiento: Se dispondrá de un sitio virtual para el almacenamiento de la documentación y se entregarán los productos conforme a los requerimientos de los términos de referencia.

Plan de Gestión de las Comunicaciones

El esquema de comunicaciones e interlocución será administrado por el Gerente del Proyecto y su cumplimiento es responsabilidad de todas las partes involucradas, Las herramientas de comunicación e interlocución que se utilizaran durante la ejecución del proyecto incluyen:

<i>Documento</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Frecuencia</i>
<i>Acta</i>	Informar a los interesados sobre temas tratados, conclusiones y compromisos resultado de las reuniones.	Un Acta por cada reunión
<i>Solicitud de Información</i>	Solicitar información según las necesidades	Según necesidad
<i>Citación a Reunión</i>	Según necesidad	Según necesidad
<i>Envío de productos</i>	Entregar los informes resultado de cada actividad del cronograma	Según cronograma

3.2 Apoyo técnico

El Apoyo Técnico en el marco de este proyecto considera que los expertos técnicos que cuentan con mayor experiencia están disponibles para apoyar y asegurar la calidad del trabajo hecho por el personal de apoyo. Para asegurar que el proyecto se beneficia de la experiencia de profesionales interdisciplinarios, se mantendrá un contacto regular con los expertos en cada campo para monitorear el progreso de las actividades, resolver inquietudes y evaluar el desempeño del proyecto. Además, se dará apoyo técnico tanto a los profesionales externos a INGENIAR como a su equipo interno.

Apoyo técnico al personal externo a la firma consultora

INGENIAR, como valor agregado de sus proyectos, imparte capacitaciones a interesados en el manejo de los programas (sesiones hands-on), la metodología de evaluación de la amenaza y el riesgo y la interpretación de resultados de la evaluación del riesgo con enfoque probabilista, logrando la transferencia del conocimiento a las instituciones públicas para fortalecer los procesos de toma de decisiones. Con esto se fortalecen las instituciones y sus funcionarios, además de asegurar el correcto uso y la apropiación de las herramientas de modelación de la amenaza y la evaluación de riesgo.

Apoyo técnico al personal interno de la firma consultora

INGENIAR cuenta con personal capacitado para completar las actividades del proyecto. Sin embargo, de ser necesario en procesos internos, el equipo puede asignar profesionales (mentores) para apoyar el desarrollo de habilidades y conocimientos específicos de personas con menos experiencia, para mejorar su crecimiento profesional y personal.

4 ENFOQUE METODOLÓGICO

La gestión del riesgo comprende todo el conjunto de acciones que pueden ser ejecutadas con el fin de reducir el impacto negativo de los desastres. El primer paso para una correcta gestión del riesgo es identificarlo y cuantificarlo. Se propone el uso de una metodología de evaluación de riesgo con enfoque probabilista, que permite realizar pronósticos sobre los niveles futuros de pérdida, considerando la amenaza propia de la región de estudio y la incertidumbre en su estimación, así como la vulnerabilidad inherente de los elementos expuestos y su incertidumbre.

4.1 Revisión bibliográfica

Las expresiones extremas de los procesos atmosféricos y del clima, conocidas como fenómenos meteorológicos y climáticos extremos (Zscheischle et al., 2020), y los eventos asociados (hidrometeorológicos (crecientes súbitas, inundaciones súbitas), meteo-marinos, de remoción en masa, incendios forestales; inundaciones de larga duración, sequías) son los causantes más recurrentes de los desastres que se registran en los países (Hoeppe, 2016; Pielke, 2018). Estos último se analizan en el marco de la teoría del riesgo de desastre (Cardona, 2011) que en síntesis considera que el riesgo se construye en la conjugación entre la amenaza (interacción del fenómeno con una exposición) y la vulnerabilidad; sobre la base de marco conceptual, se plantea acciones de gestión del riesgo de desastre que tiene como objetivo final disminuir/reducir el riesgo (el potencial impacto negativo).

El cambio climático que está avanzando y que se hará más marcado en la medida como transcurra el siglo XXI (IPCC, 2013), modificará los patrones de distribución espacial, frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos mencionados (IPCC, 2012) y con ello modificará la amenaza asociada a estos, con lo que incidirá en el riesgo de desastre en diferentes dimensiones del territorio, particularmente en los sectores socioeconómicos (IPCC, 2014). Siendo una vía más a través de la cual el cambio climático impactará los territorios, urge incentivar la producción de conocimiento sobre el particular y la generación de información especializada para soportar las políticas y la planificación de largo plazo orientadas a la adaptación. Por ello, se han desarrollado diversas aproximaciones para relacionar la gestión del riesgo de desastre con la adaptación al cambio climático (Islam et al., 2019).

En Colombia, los fenómenos extremos relacionados con el tiempo y el clima generan la mayor proporción de pérdidas (CEPAL-BID, 2012; Cardona et al., 2004). Un ejemplo de ello son dos fases extremas de la variabilidad climática opuestas: la anomalía climática asociada al fenómeno de El Niño ocurrido en 1991-1992 que generó pérdidas estimadas en cerca de 3000 millones de dólares americanos (CAF, 1998); la anomalía climática de 2010-2011 asociada al evento La Niña trajo pérdidas estimadas en cerca de 7000 millones de dólares americanos de la época (CEPAL-BID, 2012). Los fenómenos hidroclimáticos extremos (sequía e inundación de larga duración) son recurrentes y han venido impactos que en ocasiones han afectado sensiblemente el PIB nacional, destruido la infraestructura (los períodos anormalmente lluviosos) y reducido la producción y generando una cadena de consecuencias sociales (Pabón-Caicedo Montealegre-Bocanegra, 2017). Las inundaciones de larga duración son causantes del 40% de los desastres según análisis de los reportes de desastres del período 1970-2000 efectuado por Cardona et al (2004); aunque la sequía produce grandes pérdidas debido a su impacto en el sector agropecuario, energético y de la salud, generalmente no aparece en los reportes de desastres. De otra parte, además de los extremos hidroclimáticos señalados, otros fenómenos hidrometeorológicos (lluvias intensas, vendavales,

granizadas, heladas, crecientes súbitas) y asociados (deslizamientos, incendios forestales) son la causa de casi el 40% de los desastres que en la menor escala ocurren en el país (ver Cardona et al., 2004). El cambio climático modificará de alguna manera los patrones de comportamiento de los fenómenos hidrometeorológicos e hidroclimáticos lo que impone un reto a la gestión del riesgo de desastre en el futuro. Es necesario anticiparse a los escenarios más probables de este comportamiento en el futuro con miras a que la gestión de riesgo desastre considere este cambio y participe en los esfuerzos del país en la vía de la adaptación al cambio climático

En el país ha habido avances en el conocimiento de los fenómenos hidrometeorológicos e hidroclimáticos extremos y en la evaluación de las amenazas y los riesgos de desastre generados por estos (Bernal et al., 2017; UNGRD-INGENIAR, 2018) en el clima presente (al menos de los cinco últimos decenios). Se han realizado algunos análisis locales sobre la tendencia de largo plazo que señalan el efecto del cambio climático en los extremos de precipitación y de temperatura (IDEAM et al., 2012; Pabón, 2012, 2013; IDEAM-Universidad Nacional de Colombia, 2018) y se han elaborado mapas de amenaza (de los extremos que afectan el sector agropecuario, por ejemplo) con lo que se ha contribuido a la gestión del riesgo de desastre por una buena parte de los fenómenos extremos mencionados. No obstante, poco se ha hecho en cuanto a analizar cómo se comportarán tales fenómenos en el clima de mediados o de finales del siglo XXI, información esencial para poder identificar las vías para la adaptación al cambio climático en la dimensión del territorio relacionada con el riesgo de desastre.

En la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (TCNCC) en Colombia (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, 2017) se realizó un análisis de los desastres de índole hidrometeorológico e hidroclimático, pero no se avanzó más allá de la descripción para cada departamento de la serie no homogénea de reportes de desastres a partir del repositorio de reportes Desinventar.org. Hasta la actualidad, los escenarios de cambio climático en el país solo han elaborado para los promedios de temperatura del aire y precipitación (IDEAM, 2015); para los extremos del tiempo atmosférico y del clima no se han realizado escenarios.

Se requiere contar con información de cómo sería el patrón más probable de comportamiento en el futuro, a fin de evaluar el riesgo futuro y compararlo con el actual, con el propósito de identificar el cambio (delta) en el riesgo que se generaría y que debe ser tratado para contribuir a la adaptación al cambio climático de los territorios del país.

4.2 Evaluación probabilista del riesgo

La Figura 7 muestra el marco conceptual propuesto para el desarrollo del *Estudio de Riesgo por efectos del cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia – Fase 1*. Para la evaluación del riesgo de amenazas climáticas hace una distinción entre sus componentes principales: amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo.

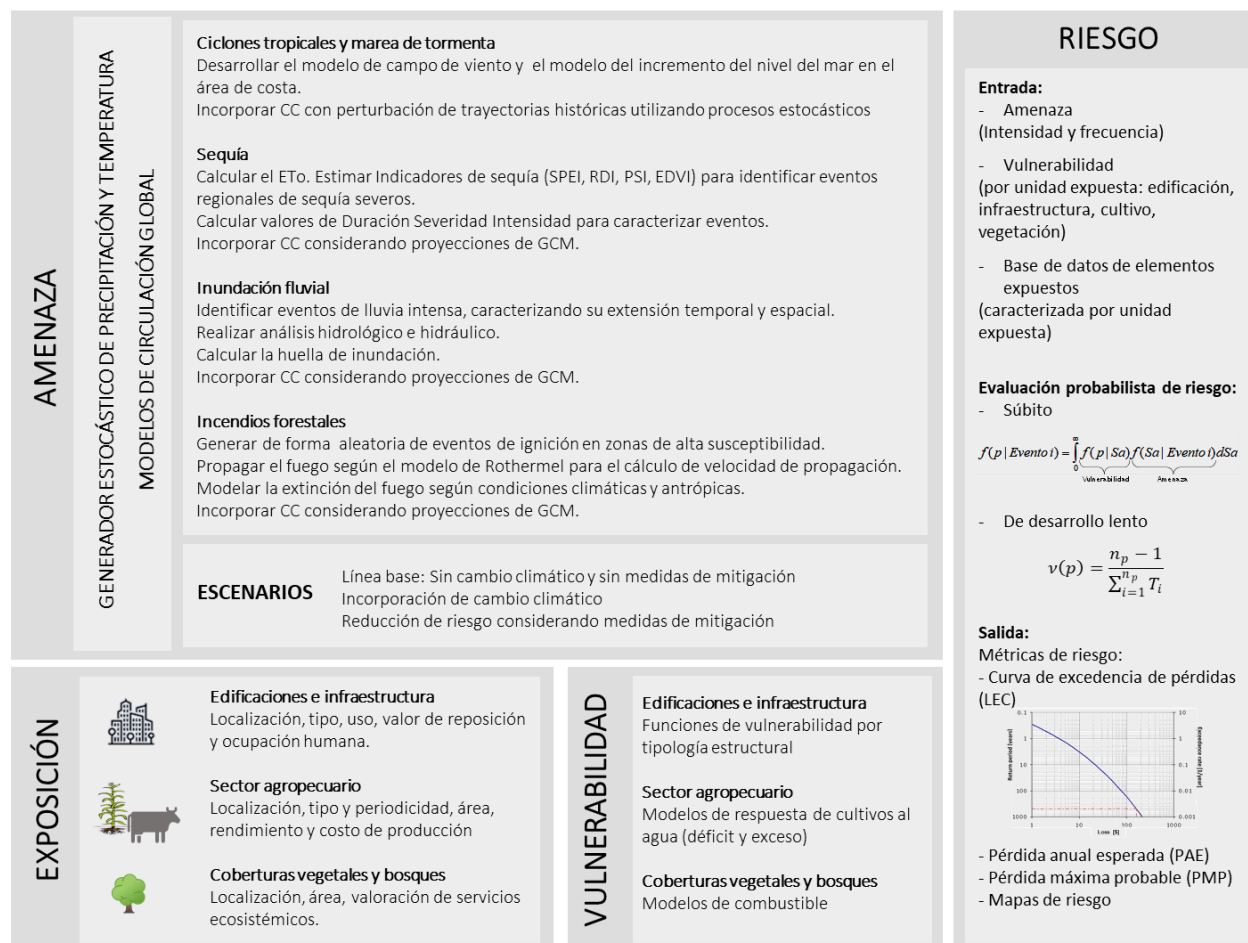


Figura 7. Marco conceptual de la evaluación probabilista del riesgo utilizada por INGENIAR (Elaboración propia)

En primer lugar, se modela la *amenaza* a partir de los registros históricos de precipitación y temperatura, 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. La incorporación de los potenciales impactos del cambio climático se hace al perturbar las series estocásticas para incluir los cambios en temperatura y precipitación, para luego recalcular los indicadores de cada amenaza. Para el caso de ciclones tropicales, la amenaza se evalúa a partir de trayectorias de ciclones registrados en la historia y la incorporación del cambio climático se hace al generar nuevas trayectorias, perturbando con metodologías de *random walk* las trayectorias históricas, y la frecuencia de ocurrencia de los eventos. Con el enfoque de la evaluación prospectiva del riesgo por fenómenos meteorológicos, el componente de amenaza se define como un conjunto de cientos de eventos estocásticos que son colectivamente exhaustivos y mutuamente excluyentes. Entonces, los eventos de amenaza en su conjunto cubren toda el área de estudio, razón por la cual se pueden derivar los mapas de amenaza integrada con un enfoque de evaluación probabilista y con esto obtener medidas de intensidad de la amenaza para diferentes periodos de retorno en toda el área estudiada.

Posteriormente, se crea una base de datos de *elementos expuestos*, tanto de activos físicos como cultivos o cobertura vegetal que son vulnerables a las amenazas climáticas. La base de datos de *activos físicos* debe caracterizar los elementos de infraestructura o edificaciones que debe incluir mínimo su localización, tipo, uso, ocupación humana y valor de reposición. Por ejemplo, INGENIAR realizó la evaluación de riesgo para la amenaza sísmica, inundaciones, tsunamis y ciclones tropicales con la base de exposición construida para el GAR15 ((UNDRR), 2015) complementándolo con información local. Esta base de datos considera los edificios públicos y privados en áreas urbanas y rurales y no considera elementos de infraestructura. El mapa de valoración de estos elementos, agrupados por departamento, se muestra en la Figura 8.

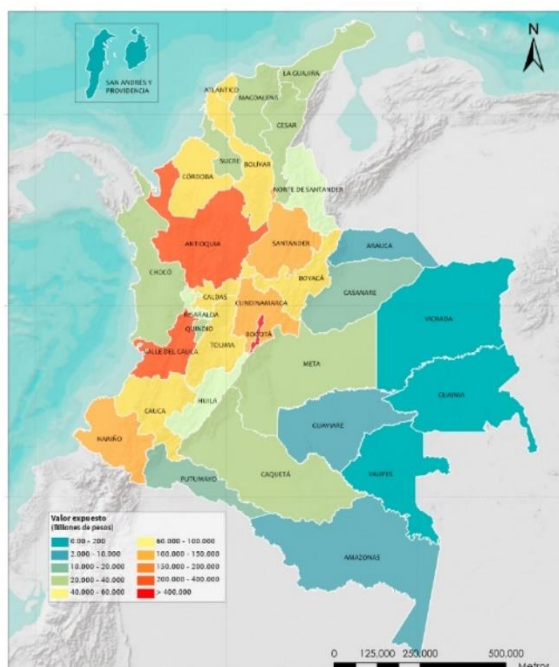
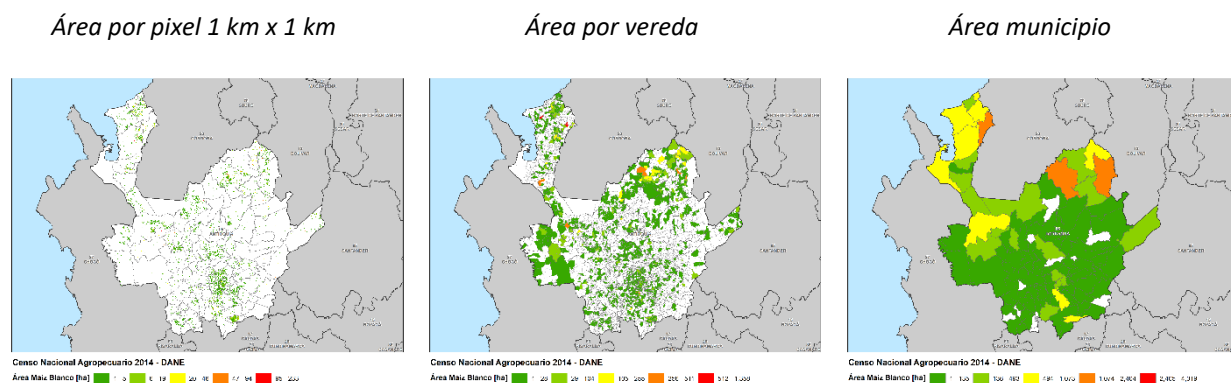


Figura 8. Valor expuesto de la base de datos de elementos expuestos por departamentos (Elaboración propia para la UNGRD (2018))

La base de datos de elementos expuestos para el *sector agropecuario* debe contener información sobre ubicación, características de los cultivos (área, tipo y estacionalidad) o actividades pecuarias (características de pastizales y manadas bovinas y ovinas), área, productividad y costo de producción de cada unidad de tierra cultivada. Esta base de datos se puede trabajar en múltiples resoluciones y agregar a múltiples divisiones político-administrativas, como se muestra en el Figura 9. La base de datos de *coberturas vegetales*, de uso particular en la evaluación de riesgo por incendios forestales, debe incluir la localización, área, tipo de vegetación y evaluación económica de los servicios ecosistémicos (Costanza et al., 2014; Groot et al., 2012).



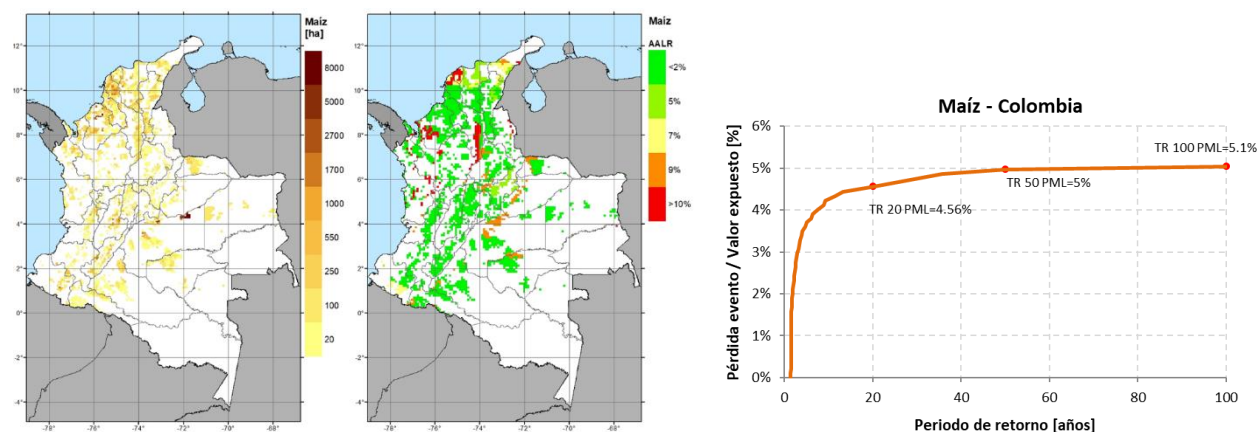


Figura 10. Mapas de ubicación y densidad de área sembrada de maíz (izquierda) y de pérdida anual esperada relativa (centro) de riesgo por sequía. A la derecha se muestra la curva de PML (Elaboración propia).

Para este estudio se considera el análisis comparativo de tres escenarios:

1. Evaluación del riesgo para el clima actual
2. Evaluación del riesgo considerando los potenciales impactos del cambio climático
3. Evaluación del riesgo considerando la implementación de medidas de adaptación al cambio climático

4.3 Incorporación del impacto del cambio climático en la evaluación del riesgo

Dentro del marco de la actualización del estudio de factibilidad del seguro agrícola catastrófico para FINAGRO, el equipo de INGENIAR analizó los escenarios de cambio climático definidos por el IDEAM (Ruíz Murcia et al., 2015) para Colombia y por lo menos 41 modelos de circulación global definidos en el informe AR5 del IPCC, que consideran los cuatro escenarios de forcings antropogénicos (RCP o Representative Concentration Pathways). Según nuestro análisis el modelo de circulación global HadGEM2-AO (Hadley Centre Global Environment Model version 2) resultó ser el más adecuado para las condiciones de Colombia, ya que minimiza las diferencias entre los registros históricos y las predicciones en el periodo 1981-2010 en la mayor extensión del territorio. Este modelo considera los componentes de troposfera, superficie terrestre e hidrología, aerosoles, océano y hielo marino. HadGEM2-AO fue desarrollado por el *Met Office Hadley Centre* (MOHC) del Reino Unido. Dentro de la colección de modelos de circulación global del AR5 (IPCC), el modelo HadGEM2-AO corrida 1 (Run 1) incluye 4 escenarios de emisión, RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5.

En Figura 11 se muestran las proyecciones de cambio en precipitación y temperatura media en una ubicación arbitraria en el departamento de Tolima, después de un proceso de downscaling estadístico. Esta gráfica incluye las proyecciones de la combinación de 41 modelos de circulación global, evaluados para cuatro RCP definidos en el AR5 del IPCC en gris, el modelo seleccionado y sus 4 escenarios de RCP en anaranjado y la proyección del IDEAM para Tolima en verde. Debido a que existen múltiples predicciones, el rango de resultados es muy amplio. Para el ejemplo, la variación en temperatura para el periodo más lejano (2070-2099) varía entre 0°C y 6°C. En el caso de la precipitación, la variación en este mismo periodo

esta entre -35% y +22%. Esta situación hace que no sea fácil la selección de un modelo para determinar el cambio esperado en el clima en esta ubicación.

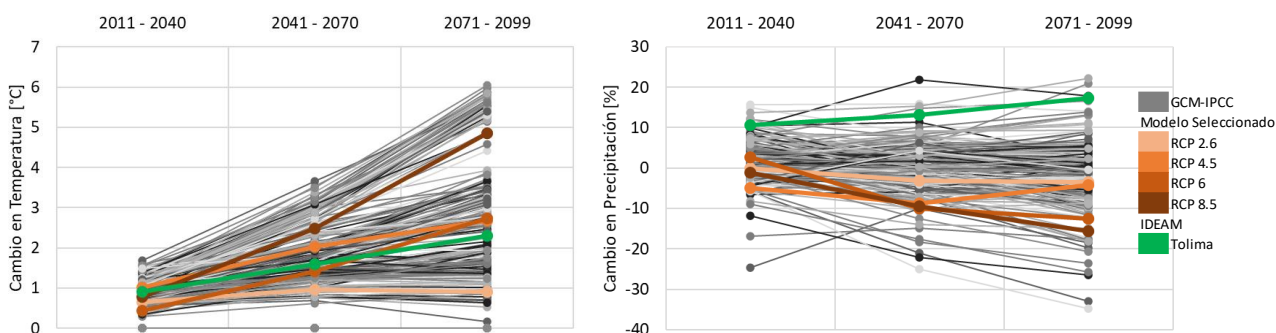


Figura 11. Distribución de proyecciones de cambio de temperatura (izquierda) y precipitación (derecha) según múltiples modelos de circulación global para estación en Tolima (Elaboración propia)

Este análisis permite concluir que los modelos de circulación global tienen una alta dispersión, lo que indica que las proyecciones para un mismo punto tienen un amplio rango de valores esperados. No hay un único modelo que se ajuste de forma precisa a los registros históricos para un punto o un área de análisis. Entonces, se recomienda evaluar el efecto que tienen los diferentes escenarios, RCP, de cada modelo de circulación global, lo que permite tener un rango de posibles condiciones que puedan ocurrir en el futuro considerando la incertidumbre que existe en el efecto de las medidas de mitigación que se consideran actualmente. Los mapas de la Figura 12 y Figura 13 permiten ver cómo el modelo de circulación global distribuye las proyecciones del clima en Colombia. Estos mapas se generaron para los escenarios de RCP incluidos en el modelo HadGEM2-AO (RCP 2.6, 4.5, 6, 8.5, en columnas) y para tres décadas de proyección (2040s, 2070s, 2099, en filas).

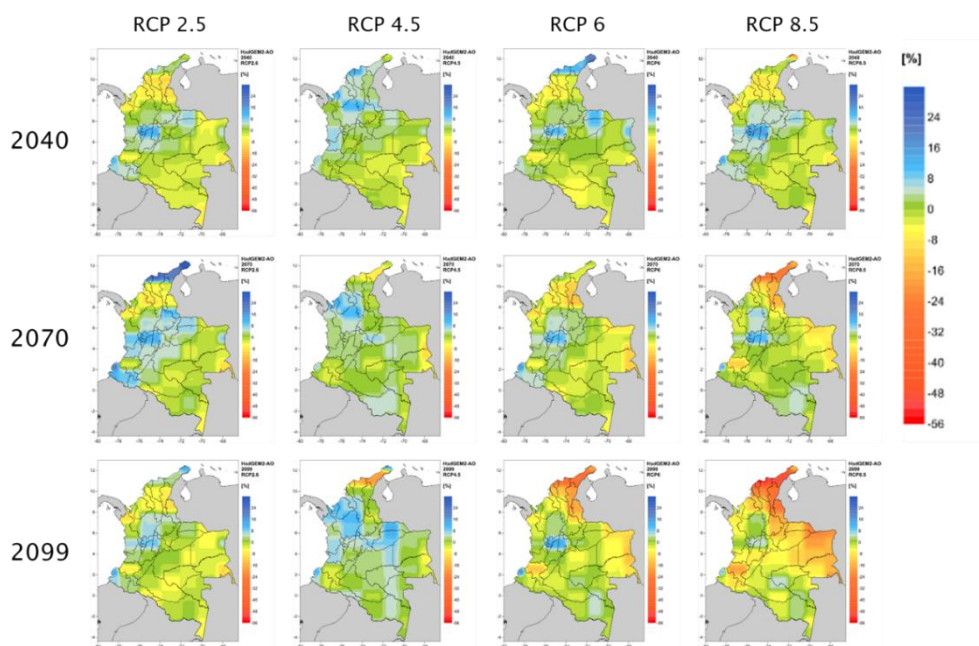


Figura 12. Mapas de cambio porcentual en la precipitación diaria según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global HadGEM2-AO, Colombia (Elaboración propia).

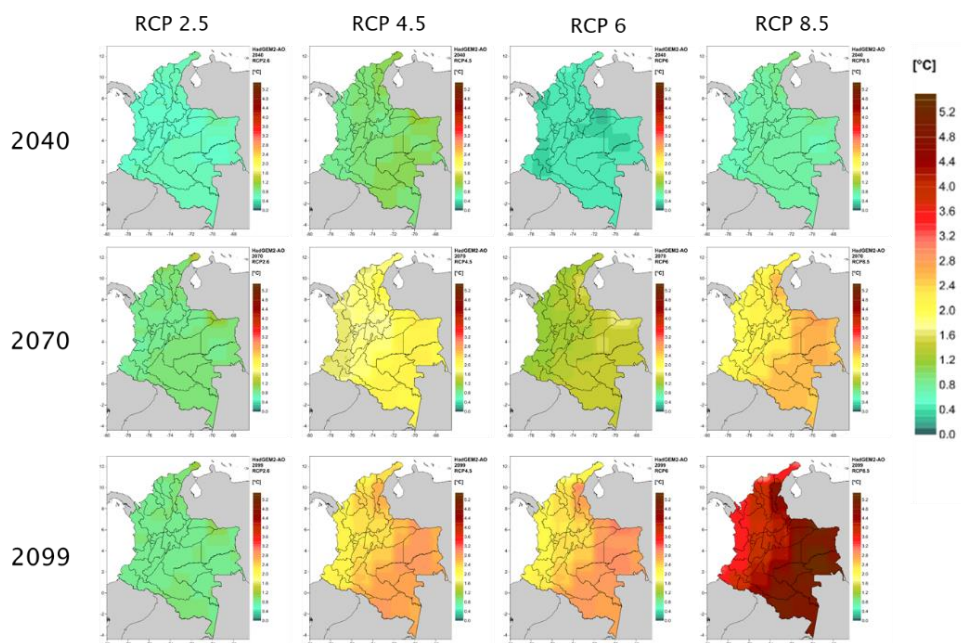


Figura 13. Mapas de cambio absoluto en la temperatura según variaciones de cada RCP del modelo de circulación global HadGEM2-AO, Colombia (Elaboración propia).

4.4 Modelación de amenazas e incorporación del cambio climático

En la metodología de evaluación de riesgo con enfoque probabilista, las curvas de amenaza representan la variación de la tasa de excedencia de la intensidad del fenómeno en un punto del territorio. La Figura 14 muestra el ejemplo de la curva de amenaza para sequía, donde la intensidad la determina un indicador de sequía meteorológica (en este caso, el Reconnaissance Drought Index – RDI - expresado en valores absolutos). Se presentan las curvas de tasas de excedencia estimadas para la información histórica (curva empírica) y las calculadas a partir de las sequías identificadas en las series climáticas simuladas (base y para los cuatro RCP analizados). Dado que la estimación histórica tiene incertidumbre, se presenta la correspondiente banda de incertidumbre (+/- una desviación estándar). En este ejemplo, el efecto del cambio climático implica “correr” las curvas hacia arriba y hacia la derecha. Por ejemplo, para un mismo RDI, bajo escenarios de cambio climático se espera una mayor tasa de excedencia, que es lo mismo que un menor periodo de retorno. Es decir, se alcanzan cierto valor de RDI con mayor frecuencia. Igualmente, para una misma tasa de excedencia, se espera un valor más alto de RDI, que implica mayor severidad de la amenaza. Esto se puede analizar para puntos con coordenadas específicas, como por ejemplo las capitales de los departamentos, para otras amenazas.

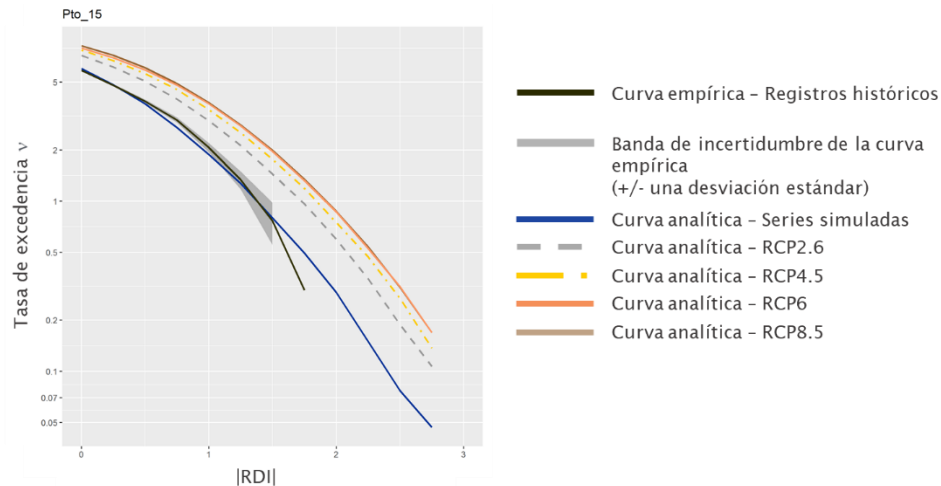
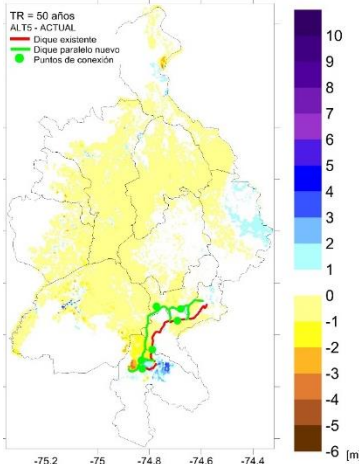


Figura 14. Curvas de amenaza incluyendo cambio climático para el caso de sequía (Elaboración propia)

4.5 Evaluación de impacto de medidas de adaptación en el riesgo por amenazas climáticas

INGENIAR cuenta con experiencia en la formulación y evaluación de medidas que incentiven la adaptación de comunidades y del entorno físico al cambio climático. Entre 2013 y 2016 INGENIAR participó como parte del equipo técnico que elaboró el Plan de Acción para La Mojana para el Fondo Acción. En este proyecto se evaluó el riesgo por inundación de esta zona, luego de verse afectada por las inundaciones derivadas del Fenómeno del Niño 2010-2011. INGENIAR realizó la evaluación del riesgo a partir de la generación estocástica de eventos de inundación que no han ocurrido aún y considerando dos tipos de intervenciones: (1) intervenciones en el dique marginal, las cuales modifican el componente de amenaza, y (2) intervenciones en las edificaciones de la región, las cuales modifican el componente de exposición y/o vulnerabilidad. Los mapas de la Figura 15 muestran la diferencia de la altura de inundación, medida en metros, al comparar el efecto de las alternativas con la condición sin intervenciones.



actual. Periodo de retorno 50 años (Elaboración Propia para Fondo Acción)

Las intervenciones adicionales que se consideraron en el proyecto fueron (1) construir protecciones perimetrales a las cabeceras municipales y (2) elevar las viviendas rurales, esto último agrupando en diferentes paquetes por municipios o según alturas de diseño. Al tener tres variables para considerar en términos de tipo de intervención (intervención al dique, a las cabeceras y a las rurales), cada una con diferentes costos de aplicación, y tener 11 municipios donde aplicarlas o no aplicarlas se generó una amplia colección de combinaciones para considerar. Para seleccionar la alternativa más conveniente se realizó un análisis de beneficio/costo. Por la cantidad de combinaciones generadas fue imposible considerarlas individualmente; por esta razón se desarrolló una metodología de optimización (algoritmo genético) donde se evaluaron combinaciones y de acuerdo con un calificador definido, se determinó un conjunto de alternativas que optimizaba la relación de reducción del riesgo frente a su costo.

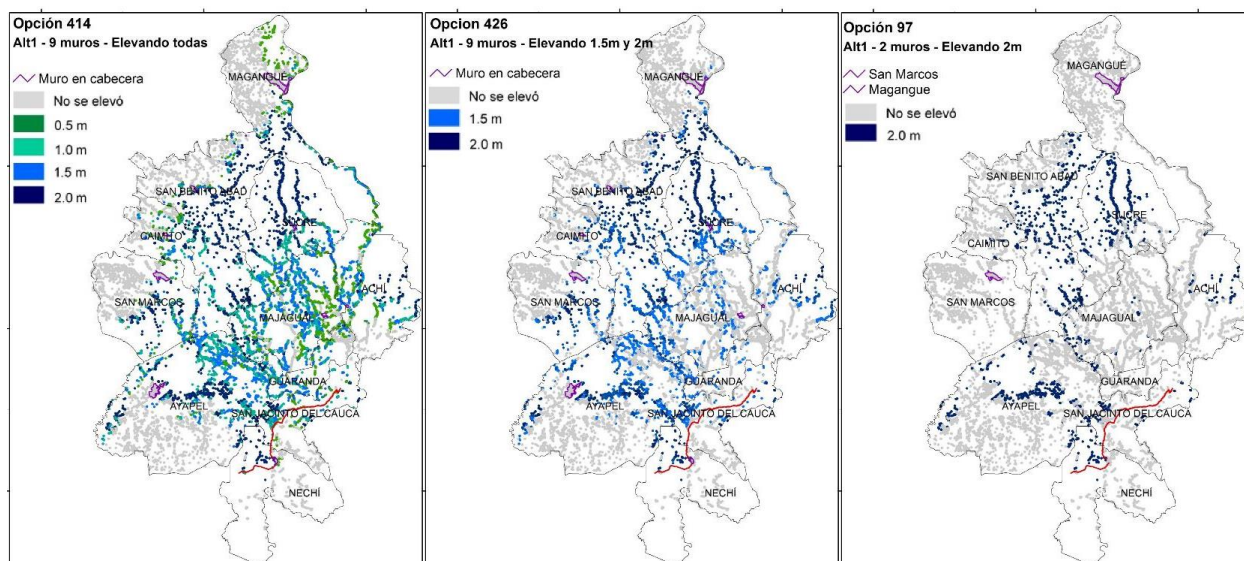


Figura 16. Resultado de alternativas de intervención seleccionadas a partir de procesos de optimización (Elaboración propia para Fondo Acción).

Mayores detalles sobre el enfoque metodológico propuesto se presentan en los Anexos A.1 a A.4 de este informe, ilustrada con datos y ejemplos de otros territorios, dado que no se cuenta aún con resultados específicos para Colombia, los cuales serán obtenidos como parte de este proyecto. La metodología indicada puede llegar a ser modificada en el transcurso de la ejecución de los trabajos, en función de la información disponible. Las formulaciones finales usadas serán presentadas en los siguientes productos de esta consultoría, junto con los correspondientes resultados.

5 REFERENCIAS

- Artés, T., Oom, D., de Rigo, D., Durrant, T. H., Maianti, P., Libertà, G., & San-Miguel-Ayanz, J. (2019). A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour. *Scientific Data*, 6(1), 296. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0312-2>
- Bernal, G.A., Salgado-Gálvez, M.A., Zuloaga, D., Tristancho, J., Gonzalez, D., Cardona, O.D. (2017). Integration of Probabilistic and Multi-Hazard Risk Assessment Within Urban Development Planning and Emergency Preparedness and Response: Application to Manizales, Colombia. *Int J Disaster Risk Sci* 8, 270–283 <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0135-8>
- CAF (2000). Fenómeno El Niño 1997-1998 Memoria, retos y soluciones. Volumen III - Colombia. Corporación Andina de Fomento. Caracas. Ex Libris. 242 p. [<http://dipecholac.net/docs/files/994-las-lecciones-de-el-nino.pdf>]
- Cardona, O.D., Wilches-Chaux, G. García, X., Mansilla, E., Ramírez, F. y Marulanda, M.C. (2004). Estudio sobre desastres ocurridos en Colombia: Estimación de pérdidas y cuantificación de costos. Banco Mundial - Agencia Colombiana de Cooperación Internacional - Departamento Nacional de Planeación. Bogotá D.C., 224 p.
- Cardona, O.D. 2011. Disaster risk and vulnerability: Concepts and measurement of human and environmental insecurity. In *Coping with global environmental change, disasters and security—threats, challenges, vulnerabilities and risks*, ed. H.G. Brauch, U. Oswald Spring, C. Mesjasz, J. Grin, P. Kameri-Mbote, B. Chourou, P. Dunay, J. Birkmann, 107–121. Berlin and New York: Springer-Verlag.
- CEPAL-BID, (2012). Valoración de daños y pérdidas Ola invernal en Colombia 2010-2011. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) - Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Bogotá D.C 240 p.
- CONABIO. (2019). ¿Qué es un ecosistema?
- Costanza, R., D’Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... Van Den Belt, M. (1997). The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26(1), 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>
- GEO, NASA, & Copernicus Climate Change Service. (2020). Global Wildfire Information System GWIS Ver 2.4.0. Recuperado de https://gwis.jrc.ec.europa.eu/static/gwis_current_situation/public/index.html
- Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., ... van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>
- Hoeppe, P. (2016). Trends in weather related disasters – Consequences for insurers and society. *Weather and Climate Extremes*. Volume 11 (3), 70-79.

IDEAM-PNUD - Alcaldía de Bogotá – Gobernación de Cundinamarca – CAR – Corpoguavio – Instituto Alexander von Humboldt – Parques Nacionales Naturales de Colombia – MADS –DNP (2012). Señales de cambio climático por análisis de extremos climático. Bogotá D.C., 44 p.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA (2017). Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.

IDEAM-UNAL (2018). Variabilidad climática y cambio climático en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., 53 p.

IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken D.J., Ebi, K.L., Mastandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (Eds)] Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 58 pp.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2014). Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge University Press. Cambridge, UK doi:10.1017/CBO9781107415379

Islam, S., Chu, C., Smart, J. C. R., & Liew, L. (2019). Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation: a systematic literature review. *Climate and Development*, 1–13. doi:10.1080/17565529.2019.1613217

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>

Organización Meteorológica Mundial (OMM), & Asociación Mundial para el Agua. (2016). Manual de indicadores e índices de sequía. En M. Svoboda & B. A. Fuchs (Eds.), Programa de gestión integrada de sequías. Serie 2 de herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016

Pabón, J.D. (2012). Cambio climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **36** (139), pp.127-144

Pabón–Caicedo J.D., 2013: An Assessment of Climate Change in Colombia: Trends in the 20th Century and Scenarios for the 21st Century. CEGeoIC 2013 International Conference on Geo-and Environmental Information and Communication Proceedings, CODATA Germany, Berlin, Germany. pp.1-10.

Pabón-Caicedo J.D., Montealegre-Bocanegra J.E., 2017: Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Jorge Álvarez Lleras No. 43. Bogotá D.C., 168 p

Pielke, R. (2019) Tracking progress on the economic costs of disasters under the indicators of the sustainable development goals, *Environmental Hazards*, 18:1, 1-6, DOI: [10.1080/17477891.2018.1540343](https://doi.org/10.1080/17477891.2018.1540343)

UNGRD-INGENIAR (2018). Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes. Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres. Bogotá D.C., 264 p.

UNEP-WCMC. (2011). The UK National Ecosystem Assessment: Synthesis of the Key Findings. En Unep-Wcmc. <https://doi.org/10.1177/004057368303900411>

UNISDR. (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas, 43. Recuperado de http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf

Van der Ploeg et al. (2010). The TEEB Valuation Database: overview of structure, data and results. En Foundation for Sustainable Development. Wageningen, the Netherlands.

Vickery, P. J., Masters, F. J., Powell, M. D, Wadhera, D. (2009). Hurricane hazard modeling: The past, present, and future. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 97 (2009) 392–405.

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R. M., ... Vignotto, E. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*. doi:10.1038/s43017-020-0060-z

A.1 MODELACIÓN DEL CLIMA INCORPORANDO CAMBIO CLIMÁTICO

A.1.1 Generación estocástica de series climáticas

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 precipitación o temperatura, 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 generan números aleatorios para la precipitación y la temperatura diaria para un determinado número de años de simulación, usando los parámetros de las distribuciones seleccionadas. Las series sintéticas de clima son luego utilizadas para generar mapas de amenaza integrada para diferentes periodos de retorno para toda el área de análisis. El esquema que describe el generador sintético de clima y sus aplicaciones para los casos particulares de sequía e inundación se presenta en la Figura A 1.

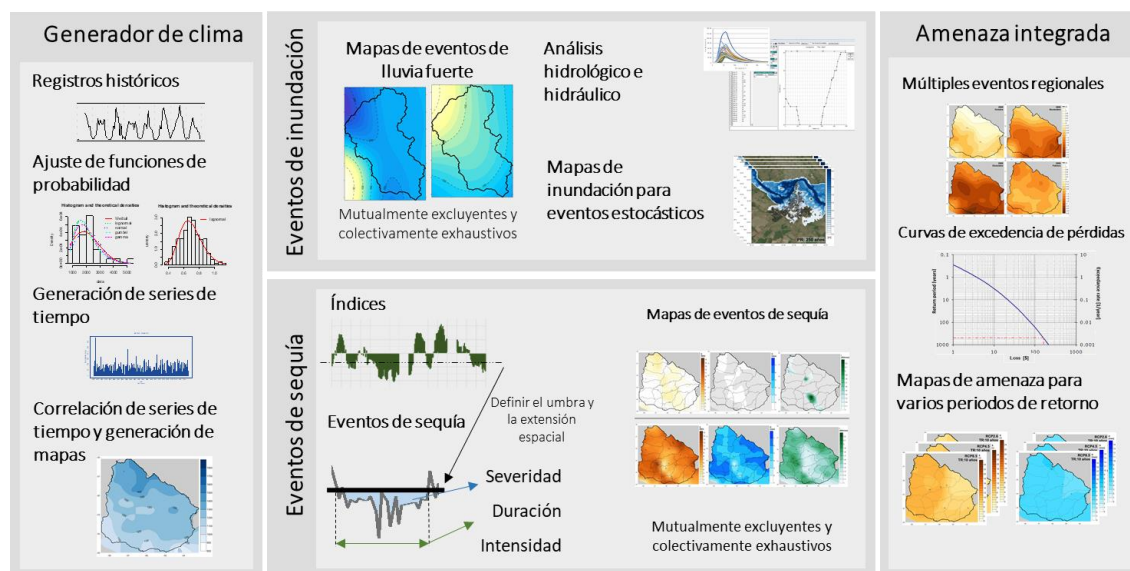


Figura A 1. Esquema de generación de eventos estocásticos a partir de series sintéticas de variables climáticas

El ajuste de las distribuciones de probabilidad se evalúa usando métodos cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos incluyen herramientas gráficas para discernir subjetivamente la bondad del ajuste. Se utiliza la superposición de la distribución paramétrica ajustada y el histograma de datos, gráficos cuantil-cuantil, gráficos de distribución acumulativa empírica y teórica (CDF), y gráficos de probabilidad-probabilidad o comparaciones de probabilidad acumulativa. La selección cualitativa se realiza con el Criterio de Información de Akaike (AIC, Akaike 1974) o el Criterio Bayesiano de Información (BIC, Schwarz 1978), que miden la calidad relativa de los modelos de distribución para un conjunto dado de datos. Está claro que los criterios AIC y BIC no dan ninguna indicación sobre la calidad del modelo, sino que es una comparación entre la bondad de ajuste de cada modelo y su complejidad en términos de un valor de penalización que aumenta con el número creciente de parámetros ajustados (Banimahd & Khalili, 2013). Numerosas alternativas de distribuciones de probabilidad se ponen a prueba para cada día del año

hidrológico y cada variable climática. Un ejemplo de las gráficas para definir la selección cualitativa de la distribución de probabilidad que mejor se ajusta se muestra en la Figura A 2

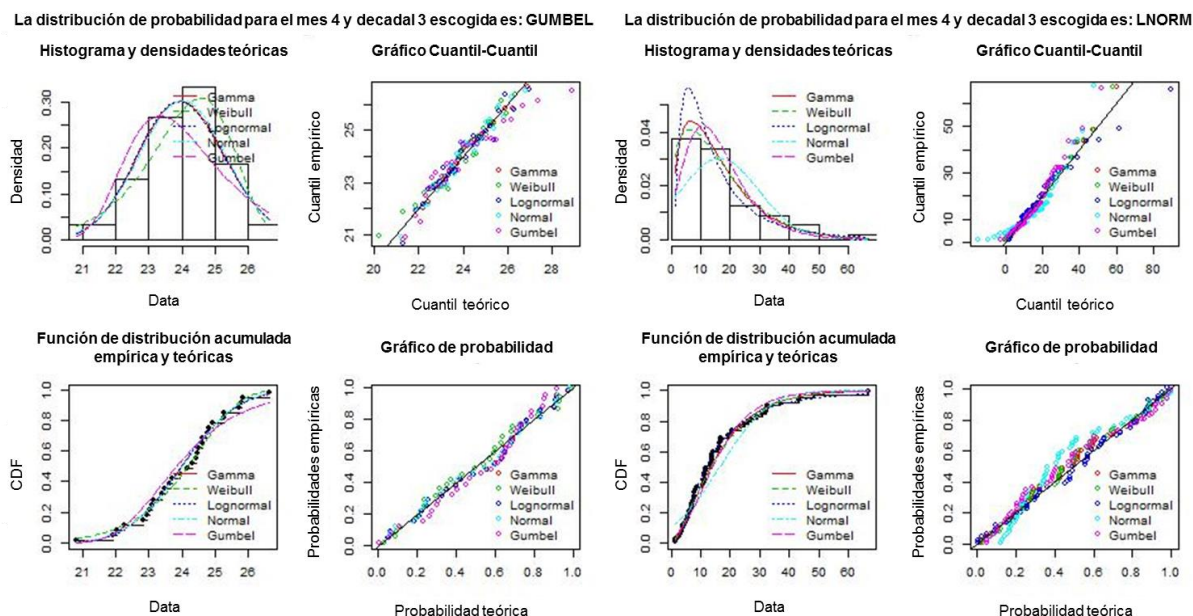


Figura A 2. Ajuste de distribuciones de probabilidad para registros históricos del 1ro enero para un punto de la malla de análisis: Temperatura media (izquierda) y precipitación total diaria (derecha).

En cuanto a los resultados del ajuste de las distribuciones de probabilidad a las series de variables climáticas se puede ver que para el caso de la precipitación la distribución que mayor número de veces se ajusta a los registros decadales en todas las estaciones es la log-normal seguida por la distribución Gamma. Para el caso de la temperatura la distribución que mejor se ajusta en la mayoría de los casos es la normal, seguida por la lognormal y la Gumbel. Es importante anotar que las distribuciones de probabilidad no varían significativamente por estación, pero si se presenta una variación en el tiempo. Por ejemplo, para el caso de la temperatura, las épocas de temperaturas más altas (abril y mayo) tienden a ajustarse a distribuciones tipo Gumbel. Para el caso de la precipitación, aunque en todas las épocas del año predomina el ajuste de la distribución lognormal, en épocas secas se presentan mayores casos de ajuste de la distribución Weibull.

Para evaluar el ajuste de las distribuciones de probabilidad se utilizó la prueba de ajuste con los coeficientes de Anderson-Darling (no está definida para distribuciones Pearson Tipo III o Logísticas) y Kolmogorov-Smirnov. Para definir si la muestra sigue una cierta distribución, se comparó el valor de significancia p-value con un nivel de 0.05, que implica que la probabilidad de concluir que los datos no siguen una distribución de probabilidad definida, cuando si siguen esa distribución, es del 5%. Al obtener valores de p-value por encima del nivel de significancia, no se puede rechazar la hipótesis nula ni concluir que los datos no se ajustan a la distribución considerada.

Series de precipitación

La Figura A 3 muestra las funciones de densidad de probabilidad y de probabilidad acumulada para el caso en que el número de días secos en la muestra sea muy alto. En ese caso, se divide la función de densidad

de probabilidad en dos partes 1) cuando la precipitación es igual a cero (P_0) 2) cuando la precipitación es mayor a cero ($1-P_0$). La probabilidad de que ocurra un día seco se define como:

$$P_0 = \frac{n}{N} = \frac{\# \text{ días secos}}{\# \text{ días en la muestra}} \quad 1$$

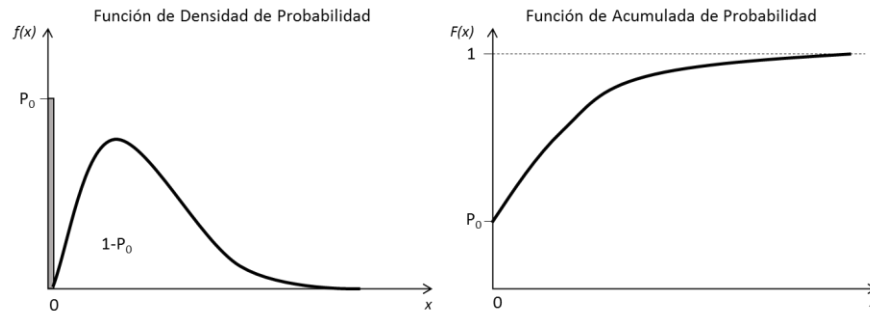


Figura A 3. Funciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada teniendo en cuenta $p=0$

Al seguir este procedimiento, se obtienen series de precipitación que mantienen la relación histórica de días de no lluvia con respecto al total de días, según la temporada del régimen de lluvias. Si se utiliza la función de densidad de probabilidad sin hacer este ajuste, no se obtienen días secos en las series aleatorias.

A. 1.2 Generación de series aleatorias

Luego de definir la distribución de probabilidad más apropiada para la precipitación y la temperatura (media, máxima y mínima), para cada uno de los 365 días del año, se generan números aleatorios para un determinado número de años de simulación (del orden de 1,000 años o más). Así, se producen series aleatorias de datos climáticos para cada una de las estaciones en el área de estudio. En seguida, con el fin de incluir la correlación existente entre valores de precipitación y temperatura en periodos de tiempo sucesivos, se calcula la matriz de autocorrelación para cada una de las series aleatorias generadas. La autocorrelación temporal indica la correlación de una variable con sus valores pasados y futuros (Wilks, 2006). Además, se incluyen los efectos de la correlación espacial, que representan la aparición de datos simultáneos en múltiples estaciones del área de estudio, utilizando la matriz de autocorrelación espacial entre valores de las diferentes estaciones de registro. Las series de números aleatorios correlacionados son más suaves, ya que los valores adyacentes (en escalas temporales y espaciales) tienden a ser más parecidos que en series independientes. De esta manera, se evitan cambios abruptos en los valores de precipitación y temperatura.

La Figura A 4 muestra las series sintéticas de precipitación y temperatura, simuladas mediante el procedimiento descrito anteriormente, para una ubicación arbitraria. Se modelaron 1,000 años equivalentes. Vale la pena destacar que estos 1,000 años no corresponden a un pronóstico, son valores aleatorios que han sido correlacionados para que se ajusten y representen el clima del área de estudio y brinden más información (comparado con la poca información histórica) sobre posibles eventos de sequía, que no se han presentado aún. Estas series modeladas son el insumo principal para la evaluación de riesgo probabilista de sequías, de las cuales se puede obtener un mayor número de eventos estocásticos para

modelar la amenaza. Estos eventos cumplen con las condiciones de ser mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos.

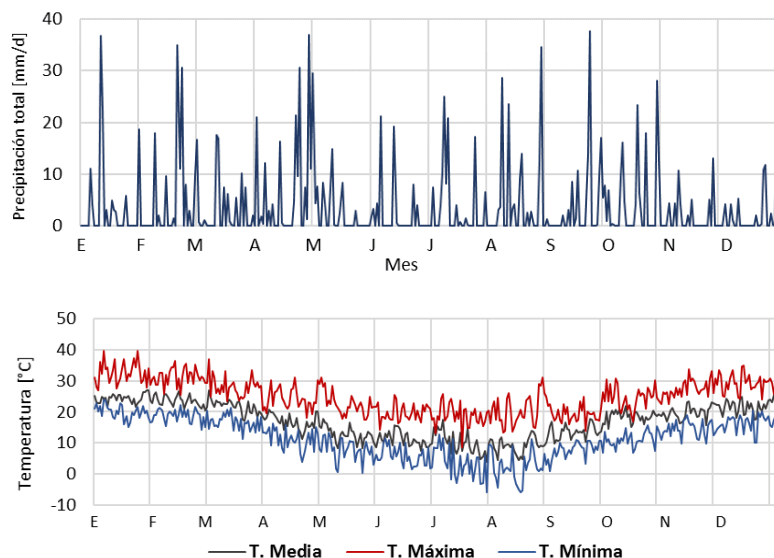


Figura A 4. Series sintéticas de un año de simulación para una ubicación arbitraria.

En la Figura A 5 se muestra el ajuste del promedio diario multianual de las series históricas del periodo 1948 al 2015 y de la serie sintética simulada aleatoriamente para 1,000 años. Se puede ver cómo la metodología propuesta resulta en series sintéticas con un ajuste preciso a los datos históricos, lo que indica que la serie aleatoria conserva adecuadamente las características del clima de la zona.

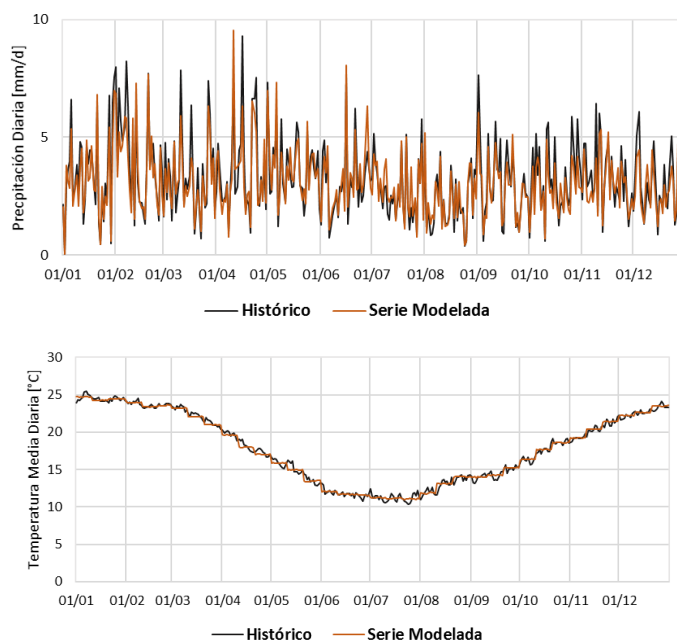


Figura A 5. Promedio diario multianual de precipitación (arriba) y de temperatura media (abajo) para serie histórica (1981-2010) y serie sintética (1000 años de simulación).

Una de las ventajas de la metodología de generación estocástica de series climáticas es la obtención de valores atípicos extremos, que hacen referencia a valores de precipitación por encima de los máximos de los registros históricos, y valores de temperatura por fuera del rango medio registrado en estaciones. Esto quiere decir que las series modeladas incluyen valores de precipitación y temperatura que no se han presentado, pero pueden ocurrir con una baja probabilidad, en el futuro. Los diagramas de cajas de la

A. 1.3 Incorporación del Cambio Climático en la generación de series climáticas

De acuerdo con el Reporte AR5 del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): "el calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde 1950, muchos de los cambios observados son sin precedentes sobre décadas y hasta milenios. La atmósfera y océano se han calentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar ha aumentado, y la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado" (IPCC, 2013). Debido a esto es importante considerar los efectos de este cambio climático en la evaluación del riesgo por eventos extremos climáticos.

Con este fin, se analizaron por lo menos 41 modelos circulación global² y los cuatro diferentes escenarios de forcings antropogénicos (RCP o Representative Concentration Pathways) definidos en el informe AR5 del IPCC. Para seleccionar el modelo que mejor se ajusta al territorio analizado, se minimiza la diferencia entre la media de los registros históricos en el periodo 1981-2010 y la predicción de cada modelo para el mismo periodo histórico, tanto para precipitación como temperatura. Una vez se determina el modelo de cambio climático más adecuado, se fijan las proyecciones de temperatura y precipitación en el futuro para la región de estudio, y con esto se perturban las series estocásticas de temperatura y precipitación que se generan.

A. 1.3.1 Dispersión de los modelos globales de circulación

La Figura A 6 muestra las proyecciones de cambio en precipitación y temperatura media en una ubicación arbitraria. Estas proyecciones son los resultados de la combinación de 41 modelos de circulación global, evaluados para cuatro RCP definidos en el AR5 del IPCC. En total se evalúan 311 proyecciones, considerando las diferentes corridas de cada modelo.

² Se usan los siguientes modelos de circulación 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).

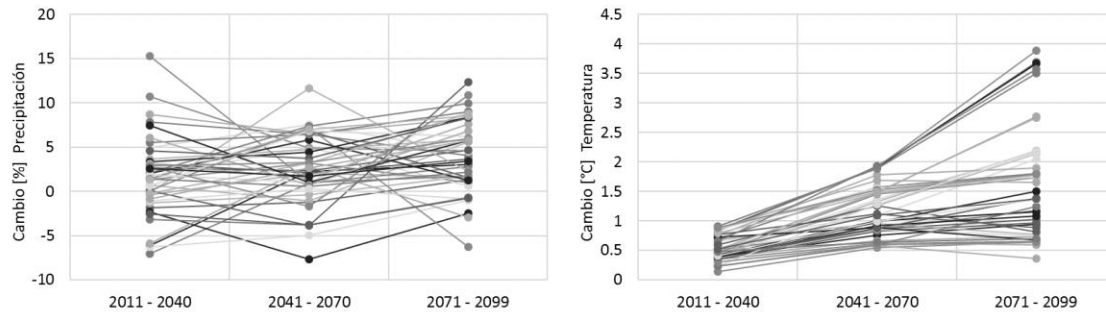


Figura A.6. Proyecciones de cambio de precipitación (izquierda) y temperatura (derecha) según múltiples GCM y RCP para una ubicación arbitraria.

A partir de las gráficas de dispersión de los modelos de circulación global se puede concluir que:

- Los modelos de circulación global tienen una alta dispersión, lo que indica que las proyecciones para un mismo punto tienen un amplio rango de valores esperados.
- No hay un único modelo que se ajuste de forma precisa a los registros históricos para un punto o un área de análisis.
- No se recomienda utilizar valores máximos ni mínimos de los modelos de circulación global, porque pueden subestimar o sobre estimar el clima histórico y aumentar la incertidumbre con las proyecciones de variabilidad climática en el futuro.

El alcance del estudio contempla evaluar el efecto del cambio climático en variaciones en precipitación y temperatura por los siguientes criterios:

- Los modelos de circulación global siempre brindan proyecciones de estas dos variables, y en pocos casos brindan información sobre otros parámetros climáticos (humedad, radiación, velocidad del viento) al ser parámetros complejos que responden a interacciones físicas y químicas de los modelos acoplados de atmósfera-océano-superficie terrestre-hielo oceánico.
- La metodología de amenaza climática contempla en su alcance la generación estocástica de series de precipitación y temperatura (proceso estadístico de simulación del clima a partir de registros históricos). La modelación de otras variables climáticas (humedad, radiación, velocidad del viento) implica el uso de modelos complejos de circulación atmosférica e interacción de sistemas terrestres, que no está dentro del alcance de este estudio.

A. 1.3.2 Selección del modelo global de circulación

Dada la dispersión de los modelos de circulación global, se debe seleccionar el modelo que mejor se ajuste a la línea base de clima analizada, por ejemplo 1981-2010, para el territorio en estudio. La metodología propuesta consiste en identificar cuál es el modelo cuyos resultados de calibración en la historia mejor se ajustan a las condiciones históricas medidas en la zona. Lo que se busca es definir el modelo que mejor replica las condiciones pasadas para disminuir la incertidumbre de las proyecciones al futuro. Para realizar este proceso de validación se toman los valores de temperatura y precipitación correspondientes al periodo de tiempo base (1981-2010) dados por cada uno de los modelos, y se comparan con los valores de la base de datos climática que se aplica en el modelo de amenaza por eventos climáticos. Se debe

seleccionar el modelo que minimice, en la mayor extensión del territorio, las diferencias entre los registros históricos y las predicciones (es decir, en el mayor número de estaciones o puntos de la malla de análisis).

Diferencias entre valores medios de registros históricos y modelos de circulación global

Para considerar la estacionalidad de los parámetros de precipitación y temperatura, se realiza un análisis de diferencias (entre predicciones del modelo y registros históricos en el periodo 1981-2010) en escala mensual. Es decir, se toman los valores de las predicciones del modelo para precipitación diaria y temperatura media diaria de cada uno de los meses y se compara (para cada mes) con el promedio diario multianual y la temperatura media de los registros históricos disponibles. La Figura A 7 muestra, de forma gráfica, la dispersión de las diferencias de precipitación (eje y-vertical) y temperatura (eje x-horizontal) para un mes hipotético en un sitio arbitrario. Los puntos de color azul indican la diferencia de cada uno de los modelos, con sus respectivos RCP y múltiples corridas; en total hay 311 puntos azules en la gráfica. Las líneas punteadas en las gráficas indican el percentil 25, 50 y 75 de la serie de las diferencias. Estos límites permiten medir la dispersión de los datos y se usan como valores de referencia para seleccionar modelos que se encuentren dentro de un percentil definido por el modelador. Los puntos que se ubican por fuera del tercer anillo (percentil 75) y muy alejados del punto de origen, se pueden considerar como puntos extremos.

Considerando que el origen de los ejes de estas gráficas (punto 0,0) indica que no hay diferencia entre los registros históricos y los resultados del modelo de circulación global, se tiene que:

- Puntos hacia la derecha del eje vertical indican que los modelos de circulación global tienen temperaturas más elevadas, es decir, condiciones de clima más calurosas. Los puntos hacia la izquierda de este eje indican condiciones de clima más frías en los modelos de circulación global.
- Puntos hacia la parte superior del eje horizontal indican que los modelos de circulación global tienen precipitaciones más altas que los registros históricos usados en la modelación. Los puntos hacia la parte inferior de este eje indican menor precipitación en los modelos de circulación global.

Los puntos en morado (más grandes) indican la ubicación de las diferencias del modelo seleccionado, aplicando criterios de selección regional (escoger un único modelo para todos los puntos en la malla de análisis), que se explica más adelante. Se presenta más de un punto seleccionado, porque el análisis incluye los múltiples RCP de cada modelo. Es decir, se consideran los diferentes escenarios de emisiones, desde el RCP2.6 (que considera medidas fuertes para la reducción de emisiones) hasta RCP8.5 (que no contempla políticas de reducción de emisiones lo que produce mayores concentraciones de gases efecto invernadero en el tiempo) según la disponibilidad de información. Con esto, se pueden calcular los efectos de mitigar el cambio climático y cómo cambian las condiciones climáticas que se pueden presentar en el futuro.

La Figura A 8 muestra la dispersión de las diferencias en precipitación y temperatura, para todos los meses del año para el punto de análisis. Se puede ver como algunos resultados reproducen condiciones más o menos lluviosas, o más o menos calurosas, considerando que el punto de origen de los ejes de las gráficas representa las condiciones de los registros históricos.

Esto muestra que la generación de modelos de circulación global es una tarea difícil y cómo el proceso de calibración no se ajusta a las diferentes regiones del planeta (razón por la que no existe un único modelo de cambio climático aceptado globalmente). Entonces, no existe un único modelo de circulación global

que se ajuste de forma óptima a todo el territorio analizado. Ahora bien, se puede seleccionar un modelo que cumpla con la condición de que sus predicciones se acerquen a los registros históricos en la mayor parte del territorio. Este procedimiento de selección se explica a continuación.

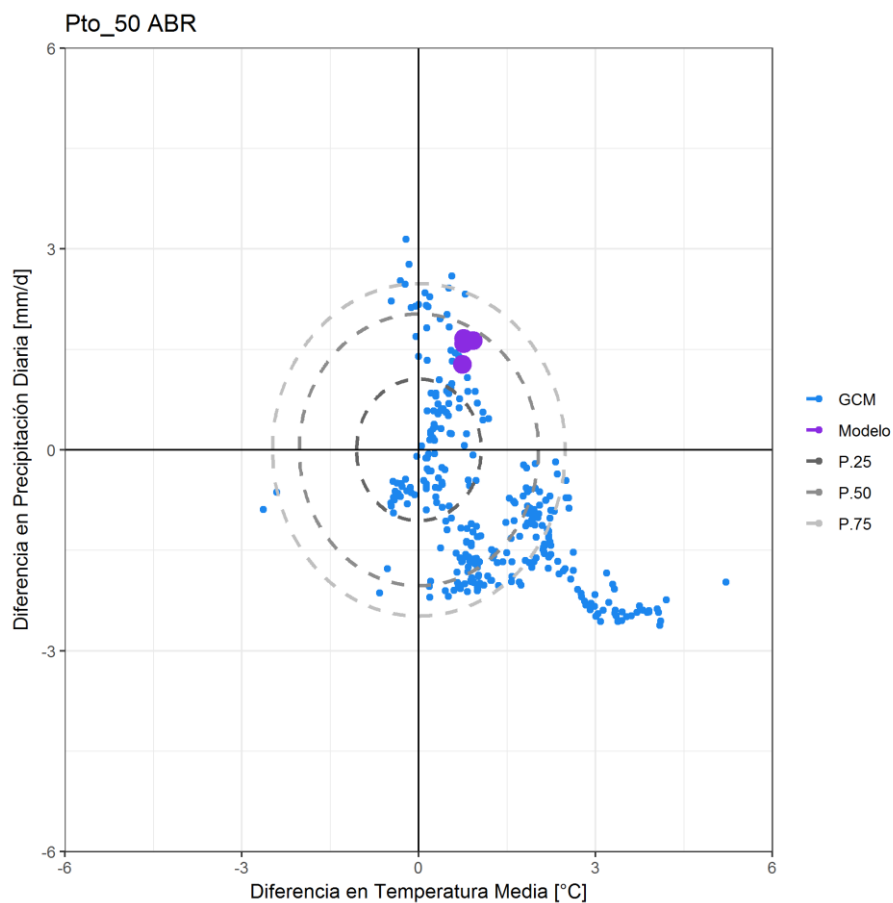
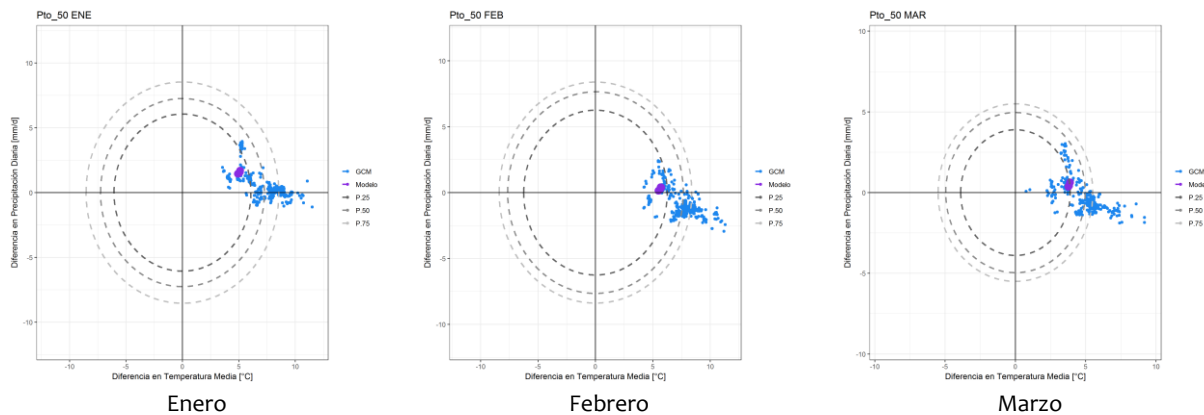


Figura A 7. Dispersión de las diferencias en temperatura y precipitación para el mes de abril en el punto 50



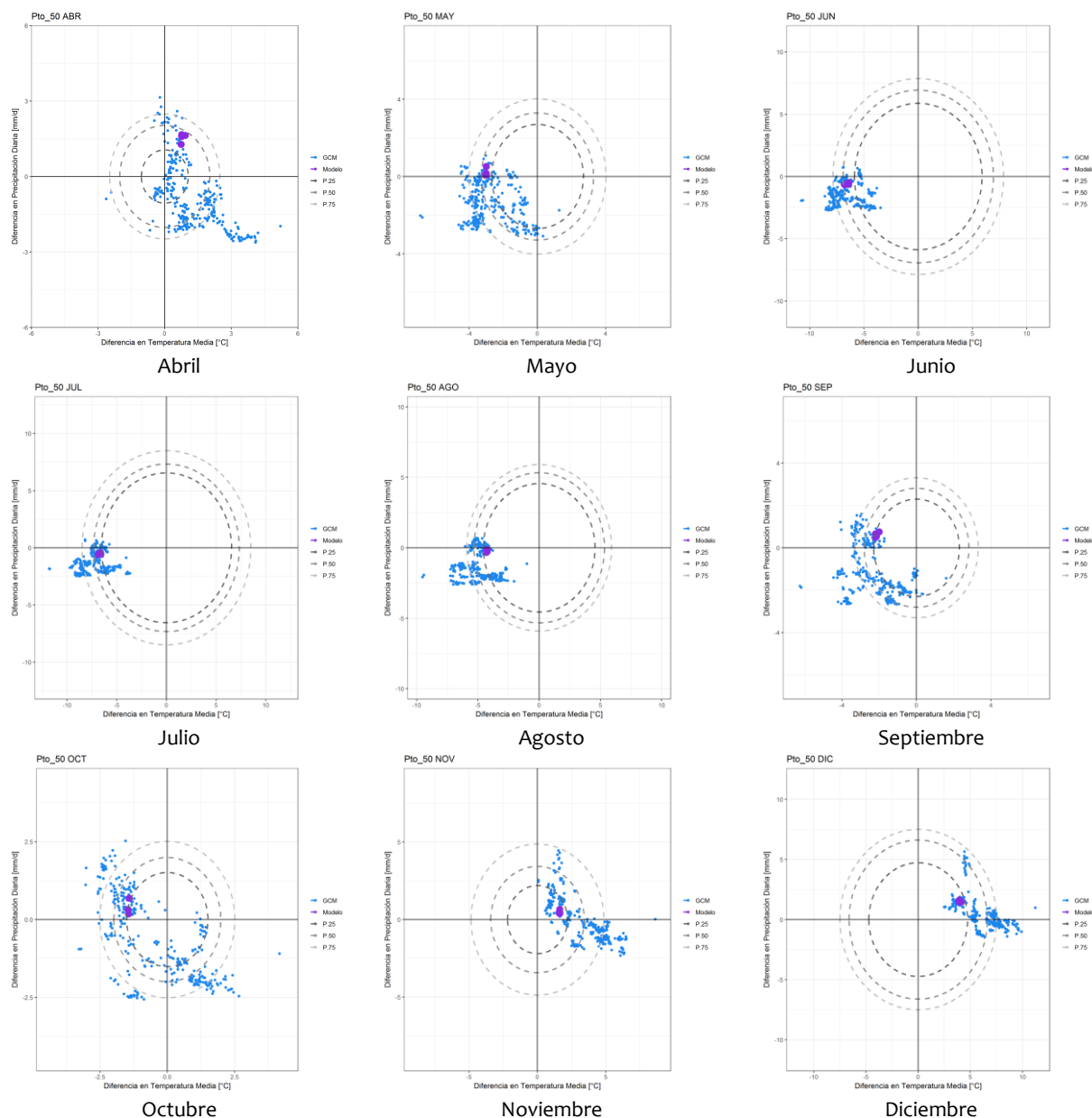


Figura A 8. Dispersión de las diferencias en temperatura y precipitación

Selección de un único modelo de circulación global para la región de análisis

Luego de determinar las diferencias entre los registros históricos y las predicciones de cada modelo para la base 1981-2010, se procede a seleccionar el modelo que mejor se ajusta en el mayor número de puntos de la malla de análisis. Esto se hace para mantener la homogeneidad de las predicciones de cambio climático en la zona. La selección se hace con el criterio de minimizar la distancia entre el punto de las diferencias de precipitación y temperatura con el origen. Es decir, se selecciona el modelo que para el mayor número de meses y mayor número de puntos tenga la menor distancia (equivalente a menor diferencia) al punto de origen 0,0. La distancia de cada punto se calcula como:

$$d = \sqrt{t^2 + p^2}$$

Donde $t = T_{GCM} - T_{Histórica}$ y $p = P_{GCM} - P_{Histórica}$ para cada media diaria mensual de temperatura y precipitación, respectivamente. Una vez se calculan las distancias para todos los modelos de circulación global, con sus respectivos RCP y corridas, se calcula la media de distancias para cada mes y la media de distancias para el año.

A. 1.3.3 Ajuste de series simuladas a predicciones de cambio climático

Los efectos asociados al cambio climático se incluyen en la generación de las series sintéticas de precipitación y temperatura. Estas perturbaciones se realizan según las estimaciones de modelos de cambio climático global. Este mismo procedimiento se realiza para todas las estaciones de registro de datos climáticos disponibles en el área de estudio. Según la resolución de los modelos de circulación global, cada punto de la malla de análisis puede tener una proyección diferente. Cada serie modelada debe ser perturbada según su ubicación y los resultados del modelo para ese mismo punto. Esto permite caracterizar completamente las posibles condiciones futuras de ocurrencia de las sequías en todo el territorio de análisis.

A. 2 MODELACIÓN DEL RIESGO EN EDIFICACIONES E INFRAESTRUCTURA

A. 2.1 Modelo de amenaza por inundaciones

A. 2.1.1 Amenaza por inundación a escala nacional

La modelación de inundaciones a escala nacional está basada en el uso de un modelo de resolución intermedia. El modelo se basa en la definición de caudales de entrada a las diferentes porciones de cuenca tributaria aguas arriba de diversos puntos sobre los ríos y quebradas principales, esto con el fin de transitar hidráulicamente los caudales dentro de los canales, con diversas entradas en función de las subcuencas que componen la cuenca del cauce principal. De esta manera, y a una resolución intermedia, es posible cubrir todos los ríos del país y determinar áreas y tirantes de inundación por desbordamiento. Mayores detalles de la metodología acá descrita pueden consultarse en CIMA Research Foundation (2015).

Para el desarrollo del modelo global de inundación, se compiló una base global de datos de caudal a partir de diferentes fuentes, reuniendo cerca de 8000 estaciones de aforo en todo el mundo con series de tiempo lo suficientemente largas como para realizar un análisis estadístico de valores extremos. Se obtuvieron datos a escala diaria, pero en su mayoría los datos disponibles se encontraban en una escala mensual y por este motivo se emplearon técnicas estocásticas para escalar las series de tiempo y que todas quedaran en escala diaria, manteniendo sus propiedades estadísticas. Dicho algoritmo se calibró en zonas con series de tiempo diarias disponibles.

La magnitud del caudal de inundación se estima con métodos basados en análisis estadísticos sobre los datos de la región hidrológica. El método implementado en este caso fue el análisis de frecuencias regional. La metodología propuesta analiza los datos estadísticos de una región homogénea identificada usando el Método del Índice de Inundación (IFM por sus siglas en inglés de Index Flood Method) para estimar la frecuencia de inundación en el sitio con la mayor confianza posible incluso para cuantiles con muy bajas frecuencias. Este enfoque permite que aumente el tamaño de la muestra en la medida en que las series de tiempo que caen en grupos homogéneos pueden usarse juntas formando una serie de tiempo adimensional más larga, y reduciendo la incertidumbre en la estimación de cuantiles atípicos.

Se usó un modelo hidrológico continuo, distribuido y físico para mejorar la regresión a través de variables climáticas y dar una idea en donde el índice de descarga no puede derivarse de observaciones. Cuando se obtienen los cuantiles de descarga estos resultados conforman los datos de entrada del modelo hidráulico simplificado de inundación. El modelo dibuja secciones hidráulicas transversales donde se calcula el nivel de inundación a partir del valor del flujo resolviendo la ecuación de Manning. Estos niveles se interpolan sobre la base de la morfología relativa local y se incluyen modificaciones para tener en cuenta la conectividad hidráulica longitudinal entre secciones especialmente en las grandes planicies de inundación. La escala del modelo no permite representar eventos como inundaciones costeras o inundaciones repentinas.

Se determinan mapas de inundación para diferentes períodos de retorno los cuales se validaron con mapas satelitales de inundación de diferentes fuentes y se obtuvieron buenos resultados especialmente en los eventos extremos (relacionados con mayores períodos de retorno). En los eventos de menor intensidad y mayor recurrencia (relacionados con menores períodos de retorno) el modelo tiende a sobreestimar la

inundación con respecto a mapas de inundaciones generados localmente y que se usaron como referencia. Esto porque la resolución del modelo no permite tener en cuenta defensas de inundación.

Para incluir las defensas se hizo un post-procesamiento de los mapas de inundación basados en la hipótesis que las defensas tienden a ser mayores en aquellas ubicaciones con un mayor valor expuesto, y disminuyen en la medida en que este mismo valor decrece. Para esto se usó la distribución del PIB para los diferentes países. Se asumieron períodos de retorno objetivo de las defensas como función del PIB máximo del área. Así se reduce el volumen de la inundación asumiendo que las defensas contienen el volumen de agua para el período de retorno objetivo. Luego se asume que las defensas fallan parcialmente cuando se excede el período de diseño, haciendo la falla mayor en la medida que aumenta la amenaza.

Por otro lado, el efecto de las represas se incluyó definiendo un procedimiento que tuviera en cuenta el efecto de dichas estructuras en el flujo aguas arriba y abajo de las mismas. Se partió de la información disponible en la Base de Datos Global de Embalses y Presas (GRanD, por sus siglas en inglés de Global Reservoirs and Dams Database), actualizada a marzo de 2011, la cual contiene las principales represas del mundo.

La amenaza se presenta en términos de un conjunto de escenarios, donde cada uno de estos se caracteriza por una frecuencia anual de ocurrencia y donde las intensidades se definen en términos de dos parámetros: el valor esperado y la desviación estándar del tirante de inundación

A. 2.1.2 Modelo de precipitación-escorrentía: Clark Modificado

Clark modificado, o ModClark es un modelo paramétrico distribuido, es decir, las variaciones espaciales de las características y procesos hidrológicos son consideradas de manera explícita (Brunner & Bonner, 1994). Esto se traduce en que se tienen en cuenta las variaciones en el tiempo de viaje hacia el punto de concentración, desde todos los puntos de la cuenca de análisis.

El modelo Clark modificado define dos procesos fundamentales en la transformación de un volumen de lluvia en escorrentía directa:

- La traslación o movimiento del exceso de precipitación a lo largo de los drenajes de la cuenca.
- La atenuación, o disminución de la magnitud de descarga a medida que el exceso de precipitación es almacenado en la cuenca (en el suelo, superficie y canales).

Proceso de traslación

El tiempo que le toma a una partícula de agua llegar a la salida de la cuenca se modela mediante una malla de tiempos de viaje. Para cada celda del territorio, se determina el tiempo hasta la salida de la siguiente manera:

$$t_{celda} = t_c \frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \quad 3$$

en donde t_{celda} es el tiempo de viaje del agua desde la celda en consideración, t_c es el tiempo de concentración de la cuenca, d_{celda} es la distancia de la celda en consideración a la salida de la cuenca, y $d_{m\acute{a}x}$ es la máxima distancia de alguna celda a la salida de la cuenca.

El tiempo de concentración puede calcularse aplicando diferentes ecuaciones de diferentes autores, teniendo en cuenta las características de la cuenca para poderlas aplicar, por ejemplo la ecuación de Kirpich (1940), la cual se expresa como:

$$t_c = 0.0003245 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77} \quad 4$$

en donde t_c es el tiempo de concentración en horas, L es la longitud del cauce principal en m y S es la pendiente media del cauce principal.

Con la información del cauce y la topografía general se obtiene la pendiente media del cauce empleado el método de Taylor-Schwarz (Springall, 1970) la cual está dada por:

$$S = \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \quad 5$$

En donde la longitud del cauce principal L se divide en n número de segmentos de longitud l y para cada uno de ellos se calcula su pendiente S .

Del área de cada celda se determina el volumen de escurrimiento en cada momento del tiempo. Estos volúmenes son enrutados usando el modelo de reservorio lineal dentro del proceso de atenuación.

Proceso de atenuación

El almacenamiento de corto plazo juega un papel muy importante en la transformación del exceso de precipitación en escorrentía. En el método de Clark, este almacenamiento se modela como un reservorio lineal. En un reservorio lineal aplica la ecuación de continuidad de la forma:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad 6$$

en donde $\frac{dS}{dt}$ es la tasa de cambio del almacenamiento en la cuenca, en el tiempo t , I_t es el caudal de entrada, y O_t es el caudal de salida. En el modelo de reservorio lineal, el caudal de salida está relacionado con el volumen almacenado de manera proporcional:

$$S_t = RO_t \quad 7$$

en donde R es el parámetro de reservorio lineal. Al combinar y solucionar las ecuaciones anteriores mediante un enfoque sencillo de diferencias finitas, se obtiene que

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad 8$$

en donde C_A y C_B son coeficientes de enrutamiento, que se calculan como:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad 9$$

$$C_B = 1 - C_A \quad 10$$

El caudal de salida promedio para el tiempo t es entonces:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad 11$$

Para cada celda de la malla de cálculo, se calcula un caudal de salida promedio, para cada momento del tiempo. Al final, la suma de los caudales promedio, en cada paso de tiempo, da el hidrograma de salida final (Q_t).

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_{celdas}} \bar{O}_{i,t} \quad 12$$

De esta manera, el modelo Clark modificado puede verse esquemáticamente de la siguiente manera:

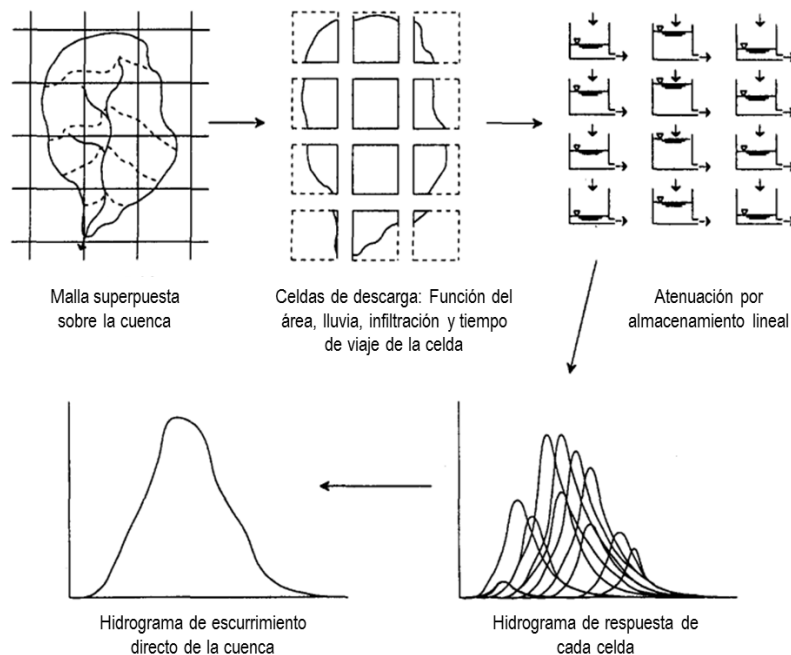


Figura A 9. Modelo de escorrentía directa ModClark. Modelo conceptual (Kull & Feldman, 1998)

A diferencia del método de Clark (1945), que es un modelo agrupado, el modelo ModClark (Peters & Easton, 1996) presenta el cálculo y caracterización de los procesos de traslación y atenuación antes descritos de manera distribuida en la cuenca de análisis por medio de una malla previamente definida. De cada una de las celdas de la malla de análisis se obtienen tiempos de viaje y relaciones de atenuación que derivan en una serie de hidrogramas en la salida de cada una de las celdas. A partir de la envolvente de dichos hidrogramas se obtiene el hidrograma de salida en el punto de concentración deseado en el análisis. Para este caso el punto de concentración está ubicado aguas arriba de la ciudad de Artigas.

A. 2.1.3 Inundación aluvial – modelo 2D

El carácter dinámico de las inundaciones y la influencia del desplazamiento del agua hacia las zonas bajas, hacen necesario emplear modelos matemáticos que, por lo menos, incluyan ecuaciones de flujo en dos direcciones horizontales. El método propuesto considera un modelo numérico bidimensional con base en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y en la ecuación de continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical. Se considera el flujo sobre una región con o sin agua.

Las ecuaciones dinámicas que describen la conservación de cantidad de movimiento son:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad 13$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad 14$$

en donde u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x y y respectivamente, n es el coeficiente de rugosidad según la fórmula de Manning, h es el nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural y t es el tiempo.

El principio de la conservación de masa (ecuación de continuidad) en dos dimensiones horizontales establece que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u h + \frac{\partial}{\partial y} v h = 0 \quad 15$$

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse se divide en celdas de forma rectangular de largo ∂x y ancho ∂y . Para calcular el flujo de agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales conformado por las ecuaciones anteriores y considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.

A. 2.2 Modelación de la amenaza por huracanes

La simulación de ciclones tropicales es un enfoque ampliamente aceptado para la evaluación de esta amenaza. Los usos principales de la simulación de ciclones son la estimación de las intensidades del viento y marea de tormenta para el diseño de edificaciones e infraestructura y la estimación de pérdidas para establecer primas de seguros (Vickery et al., 2009).

Una evaluación basada en eventos se utiliza para crear un conjunto de ciclones estocásticos que, a su vez, se usa para la evaluación de pérdidas. La amenaza asociada con ciclones tropicales se define por medio de su frecuencia anual de ocurrencia y su severidad, caracterizando esta última a través de un parámetro de intensidad calculado en cada ubicación geográfica específica. La intensidad seleccionada para vientos fuertes es la velocidad para ráfagas de 3 segundos a 10 metros de la superficie (v_{10}). Para la marea de tormenta, la intensidad es la altura de subida del agua en la costa (η). La evaluación de la amenaza está

basada en la frecuencia histórica de ocurrencia de ciclones tropicales y sus diferentes grados de intensidad. Una vez definidos los parámetros que caracterizan la ocurrencia de ciclones tropicales, desde el punto de vista físico, es necesario generar un conjunto de eventos estocásticos a través de la simulación de una serie de eventos aleatorios. El conjunto de eventos aleatorios incluye todas las formas posibles en las que la amenaza relacionada con ciclones tropicales podría manifestarse en las regiones de análisis en términos de frecuencia y severidad.

Para cada evento se caracteriza la amenaza, en cualquier punto de un territorio dado, a través de la probabilidad de distribución de la intensidad (v_{10} , η), definida en términos de su valor esperado y su varianza. La amenaza viene entonces representada como un conjunto de eventos estocásticos con intensidades promedio y frecuencias de ocurrencia compatibles con la información histórica disponible.

A. 2.2.1 Perturbación de las trayectorias de los ciclones

Para cada ciclón histórico, se genera un conjunto de muchas trayectorias “hijas” siguiendo un proceso bidimensional de Wiener en el cual la trayectoria histórica es perturbada artificialmente para crear una nueva trayectoria hija. Este proceso de perturbación es presentado en la ecuación 16 para la coordenada de latitud (X) de los puntos de la trayectoria:

$$X(t_{k+1}) = X(t_k) + \Delta X_{k,k+1} + e \quad 16$$

donde $X(t_k)$ es la coordenada de longitud de un punto de la trayectoria en el instante t_k , $X(t_{k+1})$ es la coordenada de longitud del siguiente punto de la trayectoria registrado en el instante t_{k+1} , $\Delta X_{k,k+1}$ es la longitud delta conocida entre el instante k y $k+1$, y e es una variable aleatoria que sigue una distribución normal con $\mu=0.0$ y $\sigma=0.5$. Un proceso equivalente debe realizarse simultáneamente para la coordenada de latitud (Y). Después del proceso de perturbación, las características principales del ciclón se mantienen inalteradas, lo que significa que cada punto de trayectoria hija tendrá la misma presión central y velocidad de viento sostenida que el original.

A. 2.2.2 Modelación de amenaza de viento

Tal como es presentado por Vickery et al., (2009a), la modelación del campo de viento es un proceso de tres pasos: *i*) dadas las características del ciclón como presión central y el radio de vientos máximos (R_{mv}), se calcula la velocidad del viento a altura de gradiente. La altura de gradiente es la altitud en la cual la velocidad del viento no se ve afectada por las condiciones de la superficie. Esta se asume, usualmente, como equivalente a la velocidad media del viento, *ii*) de la velocidad del viento a altura de gradiente, se calcula la velocidad media de superficie, aplicando un modelo de capa límite atmosférica (CLA); y *iii*) la velocidad media de superficie es modificada por condiciones específicas del sitio, como amplificación topográfica y rugosidad de la superficie, y se ajusta a un tiempo promedio utilizando factores de ráfaga.

Campo de viento del gradiente

La velocidad del viento del gradiente (VG) se calcula utilizando la representación presentada por Holland (1980), en la cual VG es dada como

$$v_G = \sqrt{\left(\frac{RMW}{r}\right)^B \cdot \frac{B \cdot \Delta P \cdot \exp\left(-\left(\frac{RMW}{r}\right)^B\right)}{\rho} + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{f \cdot r}{2}} \quad 17$$

donde r es la distancia de observación (eg. La distancia del sitio de cálculo al centro de la tormenta), B es el parámetro de Holland, ΔP es el gradiente de presión ($\Delta P = P_n - P_0$, donde P_n es la presión atmosférica nominal establecida a 100.5 KPa), ρ es la densidad del aire, y f es el parámetro de fuerza de Coriolis, definido como

$$f = 2\Omega \sin\varphi \quad 18$$

donde Ω es la velocidad de rotación angular de La Tierra, y φ es la latitud del ojo del ciclón. El radio de vientos máximos (Rmv) se calcula como función de la presión central del ciclón P_0 ,

$$RMW = 0.4785P_0 - 413.01 \quad 19$$

Vickery y Wadhera (2008) encontraron que es posible modelar el parámetro de Holland B como función de un parámetro no dimensional, A , definido como

$$B = 1.732 - 2.237\sqrt{A} \quad 20$$

$$A = \frac{RMW \cdot f}{\sqrt{2R_d T_s \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta P}{P_0 \cdot e}\right)}} \quad 21$$

donde R_d es la constante de gas aire y es la temperatura de superficie del mar (dada en °K).

Velocidad del viento en superficie

La velocidad del viento a altura de gradiente (VG) es modificada para obtener la velocidad a nivel de superficies (10 metros sobre agua o tierra, v_{10}) utilizando un modelo de capa límite atmosférica. Vickery et al. (2009b) modelaron la variación de la velocidad media del viento, $u(z)$ con altura z , en la capa límite del ciclón como

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - 0.4 \left(\frac{z}{H^*}\right)^2 \right] \quad 22$$

donde k el coeficiente de von-Karman ($k=0.4$), u^* es la velocidad de fricción, z_0 es la longitud de rugosidad aerodinámica, y H^* es la altura de la capa límite. Vickery et al., (2009b) modelaron H^* como

$$H^* = 343.7 + \frac{0.26}{I} \quad 23$$

donde I es la inestabilidad inercial, definida por Kepert (2001) como

$$I = \sqrt{\left(f + \frac{2V_G}{r}\right) \left(f + \frac{V_G}{r} + \frac{\partial V_G}{\partial r}\right)} \quad 24$$

Cuando se usa este modelo, el término $\partial VG/\partial r$ no es considerado. La velocidad de fricción, u^* , se define como

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad 25$$

donde τ es la tensión del viento en superficie, definida como

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot u^2 \quad 26$$

donde C_d es el coeficiente de arrastre, y u es la velocidad del viento en superficie.

Modificadores de sitio de la velocidad del viento

Las condiciones locales modifican el valor final de la velocidad del viento en cada ubicación geográfica. Dentro del modelo de viento, la rugosidad de superficie y el efecto topográfico son considerados como los principales modificadores de la velocidad del viento a nivel local.

Rugosidad de la superficie

La rugosidad de la superficie es directamente considerada en el cálculo de la velocidad del viento en superficie, utilizando parámetros z_0 (longitud de rugosidad aerodinámica) y C_d (coeficiente de arrastre). Estos parámetros dependen del tipo de terreno sobre el que se calcula la velocidad del viento.

Efecto topográfico

El efecto topográfico es evaluado a través de la identificación de áreas protegidas y expuestas al viento en un Modelo de Elevación Digital (MED). El factor del efecto topográfico (FT) es definido por la exposición del sitio topográfico, como:

- Baja exposición. Corresponde a depresiones topográficas (eg. Sitio protegido). FT = 0.8.
- Exposición normal. Corresponde a un sitio plano. FT = 1.0.
- Alta exposición. Corresponde a la cima de las montañas (eg. Sitio expuesto). FT = 1.2.

Para cada nodo en el MED, dada su ubicación geográfica (X, Y), se cuantifica su exposición buscando en las cuatro direcciones cardinales (norte, sur, este y oeste). Esta búsqueda es delimitada estableciendo los siguientes parámetros:

- N_{max} : Distancia máxima horizontal en la cual se evaluará la exposición con respecto a una ubicación fija.
- m : Pendiente topográfica de referencia, utilizada para evaluar la exposición del sitio con respecto a los terrenos adyacentes.

Entonces, para cada sitio (X, Y) en el MED, buscamos un sitio (K, L) hasta que falle la siguiente condición:

$$Z_{K,L} \geq Z_{X,Y} + Z_{Lim} \quad 27$$

donde Z_{Lim} es la diferencia de altura requerida entre los sitios (X, Y) y (K, L) para obtener una pendiente m .

Si el sitio (K, L) existe, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como baja exposición, que corresponde a una depresión topográfica. Si esta condición no se cumple, entonces la pendiente media topográfica (m_T) entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L) se calcula como

$$m_T = \frac{Z_{X,Y} - Z_{K,L}}{D} \quad 28$$

donde D es la distancia entre el sitio (X, Y) y el sitio (K, L) . Si $|m_T| \leq m$, entonces el sitio (X, Y) se clasifica como exposición normal. Finalmente, si $|m_T| > m$ entonces el sitio (X, Y) se clasifica como alta exposición.

Factor de ráfaga

Los modelos de vulnerabilidad utilizados en el cálculo del riesgo correlacionan la pérdida con la velocidad del viento para ráfagas de 3 segundos. Esto quiere decir, que necesitamos determinar la velocidad para un tiempo promedio diferente al tiempo producido por el modelo del campo básico del viento. Se utiliza la fórmula del factor de ráfaga propuesta por ESDU (1983) dado que, aunque fue desarrollada para tormentas extra-tropicales, muchos autores concluyeron que no hay evidencia que sugiera que los factores de ráfaga asociados con los ciclones tropicales sean diferentes a los asociados con las tormentas extra-tropicales (Sparks y Huang, 1999; Vickery y Skerlj, 2005).

El factor de ráfaga K_T es definido en ESDU (1983) como

$$K_T = 1 + gI_u \quad 29$$

donde g es el factor de cresta y I_u es la intensidad de turbulencia. El factor de cresta g se modela como

$$g = 1 - 0.193 \left[\frac{T_u}{\tau} + 0.1 \right]^{-0.63} \quad 30$$

donde τ es la duración objetivo de ráfaga (3 segundos) y $T_u = 3.13z^{0.2}$. La intensidad de turbulencia I_u se calcula como

$$I_u = \frac{7.5\eta(0.538 + 0.09 \ln(z/z_0))^{\eta^{16}}}{2.5(1 + 0.156 \ln(u_*/f \cdot z_0)) \cdot (\ln(z/z_0) + 34.5 f \cdot z/u_*)} \quad 31$$

donde

$$\eta = 1 - \frac{6 \cdot f \cdot z}{u_*} \quad 32$$

Finalmente, la velocidad media del viento a 10 metros sobre agua o tierra se calcula como

$$v_{10} = u(z = 10m) \cdot F_T \cdot K_T \quad 33$$

Los campos de viento están dados en términos de la distribución geográfica de v_{10} . Por lo tanto, para cada ciclón histórico se calcula cien campos, cada uno correspondiente a una simulación de la trayectoria histórica. Para cada conjunto de campos de viento, se calcula el valor esperado y la varianza del viento en cada ubicación de la malla, que representan, respectivamente, el primer momento natural y segundo

momento central de una distribución de probabilidad Gamma que define la naturaleza aleatoria de v_{10} . Por lo tanto, se calcula un escenario probabilista de amenaza para cada ciclón histórico.

A. 2.3 Conformación de un proxy de edificaciones e infraestructura

La información de exposición frente a fenómenos naturales corresponde al inventario de bienes inmuebles e infraestructura que pueden ser afectados y se expresa en términos de activos y de población. Es un componente fundamental en el análisis o evaluación de riesgo y de su resolución y detalle depende el grado de precisión de los resultados. El modelo puede evaluarse con diferentes niveles de resolución y cuando no se cuenta con información al detalle es necesario realizar estimaciones aproximadas que representen o den cuenta de dicho inventario de activos expuesto en forma aproximada. La Figura A 10 presenta el procedimiento general para desarrollar un modelo simplificado de activos expuestos para el país.

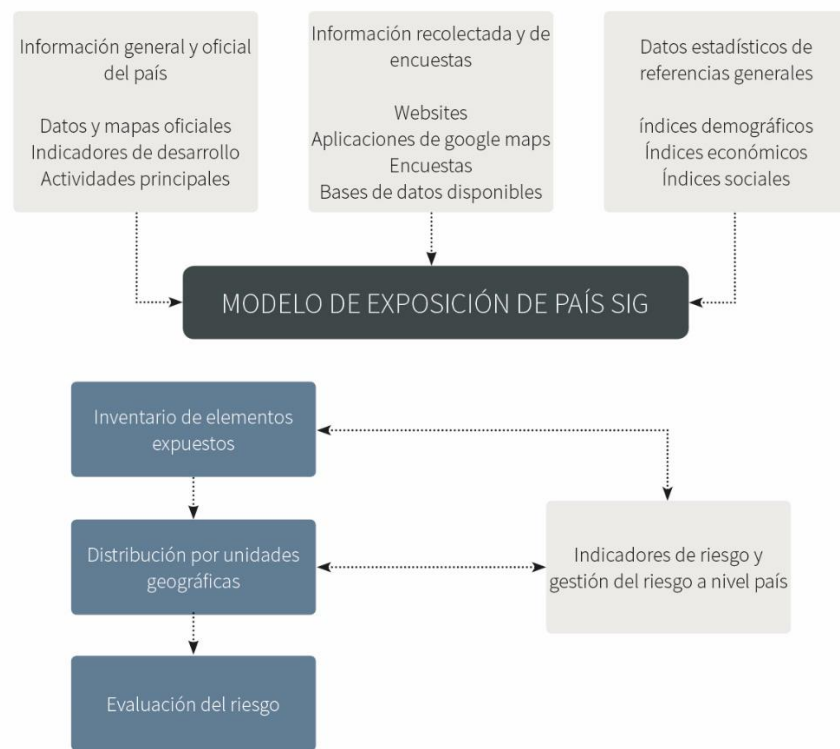


Figura A 10. Modelo de activos expuestos

El objetivo del modelo simplificado de activos expuestos es además distribuir el inventario geográficamente, de tal manera que represente en forma general la ubicación de los activos y de la población expuesta. La exposición estará dada por tipos de componentes con su ubicación geográfica, el valor asignado de reposición, la ocupación estimada en número de personas y las características que permitan asignar funciones de vulnerabilidad ante las diferentes amenazas con fines de estimar el riesgo. Estas bases de exposición están conformadas por indicadores de exposición en términos de tipo de infraestructura general del país y de las ciudades, su valoración económica y su ocupación humana. El modelo también intenta proporcionar información para la formulación de indicadores de riesgo. El

esquema de la Figura A 10 ilustra el modelo utilizado, en el cual la información se concentra en una base de datos para su posterior análisis y uso.

El modelo de exposición aproximado requiere las siguientes definiciones:

- (a) Caracterización geográfica y división política: el modelo se plantea mediante una categorización en las siguientes unidades:
 - i. Departamentos (unidades subnacionales)
 - ii. Municipios que conforman Departamentos
 - iii. Ciudades (cabeceras) contenidas en Municipios
 - iv. Los Municipios a su vez estarían subdivididos en área rural y área urbana.
- (b) Para caracterizar las diferentes zonas urbanas se plantea una zonificación en regiones homogéneas en términos de características de la infraestructura, concentración de población, actividad económica, condiciones socioeconómicas, características topográficas e importancia institucional, entre otras.
- (c) Igualmente, cuando es necesario se caracterizan las diferentes zonas rurales de los departamentos para lo cual se plantea una zonificación en regiones homogéneas en términos de características de uso, densidad de construcciones, concentración de población, actividad económica, características topográficas u otras variables útiles para el análisis.

A. 2.3.1 Información general del país

Los indicadores de exposición se desarrollan con el fin de representar la exposición física, económica y humana del país en términos geográficos. Para esto se clasifican en las siguientes categorías principales:

- Construcciones de las principales ciudades del país.
- Infraestructura urbana relevante para las principales ciudades del país.
- Infraestructura relevante a nivel nacional.
- Construcciones a nivel rural.

A. 2.3.2 Base de datos de construcciones

Con el objeto de identificar el valor expuesto de construcciones en el país, se realiza un inventario lo más exhaustivo posible de los centros urbanos correspondientes a cada una de las entidades subnacionales; que en este caso son Departamentos. Para el análisis, el parámetro que ofrece la mayor confiabilidad es la población oficial reportada en cada unidad de división política y administrativa. Los datos de población oficial y una serie de indicadores son usados para estimar el número y tipo de desarrollos localizados en cada uno de los centros urbanos. En consecuencia, la misma información de población es usada para establecer escenarios hipotéticos de ocupación para cada una de las edificaciones de las ciudades analizadas.

Los tipos de edificación se estiman según los sectores económicos presentes y las necesidades básicas de la población como son el servicio de salud y educación, entre otros. La composición (uso) y tamaño (m^2)

de las construcciones se estima utilizando el censo de vivienda desagregado según los siguientes grupos de uso:

- (a) Residencial PB: capacidad económica baja (Res PB)
- (b) Residencial PM: capacidad económica media (Res PM)
- (c) Residencial PA: capacidad económica alta (Res PA)
- (d) Comercial (Com)
- (e) Industrial (Ind)
- (f) Salud privada (SalPri)
- (g) Educación privada (EduPri)
- (h) Salud pública (SalPub)
- (i) Educación pública (EduPub)
- (j) Gubernamentales (Gob)

Para la elaboración de este análisis es necesario estimar el área construida por habitante, los tipos de usos y los niveles de complejidad, el valor económico de cada metro cuadrado de desarrollo por tipo de uso y nivel de complejidad, y el nivel de ocupación por cada tipo de desarrollo en un escenario dado, expresado en términos de metros cuadrados de área construida por tipo de uso y nivel de complejidad.

En algunos casos y cuando no se cuenta con la información del censo de vivienda, la discretización por usos y tamaños de construcción se realiza de acuerdo con los valores típicos de los países de la región que tengan condiciones socioeconómicas y de desarrollo similares.

A. 2.3.3 Base de datos de infraestructura urbana

Con el objeto de identificar el valor expuesto de infraestructura urbana en todo el país y utilizando el inventario de los centros urbanos correspondientes a cada una de las entidades subnacionales, se realiza una estimación de la cobertura de servicios públicos y valoración de las redes (acueducto, alcantarillado, comunicación), puentes, aeropuertos y puertos.

Las coberturas de servicios públicos e infraestructura de transporte, se estima a partir de información incluida en el censo de vivienda bajo las siguientes categorías:

- (a) Puentes urbanos
- (b) Aeropuertos
- (c) Puertos
- (d) Subestaciones de energía más redes anexas
- (e) Subestaciones de comunicaciones más antenas
- (f) Redes de acueducto y alcantarillado
- (g) Tanques y plantas de acueducto y alcantarillado
- (h) Redes de gas

En el caso de no contar con los datos del censo de vivienda la estimación se realiza a partir de valores típicos de los países de la región según el nivel de complejidad de la entidad subnacional, las densidades de población y nivel de cobertura de cada uno de estos servicios.

A. 2.3.4 Base de datos de infraestructura nacional

Con el objeto de cuantificar el valor expuesto de infraestructura nacional se utiliza el inventario de entidades subnacionales junto con los centros poblados y tipos de servicios que disponen. Con base en esto se realiza una estimación de la cobertura de servicios y valoración de los componentes de infraestructura tales como hidroeléctricas, redes de interconexión nacional, líneas de transporte de hidrocarburos y redes viales nacionales.

La infraestructura nacional se clasifica en las siguientes categorías:

- (a) Vías red primaria
- (b) Vías red secundaria
- (c) Hidroeléctricas
- (d) Presas
- (e) Plantas térmicas
- (f) Subestaciones de energía más redes anexas
- (g) Subestaciones de comunicaciones más antenas
- (h) Subestaciones de combustible y gas más redes anexas

La asignación de valores sobre la infraestructura descrita anteriormente se realiza bajo el estimativo de cobertura de la población con los servicios relacionados a cada tipo de infraestructura, la producción energética del país, el número de líneas móviles y fijas y del nivel de hidrocarburos explotados. Los anteriores valores se ubican geográficamente respecto de la densidad de población y los centros de producción.

A. 2.4 Vulnerabilidad física de los elementos expuestos

La vulnerabilidad se puede entender como la susceptibilidad o predisposición de un elemento expuesto a sufrir afectación debido a su fragilidad o a su falta de capacidad para resistir la acción de un evento peligroso. Esta falta de capacidad depende de una serie de características específicas del medio ambiente construido, de la calidad de vida y de los medios de subsistencia de la gente que se encuentra en riesgo. La vulnerabilidad es un conjunto de características que definen las condiciones de inseguridad frente a una amenaza. La generación, acumulación y aumento de estas condiciones son el resultado de un proceso de largo plazo asociado con el desarrollo social, económico y el nivel de gobernanza logrado.

Desde el punto de vista físico, la vulnerabilidad está directamente relacionada con las características estructurales de cada activo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que dicha vulnerabilidad física es usualmente consecuencia de diferentes factores no físicos altamente relacionados con aspectos del desarrollo y que deben ser intervenidos, cuando es posible, con el fin de evitar la exacerbación de la vulnerabilidad y de esta forma el aumento o creación del riesgo.

Por otro lado, la vulnerabilidad es multidimensional; cada elemento, un edificio, una persona, una actividad podrían afectarse de forma diferente por amenazas de distintas intensidades. Mientras más severa sea la amenaza, mayor será el daño que se causa en cada elemento expuesto. Esta relación entre la severidad del evento peligroso y el nivel de daño que puede causar representa la relación de vulnerabilidad (PNUD, 1991).

En el marco de la evaluación probabilista del riesgo catastrófico, la dimensión física de la vulnerabilidad es la que primordialmente está sujeta a la modelación. La relevancia de este componente en el proceso de la evaluación del riesgo es evidente dado que relaciona la intensidad de la amenaza con los daños esperados y por lo tanto con las pérdidas que pueden presentarse. Existen diferentes procedimientos para cuantificar la vulnerabilidad física, pero en el estado del arte de la evaluación probabilista del riesgo, como se usa aquí, se requiere el uso de las funciones o curvas de vulnerabilidad que relacionan la intensidad con el daño que se deriva.

Existen diferentes aspectos relacionados con la vulnerabilidad de un activo expuesto, como sus características estructurales, el código de construcción utilizado, o los niveles de cumplimiento de sus requerimientos. Por esta razón, a cada tipo estructural se le asigna una función de vulnerabilidad específica de acuerdo con la combinación de dicha información y para cada amenaza considerada. Dado que la intensidad es un nivel físico de la severidad de los eventos que caracterizan una amenaza, la intensidad se usa en las funciones de vulnerabilidad para asociarla al daño o pérdida esperada. Ejemplos de ese tipo de intensidades son la aceleración espectral para el caso de los terremotos, la velocidad del viento para ciclones, la profundidad o la velocidad del agua para inundaciones, el espesor de ceniza para erupciones volcánicas y la altura de la ola de inundación para la marea de tormenta y el tsunami.

Muchos factores pueden influenciar el daño y la pérdida de los elementos expuestos, como las diferentes prácticas constructivas, los materiales y, en el caso de terremotos, a los efectos de sitio. La relación de daño para cada intensidad de cada amenaza no corresponde a un valor único, sino que es tratada como una variable aleatoria que considera la distribución de las posibles pérdidas. En otras palabras, es necesario que cada función se defina en términos del valor esperado y la varianza.

En resumen, las funciones de vulnerabilidad caracterizan el nivel de capacidad de cada elemento frente la acción de eventos peligrosos. Estas no solamente proporcionan una representación cuantitativa, objetiva y continua de los niveles de pérdida sino una representación probabilista. Cada función define una distribución de probabilidad de la pérdida relativa (relación de daño medio) para un activo dado como función de una intensidad de la amenaza; que al mismo tiempo se considera es la que mejor se correlaciona con el daño.

Existen diferentes conjuntos de funciones de vulnerabilidad considerando diferentes prácticas constructivas. Grupos de expertos definen las funciones de vulnerabilidad teniendo en cuenta todas las amenazas a considerar.

La Figura A 11 presenta ejemplos de funciones de vulnerabilidad para diferentes amenazas. En estas figuras se puede observar que para niveles de intensidad bajos (cerca a cero) no existe daño, pero el daño aumenta en la medida que la intensidad de la amenaza aumenta. El punto de mayor incertidumbre o la mayor variabilidad de la pérdida está generalmente localizada cerca al 50% de la pérdida, pero esta no es la regla general.

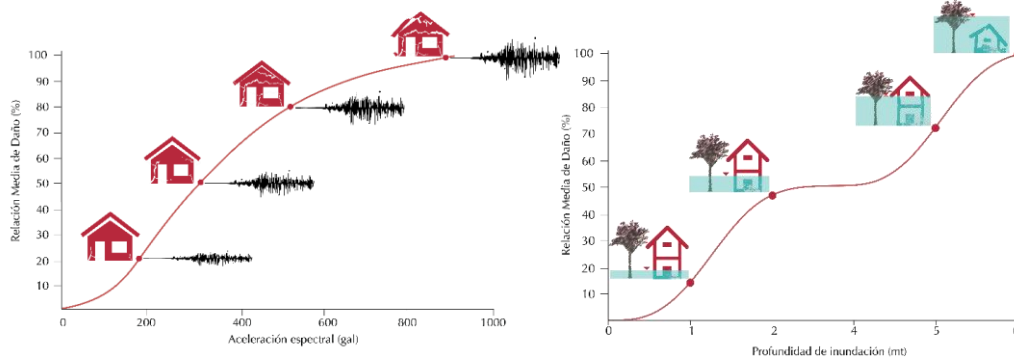


Figura A 11. Ejemplo de funciones de vulnerabilidad

A. 2.4.1 Funciones de vulnerabilidad

La vulnerabilidad de los elementos expuestos se caracteriza mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales caracterizan el comportamiento de una construcción durante la ocurrencia de un fenómeno peligroso. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de la pérdida (p) como función de la intensidad producida durante un evento específico, es decir, condicional a la ocurrencia de un nivel de intensidad (s) en la ubicación del elemento expuesto. La pérdida p generalmente se entiende como la pérdida relativa al valor de reposición del elemento expuesto.

Estas funciones de vulnerabilidad se definen entonces mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno. La pérdida se asume típicamente con distribución Beta, con su función de densidad de probabilidad dada como (Ordaz 2008),

$$f(p|s) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} p^{a-1} (1-p)^{b-1} \quad 34$$

en donde Γ es la función Gamma y los parámetros a y b están dados por,

$$a = \frac{1 - (1 + c^2(p|s)) \cdot E(p|s)}{c^2(p|s)} \quad 35$$

$$b = a \cdot \frac{1 - E(p|s)}{E(p|s)} \quad 36$$

en donde $E(p|s)$ es el valor esperado de la pérdida y $c(p|s)$ es su coeficiente de variación, dada la intensidad de movimiento en el sitio. ($c(p|s) = \sigma(p|s)/E(p|s)$, en donde $\sigma(p|s)$ es la desviación estándar de la pérdida).

Es práctica común definir de manera general la forma funcional de las funciones de vulnerabilidad de la siguiente manera. La curva de valor esperado de la pérdida, $E(p|s)$, puede generalizarse como:

$$E(p|s) = 1 - \exp\left(\ln 0.5 \left(\frac{s}{s_0}\right)^\epsilon\right) \quad 37$$

en donde s_0 corresponde a la intensidad que produce un valor esperado de pérdida del 50%, y ε es un exponente que controla la pendiente de la curva para la intensidad s_0 .

Existe poca información para determinar la varianza (o el coeficiente de variación) de la pérdida. Se sabe, sin embargo, que cuando el valor esperado de la pérdida es nulo la dispersión también lo es. De igual forma, cuando el valor esperado de la pérdida es total, la dispersión es también nula. Para valores intermedios es difícil precisar, con bases empíricas, cuánto vale la varianza de la pérdida.

Para fijar la variación de la varianza de la pérdida se emplea comúnmente la expresión de la distribución de probabilidad asignada en el informe ATC-13 (ATC-13, 1985) cuya varianza tiene la siguiente forma funcional:

$$\sigma^2(p|s) = Q (E(p|s))^2 (1 - E(p|s))^{m-1} \quad 38$$

en donde,

$$Q = \frac{V_{max}}{D_0^2 (1 - D_0)^{m-1}} \quad 39$$

$$m = \frac{2}{D_0} - r + 2 \quad 40$$

V_{max} y D_0 son parámetros que dependen del tipo estructural. V_{max} es la varianza máxima y D_0 es el nivel de daño para el que ocurre esta varianza máxima. La Figura A 12 presenta un ejemplo de una función de vulnerabilidad con sus dos curvas características.

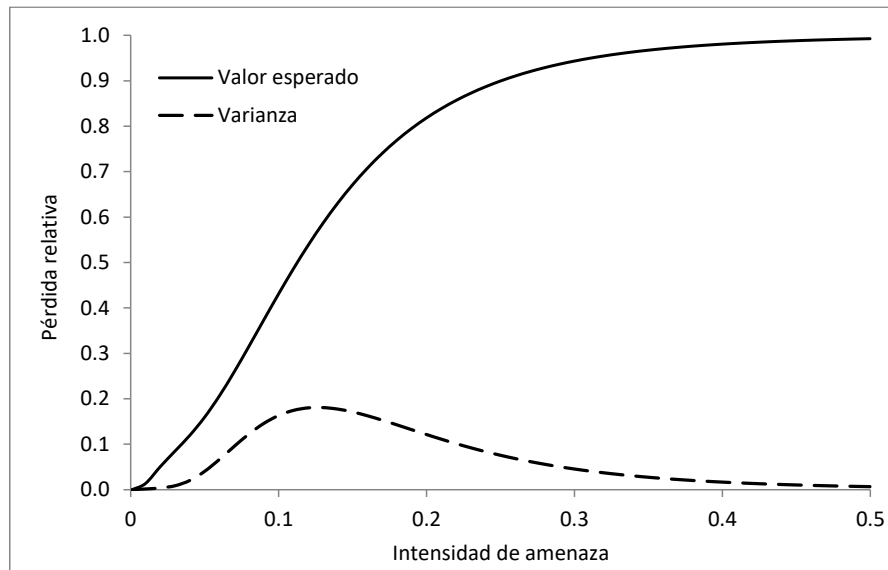


Figura A 12. Ejemplo de una función de vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad determinan entonces la manera como se comportará un elemento expuesto ante una solicitud adversa en su ubicación, en términos de las pérdidas potenciales que puede sufrir su propietario o responsable. Ahora bien, la capacidad de resistir el fenómeno peligroso, tal cual como aparece definida por una función de vulnerabilidad, es generalizada para elementos expuestos de

características similares. Usualmente al conjunto de características para las cuales aplica la misma función de vulnerabilidad se le conoce como tipo constructivo. De manera que, dentro del modelo general de riesgo, la vulnerabilidad de un elemento expuesto no está caracterizando su propia vulnerabilidad sino la del tipo constructivo al cual pertenece.

Esto nos lleva a considerar una característica importante de las funciones de vulnerabilidad en el contexto de la evaluación del riesgo. Es necesario contar con un número suficientemente grande de elementos expuestos asociados al mismo tipo constructivo con el fin de caracterizar correctamente su comportamiento por medio de una función de vulnerabilidad. Esto se debe a que, en términos matemáticos, las pérdidas individuales en cada elemento expuesto son variables aleatorias todas igualmente distribuidas, por lo tanto, siguiendo la ley de los grandes números, el promedio de la agregación de las pérdidas convergerá al promedio de las variables aleatorias individuales conforme aumenta el número de sumandos.

Si bien las funciones de vulnerabilidad representan de manera completa, en términos de probabilidad, la capacidad del elemento expuesto para resistir la intensidad de la amenaza, es usual en ingeniería el uso de funciones de fragilidad, las cuales representan de manera diferente la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Cabe anotar que las funciones de fragilidad pueden derivarse de las de vulnerabilidad, y que implican en ese proceso pérdida de información y resolución.

A. 2.4.2 Funciones de fragilidad

El daño en los elementos expuestos suele representarse comúnmente por medio de funciones de fragilidad. En términos generales, las funciones de fragilidad estipulan cuánto vale la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño como función de cierto parámetro de intensidad.

Supongamos que existen N estados de daño, que llamaremos $ED_i, i = 0 \dots N$. Entonces, las funciones de fragilidad estipulan que la probabilidad (P_i) de que se alcance o exceda el i -ésimo estado de daño (ds_i), dado que se presentó una intensidad s , de la siguiente manera:

$$P_i = Pr(DS \geq ds_i | s) \quad 41$$

en donde DS es una variable aleatoria en el vector de estados de daño $\{ds_0, ds_1, \dots, ds_N\}$. Ahora bien, al ser los estados de daño variables discretas, la probabilidad de encontrarse exactamente en un estado de daño es:

$$Pr(DS = ds_i | s) = Pr(DS \geq ds_{i+1} | s) - Pr(DS \geq ds_i | s) \quad 42$$

Los estados de daño se asocian normalmente a estados de comportamiento del elemento expuesto, por lo tanto están relacionados a niveles cualitativos de daño. Es común entonces encontrar juegos de curvas de fragilidad, una para cada estado de daño, con estados de daño entendidos como, por ejemplo: *leve*, *moderado*, *severo* o *colapso*. Si bien es importante e interesante obtener una medida cualitativa del daño, con fines de la evaluación del riesgo hace falta determinar el estado de daño en forma cuantitativa, es decir, asignarle un valor de pérdida a cada estado de daño.

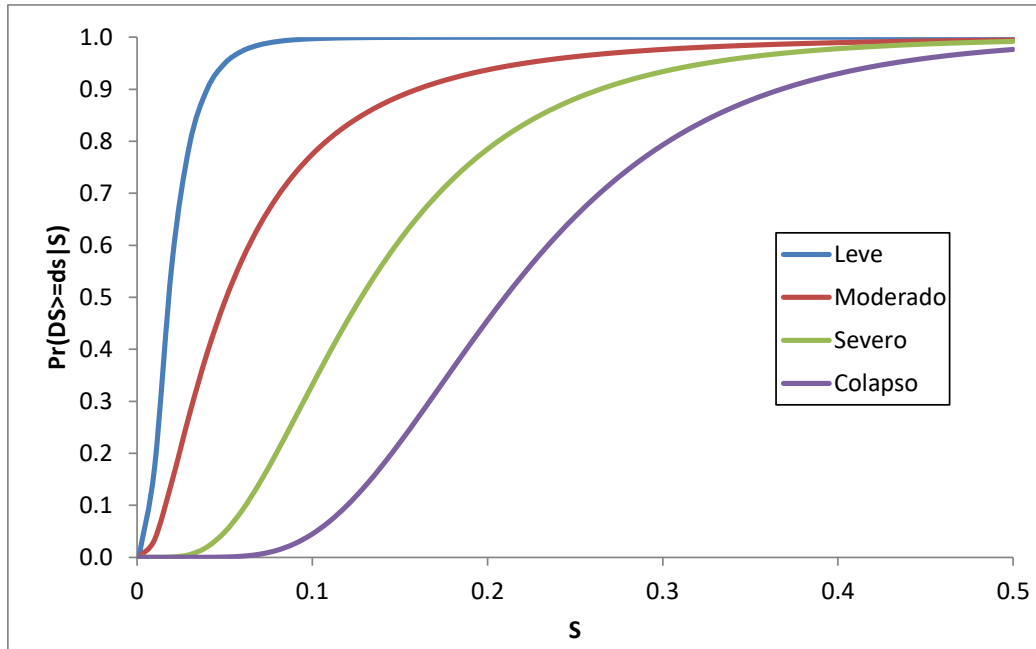


Figura A 13. Ejemplo de funciones de fragilidad

A. 2.4.3 Relación entre funciones de fragilidad y de vulnerabilidad

Se pueden establecer relaciones matemáticas entre las curvas de fragilidad y las funciones de vulnerabilidad. Supongamos que tenemos un número N de estados límite, para cada uno de los cuales se cuenta con una curva de fragilidad y un valor de pérdida asociado (L_i). Entonces, el valor esperado y la varianza de la pérdida, para una intensidad s , pueden obtenerse como:

$$E(p|s) = \sum_{i=0}^N L_i Pr(DS = ds_i|s) \quad 43$$

$$\sigma^2(p|s) = \sum_{i=0}^N (L_i - E(p|s))^2 Pr(DS = ds_i|s) \quad 44$$

De esta manera, se establece una relación general entre funciones de vulnerabilidad y curvas de fragilidad. Esta relación es importante dado que las curvas de fragilidad no contienen toda la información necesaria para hacer estimaciones económicas de las pérdidas.

A. 2.5 Cálculo del riesgo

El riesgo se determina mediante la convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad, en la ubicación ocupada por los elementos expuestos y para la totalidad de los mismos. Como se ha mencionado anteriormente, en el cálculo probabilista de las pérdidas la amenaza y la vulnerabilidad están representadas también de manera probabilista. La amenaza tiene una representación probabilista tanto temporal como espacial. La ocurrencia en el tiempo de los escenarios de amenaza se modela como un

proceso de Poisson, lo que conlleva a modelar mediante una distribución de probabilidad exponencial el tiempo que transcurre entre los escenarios.

Las incertidumbres asociadas a la amenaza y a la vulnerabilidad son entonces definidas en su propia naturaleza; temporal y espacial para la amenaza y dependiente de la intensidad para la vulnerabilidad. De esta manera, el principal resultado del modelo es una distribución de probabilidad específica de la pérdida para cada escenario de riesgo. La función de densidad de probabilidad de la pérdida en el elemento j , condicional a la ocurrencia del escenario i , $f(p_j|E_i)$, se calcula como,

$$f(p_j|E_i) = \int_0^{\infty} f(p_j|s)f(s|E_i)ds \quad 45$$

en donde el primer término de la integral tiene que ver con la vulnerabilidad ($f(p_j|s)$, la densidad de probabilidad de la pérdida dada una intensidad s) y la segunda parte tiene que ver con la amenaza ($f(s|E_i)$, la densidad de probabilidad de la intensidad, dada la ocurrencia de un escenario).

La pérdida total del escenario i corresponde a la suma de todas las pérdidas individuales (p_j) de los elementos expuestos. Dado que los sumandos son variables aleatorias, debe usarse la aritmética correcta para determinar la pérdida del escenario i . La suma se hace sobre los momentos de probabilidad de las variables p_j como se indica a continuación.

$$E(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} E(p_j) \quad 46$$

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} cov(p_k, p_j) \quad 47$$

en donde $E(p|E_i)$ es el valor esperado de la pérdida del escenario i , $\sigma^2(p|E_i)$ es su varianza, NE es el número total de elementos expuestos, $E(p_j)$ es el valor esperado de la pérdida en el elemento j , $\sigma^2(p_j)$ es su varianza, y $cov(p_k, p_j)$ es la covarianza de la pérdida de dos elementos expuestos diferentes. La ecuación 47 puede escribirse entonces como,

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} \rho_{k,j} \sigma(p_k) \sigma(p_j) \quad 48$$

De esta manera queda completamente determinada, en términos de probabilidad, la pérdida asociada a la ocurrencia del escenario i .

El riesgo es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* la cual especifica las frecuencias de ocurrencia de eventos en que se exceda un valor específico de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como *tasa de excedencia*, y se calcula de la siguiente manera,

$$v(p) = \sum_{i=1}^N Pr(P > p|E_i) \cdot F_A(E_i) \quad 49$$

en donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , N es el número total de escenarios de amenaza, $F_A(E_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario i , y $\Pr(P > p | E_i)$ es la probabilidad de que p sea excedida dado que ocurrió el escenario i . La suma cubre todos los escenarios de amenaza que pueden generar pérdidas. El inverso de $\mathbb{V}(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como Tr . La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar, en términos de probabilidad, el proceso de ocurrencia de las pérdidas asociadas a terremotos.

Es importante hacer notar que la curva de excedencia de pérdidas no tiene incertidumbre. Es común asociar los resultados de un modelo probabilista de riesgo a un nivel de confianza o de variabilidad de los mismos. Pues bien, las tasas de excedencia calculadas en un modelo probabilista de riesgo consideran directamente la incertidumbre en las pérdidas, por lo cual dichas tasas de excedencia no pueden tener una incertidumbre o variabilidad propia. Esto debido a que, en términos matemáticos, son una medida de probabilidad calculada para una cantidad de pérdida específica. En el contexto de la modelación del riesgo, la pérdida es la variable aleatoria, no las tasas anuales de excedencia.

A. 2.5.1 Métricas 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 y la gestión del riesgo. Estas métricas pretenden proporcionar una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos números, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa.

La pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. En un esquema simple de seguro, la PAE sería la prima pura anual justa. Se calcula como la integral de la curva de excedencia de pérdidas,

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp \quad 50$$

Desde el conjunto de evento de pérdida, puede determinarse la PAE como,

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P | E_i) F_A(E_i) \quad 51$$

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los escenarios de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Se considera como el indicador más robusto de riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de generación de pérdidas en un solo número, sino por ser insensible a la incertidumbre, debido a que determina la esperanza matemática de las pérdidas en una base anual, y no su incertidumbre.

La pérdida máxima probable (PML)

Se denota PML por sus siglas en inglés (Probable Maximum Loss). Corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno grande. El periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia de pérdidas,

$$Tr(p) = \frac{1}{v(p)} \quad 52$$

En realidad la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Mayores detalles sobre el significado y aplicación de la PML pueden encontrarse en Marulanda (2013).

La probabilidad de quiebra (PQ)

Assumiendo que el proceso de ocurrencia de las pérdidas en el tiempo sigue un proceso de Poisson, es posible determinar la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de pérdida dado, en un periodo de exposición particular,

$$Pr(P > p)_T = 1 - e^{-v(p)T} \quad 53$$

en donde $Pr(P > p)_T$ es la probabilidad de excedencia de la pérdida p , en el lapso de tiempo T (dado en años). Si la pérdida p corresponde a la PML, se obtiene lo que se conoce como la probabilidad de quiebra (P_Q), la cual no es más que la probabilidad de exceder la PML en un lapso T .

$$P_Q = 1 - e^{-T/Tr(PML)} \quad 54$$

Otras métricas del riesgo

La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar de manera rigurosa la ocurrencia de pérdidas. Es posible determinar directamente de $v(p)$ otras métricas del riesgo que pueden ser relevantes para la toma de decisiones. Aquí se presentan algunos ejemplos.

La función de densidad de probabilidad de la pérdida durante el próximo evento, o un evento tomado al azar, se obtiene como,

$$f(p) = -\frac{1}{v(0)} \frac{dv(p)}{dp} \quad 55$$

La probabilidad de exceder un nivel de pérdida particular tras la ocurrencia del próximo evento, o un evento tomado al azar, se puede calcular como,

$$Pr(P > p) = \frac{v(p)}{v(0)} \quad 56$$

La función de densidad de probabilidad del tiempo hasta la ocurrencia del próximo evento (t) es exponencial y se define como,

$$f(t) = v(p)e^{-v(p)t} \quad 57$$

El número de eventos (N) que ocurrirán en un lapso de tiempo T , que igualan o exceden la pérdida p , se distribuye Poisson, por lo cual la probabilidad que ese número sea igual a n es,

$$Pr(N = n) = \frac{(v(p)T)^n e^{-v(p)T}}{n!} \quad 58$$

A.3 MODELACIÓN DEL RIESGO EN CULTIVOS Y COBERTURA VEGETAL

A.3.1 Modelación de la amenaza por sequía

En términos generales, para el caso de la sequía, a partir de las series históricas y sintéticas de precipitación y temperatura se calculan los indicadores de sequía (SPI, SPEI, RDI y otros incluidos en la literatura especializada) para todas las estaciones y a diferentes escalas de tiempo en pasos mensuales. Una vez se obtiene la serie temporal del indicador seleccionado en cada estación, se identifican los eventos de sequía. Los eventos de sequía ocurren cuando el indicador toma un valor por debajo de un umbral crítico.

A.3.1.1 Evapotranspiración de referencia

El cálculo de los indicadores de sequía propuestos requiere del cálculo previo de la evapotranspiración de referencia, para evaluar las condiciones atmosféricas que definen si se presenta un exceso de agua en la atmósfera (baja evapotranspiración) o un déficit (alta evapotranspiración y poca lluvia). La evapotranspiración de referencia se estima siguiendo el Manual *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements* (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998), que es considerado el método estándar y es el más recomendado.

La evapotranspiración de referencia es el potencial de evaporación de la atmósfera; se calcula en una superficie vegetal uniforme sin restricciones hídricas. La superficie de referencia es un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998); es independiente del tipo de cultivo, de su desarrollo o de su manejo. Al no tener restricciones en el contenido de agua, las características del suelo tampoco influyen en su resultado. Estas condiciones permiten comparar los resultados en diferentes localizaciones o estaciones para evaluar las condiciones evaporativas de la atmósfera ya que el ETo únicamente varía según las condiciones climáticas presentes.

Es importante señalar que la evapotranspiración de referencia (ET_0) es diferente a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$). La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) considera características particulares según el tipo de cultivo que se esté evaluando (resistencia del cultivo, albedo, anatomía de las hojas, características de los estomas, propiedades aerodinámicas, entre otros). Por otro lado, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$) considera cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo diferentes a condiciones óptimas de suelo y agua, presencia de enfermedades o fertilización que implican cambios en el rendimiento de la cosecha.

El método de Penman-Monteith (Ver Ecuación 59) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia permite cuantificar los procesos de evaporación (vaporización de agua desde una superficie: suelo, vegetación húmeda) y transpiración (vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales), que ocurren simultáneamente. Los parámetros necesarios para el cálculo son el brillo solar, la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, el flujo de vapor y la resistencia aerodinámica.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

59

en donde R_n es la radiación neta, G es el flujo de calor del suelo, γ es la constante psicrométrica, T es la temperatura promedio diaria, u_2 es la velocidad del viento (a 2m de la superficie), $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor y Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor. La aplicación de la metodología de Penman-Monteith implica la recopilación de información meteorológica que puede no estar disponible en todos los casos. Los parámetros meteorológicos faltantes se establecen a partir de criterio de expertos, información meteorológica general de la región y las reglas de cálculo recomendadas por la FAO (Raes, 2009).

5.1.1 Indicadores

Los indicadores son ampliamente utilizados para identificar las sequías, al detectar condiciones de precipitación por debajo de la precipitación media y condiciones simultáneas de temperatura por encima de las temperaturas promedio. Los indicadores pueden definir la *duración* y la *severidad* de los eventos de sequía. Las fechas de inicio y terminación establecen el período de duración en el que un indicador de sequía está continuamente por debajo de un nivel crítico predefinido (a menor valor del indicador, más intensa la sequía). La severidad de una sequía denota la deficiencia acumulativa de un parámetro de sequía por debajo de un umbral entre las fechas de iniciación y terminación. La relación entre severidad y duración es la *intensidad* de la sequía (Mishra & Singh, 2010). Estos conceptos se muestran de forma esquemática en la Figura A 14. Cada evento de sequía está compuesto por la siguiente información:

- *Severidad*: corresponde al área bajo la curva del evento, es decir, el valor acumulado del indicador durante el evento.
- *Duración*: es el tiempo que dura el evento.
- *Intensidad*: se calcula como la severidad dividida por la duración. Es una medida unitaria de la magnitud del evento.

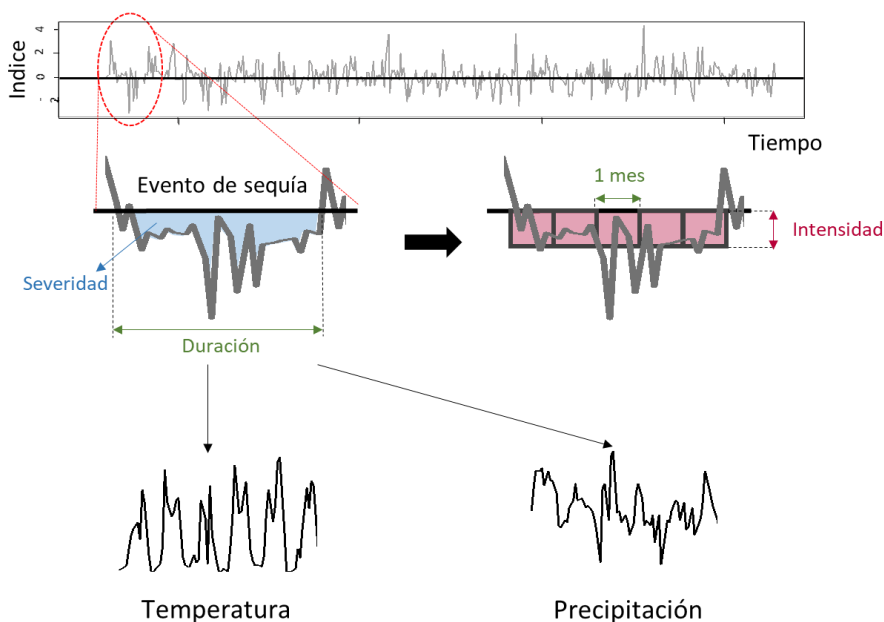


Figura A 14. Esquema de indicadores de sequía y conceptos de severidad, duración e intensidad del evento.

Indicadores de sequía a utilizar

Dependiendo del tipo de sequía a evaluar, se pueden incluir diferentes parámetros en el cálculo de los índices. Las sequías meteorológicas están condicionadas a la deficiencia de precipitación en términos de cantidad, intensidad y tiempo de precipitación, y al aumento de la evaporación y transpiración a causa de altas temperaturas, vientos fuertes, baja humedad relativa, intenso sol y menor nubosidad. Las sequías agrícolas están condicionadas por la deficiencia de agua en el suelo en términos de estrés hídrico para las plantas, y la reducción en la biomasa y el rendimiento. Las sequías hidrológicas están determinadas por la reducción en caudales de ríos y quebradas, almacenamiento reducido de los embalses y reducción de los humedales. Esta clasificación de sequías, como sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica fue definida por primera vez por Wilhite y Glantz (1985).

Según Jayanthi (2014), los indicadores de sequía agrícola deben integrar las variables pluviométricas y de temperatura, junto con la evapotranspiración para el monitoreo efectivo de los cultivos de secano, pastos y pastizales. Banimahd y Khalili (2013) compararon los índices de sequía agrícola más utilizados, como el Palmer Drought Severity Index - PDSI (Palmer, 1965), el Standardized Precipitation Index -SPI (McKee, Doesken, & Kleist, 1993), el Effective Drought Index -EDI (Byun & Wilhite, 1999), el Reconnaissance Drought Index - RDI (Tsakiris, Pangalou, & Vangelis, 2007) y el Standardized Precipitation Evapotranspiration Index -SPEI (Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010). Sus resultados mostraron que la SPEI y la RDI detectaron de manera más apropiada las severidades de sequía máximas, enfatizando el importante papel de la evapotranspiración. Estos resultados son consistentes con el trabajo de Tsakiris et al. (2007), en donde se demuestra que la sola precipitación no correlaciona satisfactoriamente con la producción de rendimiento en cultivos, sino que se requiere la incorporación de la evapotranspiración de referencia (que depende directamente de la temperatura), para describir apropiadamente la ocurrencia de las sequías.

Este estudio no incluye el uso de indicadores que tienen en cuenta parámetros propios del suelo o del cultivo para definir un evento de sequía, como el Indicador de Palmer. Esto se debe a que en el módulo de amenaza del modelo probabilista de sequía se evalúan las condiciones de tiempo (precipitación y temperatura) únicamente, para clasificar los eventos de sequía independientes de sus posibles efectos en elementos socioeconómicos. De esta forma se puede evaluar la amenaza independiente de la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Es en el módulo de vulnerabilidad que se incluyen los parámetros propios del suelo y cultivos existentes en cada unidad de tierra cultivada dentro del área de análisis.

Umbral de sequía

Los indicadores estandarizados de sequía, como el RDI y el SPEI, pueden compararse entre sí en dimensiones espaciales y temporales. La severidad de la sequía caracterizada aplicando estos indicadores, se puede clasificar de acuerdo con lo presentado en la Tabla A 1.

Tabla A 1. Clasificación de sequías de acuerdo con el valor de indicadores estandarizados.

Clase de sequía	Valor del Indicador
No ocurre sequía	Mayor a 0
Leve	Entre -1 y 0
Moderada	Entre -1.5 y -1

Severa	Menor a -1.5
--------	--------------

Nótese que, en todos los casos, los indicadores reflejan condiciones de sequía cuando sus valores son negativos, siendo las sequías más severas las asociadas a valores más negativos. Es conveniente evaluar los escenarios de sequía con más de un indicador, ya que ninguno de ellos puede aplicarse universalmente debido a la complejidad de esta amenaza y a las condiciones particulares de las diversas zonas climáticas (Tsakiris et al., 2007). Los indicadores se calculan para cada serie (histórica o simulada) en cada uno de los puntos de la malla de análisis. La Figura A 15 muestra un ejemplo del cálculo del indicador de sequía para tres años de la serie histórica e indica la línea del umbral para definir sequías desde los eventos leves (umbral=-1). En este ejemplo, se presenta una sequía de 4 meses entre finales de 1981 y principios de 1982.

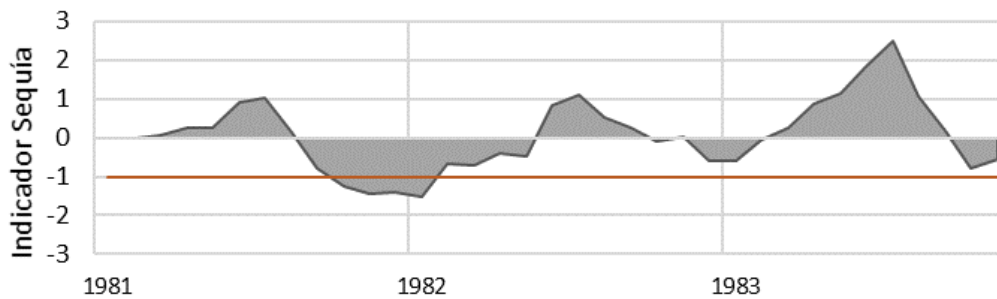


Figura A 15. Series de indicador de sequía para 3 meses con umbral=-1.

Definición de eventos regionales de sequía

El siguiente paso es identificar los eventos de sequía que ocurren simultáneamente en varias estaciones de la región de estudio. Para cada mes, se identifican las estaciones con un valor de indicador por debajo del umbral definido para la evaluación (por ejemplo, -1, para detectar sequías moderadas y severas). Si el número total de estaciones con valores por debajo del umbral es mayor que un cierto porcentaje (por ejemplo, 50%), entonces se identifica una sequía regional. Con cálculos consecutivos para todos los años de simulación, se pueden detectar múltiples sequías regionales, con su valor asociado de duración, severidad e intensidad en cada estación. Cada una de las sequías regionales es un escenario de sequía individual, con una frecuencia anual de ocurrencia igual a $1/N$, en donde N es el número total de años de simulación. La Figura A 16 muestra esquemáticamente cómo se identifican las sequías regionales, de acuerdo con los criterios de selección definidos por un valor umbral de indicador y un número mínimo de estaciones que satisfacen dicha condición. Este procedimiento puede aplicarse para toda la región de estudio, o para subregiones definidas por otros criterios, como zonas climáticas, zonas productivas, entidades territoriales, etcétera.

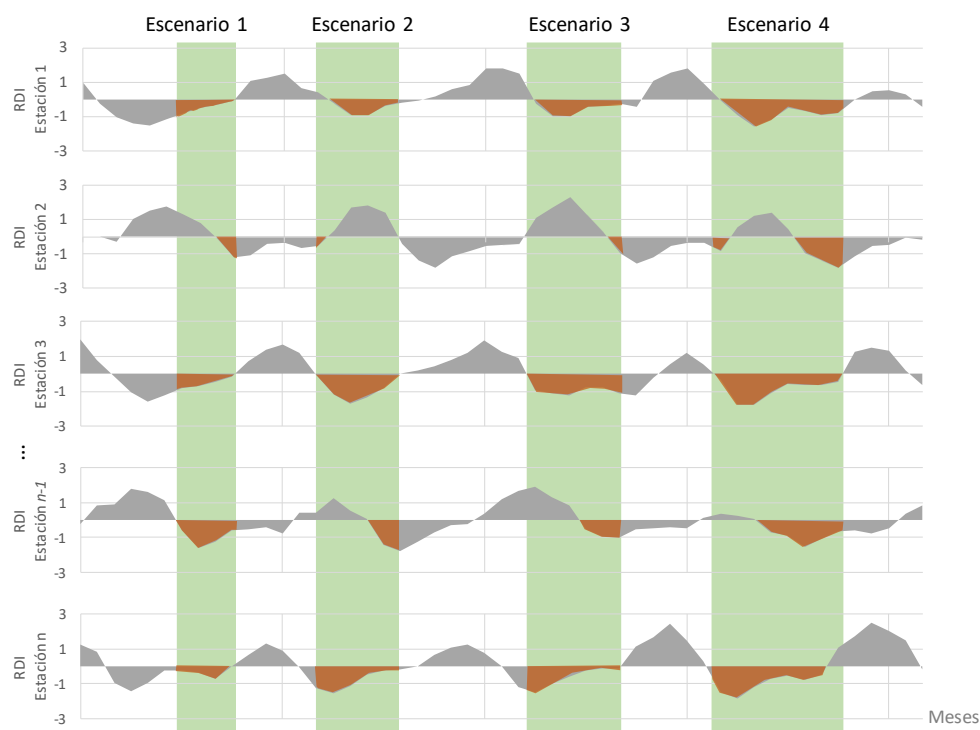


Figura A 16. Identificación de sequías regionales sobre las series de tiempo de todas las estaciones del área de estudio.

A. 3.2 Modelo de exposición de cultivos

En la metodología propuesta, los elementos expuestos para la actividad agrícola son los cultivos. Para cada elemento expuesto, o unidad de tierra cultivada en la región de análisis, es necesario conocer las características del cultivo que típicamente se siembra en esa ubicación como se muestra en la Tabla A 2. La información que se debe conocer incluye el tipo de cultivo, su estacionalidad y área sembrada. También se debe contar con información de rendimientos típicos (toneladas producidas por unidad de área). En la medida de lo posible, esta información debe ser obtenida de fuentes oficiales.

Tabla A 2. Insumos asociados a la exposición para la evaluación de riesgo por sequía.

Insumo	Descripción	Fuente
Mapas de ubicación de cultivos	Localización y área sembrada para todos los cultivos sobre las unidades de tierra cultivada, definidas para el área de estudio.	A partir de mapas oficiales de coberturas o uso de suelo, encuestas y censos agrícolas.
Mapas de tipo de suelo	Mapa de textura principal del suelo, grupo hidrológico y número de curva.	A partir de mapas oficiales de clasificación taxonómica, cobertura y uso del suelo.

Rendimiento de cultivos	Valores de la relación entre la producción anual y el total de área sembrada, a escala nacional, para todos los cultivos.	A partir de encuestas y censos agrícolas.
Avalúos	Valoración económica del cultivo definido como el valor unitario de producción, por tipo de cultivo.	A partir de encuestas y censos agrícolas.
Información asociada al sector pecuario	Contenido de materia seca en la producción de pastura, consumo voluntario, porcentaje de utilización, carga animal por hectárea, avalúo de rendimientos de productos pecuarios (lácteos, carne y lana).	A partir de información de instituciones oficiales.

A. 3.2.1 Información de estacionalidad de cultivos

Un parámetro de entrada específico para cada región de análisis y tipo de planta es el tiempo en el cual se completa el ciclo de desarrollo del cultivo. Dentro de la modelación de la vulnerabilidad de las plantas, es importante definir, en términos de días calendario, las diferentes etapas de crecimiento del cultivo, desde su siembra hasta la madurez, como se muestra en la Figura A 17. Además, se debe contar con información sobre la fecha típica de siembra y cosecha de cada producto. Estos datos van a ser luego utilizados en el módulo de vulnerabilidad, que relaciona el desarrollo día a día del cultivo con las series diarias de precipitación y temperatura, para evaluar posibles reducciones en el rendimiento de la cosecha debido a condiciones de déficit de agua.

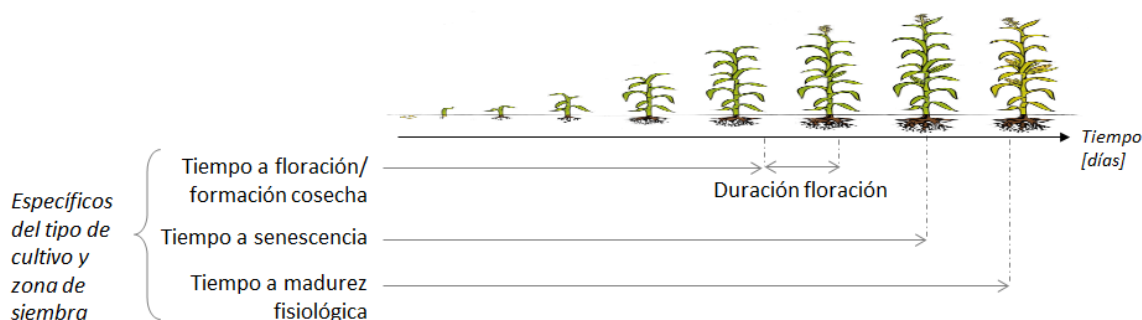


Figura A 17. Esquema de etapas de crecimiento de una planta.

A. 3.2.2 Rendimientos y avalúo de cultivos

Dentro de la información que se debe conocer en el modelo de exposición se incluye el rendimiento típico de cada cultivo, que dentro del modelo se define como la producción total en toneladas de un cultivo por hectárea de terreno sembrada. Estos datos son utilizados en el módulo de vulnerabilidad, que relaciona el desarrollo día a día del cultivo con las series diarias de precipitación y temperatura, para evaluar posibles reducciones en el rendimiento de la cosecha debido a condiciones de déficit de agua.

A. 3.2.3 Suelo: Características agronómicas

La información de entrada al modelo de vulnerabilidad de cultivos incluye las variables necesarias para parametrizar el suelo, que sirve de soporte para el crecimiento de las plantas. El modelo que se aplica en este estudio toma un volumen de referencia del suelo, en la que se ubica la zona radicular, y estima su balance hídrico para determinar la cantidad de agua que tiene disponible la planta. Con esto se evalúan las interacciones suelo-planta-atmósfera que permiten modelar el crecimiento de cultivos y su rendimiento. La información requerida incluye el tipo de suelo, textura, perfil en profundidad y nivel freático. Para el cálculo de la escorrentía se calcula el número de curva a partir de la información de uso y tipo de suelo. Este procedimiento se muestra de forma esquemática en la Figura A 18, en la que también se indica el tipo de información de entrada y los resultados.

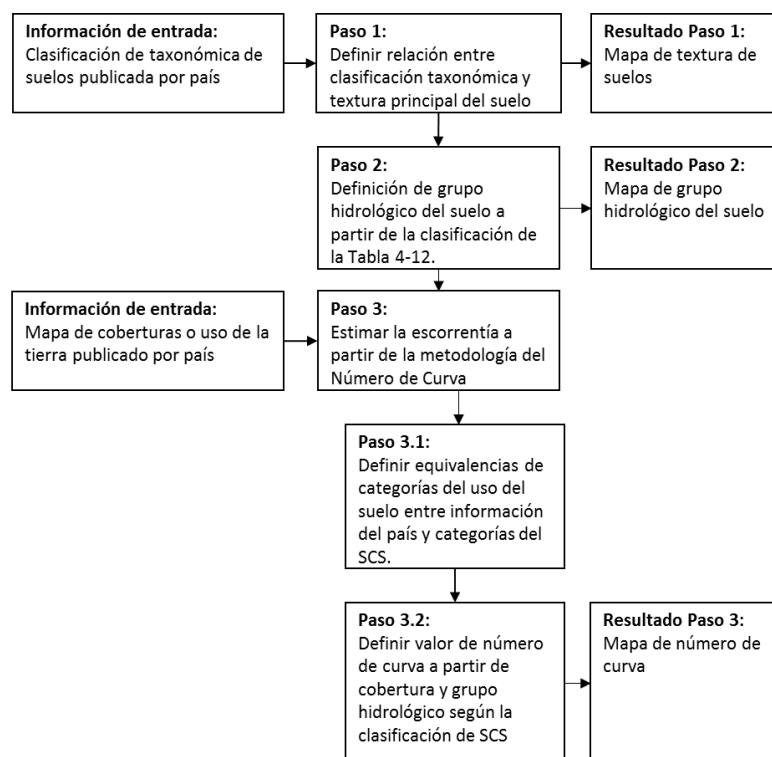


Figura A 18. Esquema metodología aplicada para determinar características del suelo necesarias en el módulo de vulnerabilidad para evaluar riesgo por sequía en el sector agrícola.

Almacenamiento y disponibilidad de agua en el suelo

Los parámetros necesarios para estimar la capacidad de suelo de almacenar y retener agua se muestran en la Figura A 19. Dependiendo del nivel del agua en el suelo se define la disponibilidad del agua para la planta. Es así como después de una lluvia, el agua puede quedar en exceso de la cual una fracción se convierte en escorrentía y la otra fracción se infiltra por fuerzas gravitacionales. Esta agua infiltrada pasa de un nivel de saturación (en el cual no hay contenido de aire en el suelo) al nivel que tiene el suelo de retener el agua o capacidad de campo (Field capacity en inglés). A medida que el agua se infiltra en el suelo, las plantas pierden la posibilidad de usar el agua, hasta llegar al punto de marchitamiento definitivo, en el que la planta no cuenta con agua disponible y no se puede recuperar. El rango de agua disponible

para la planta se ubica entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento, en el que el suelo es capaz de retener el agua. Entonces el modelo de vulnerabilidad evalúa si el contenido de agua en el suelo se ubica dentro del rango de agua disponible que tiene la planta y ajusta el desarrollo del cultivo según las condiciones de estrés hídrico que sufra.

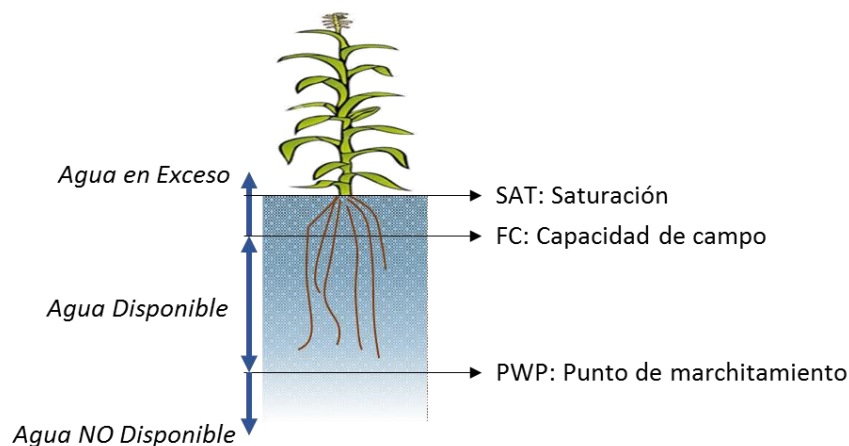


Figura A 19. Esquema de la disponibilidad del agua en el suelo

La capacidad de retener el agua en el suelo depende en gran medida de su textura. Como el suelo es un medio poroso, dependiendo del tamaño de los espacios entre partículas, el suelo está en capacidad de almacenar más o menos agua. El tamaño de las partículas del suelo, o textura se define según su contenido de arena, limo y arcilla. Es así como suelos arenosos tienen poca capacidad de retener agua por su estructura de partículas gruesas con macroporos³. De otro lado suelos de partículas finas retienen el agua en microporos y tienen una mayor capacidad de campo (Sheppard & Hoyle, 2018). Esta relación se puede ver de forma esquemática en la Figura A 20, en la que se presenta el porcentaje de volumen de agua para la capacidad de campo según la textura de suelo, desde arenas con partículas gruesas hasta arcilla de partículas finas. En la figura se puede ver como la capacidad campo o de retener agua en el suelo aumenta a medida que las partículas de suelo son más finas. Sin embargo, para que el agua sea disponible para las plantas, el contenido de agua en el suelo debe mantenerse sobre el punto de marchitamiento. Como se ve en la figura, el punto de marchitamiento también aumenta en la medida que la textura del suelo es más fina. Esto se debe a que, aunque hay mayor volumen de agua retenida del suelo fino, la fuerza que se ejerce para mantener el agua en los microporos es muy alta y las plantas no tienen capacidad de succionarla. Entonces, para propósitos agrícolas es preferible cultivar en suelos de textura media, tipo francos o franco limosos, que tienen una alta disponibilidad de agua para las plantas.

³ Se entiende como poro el espacio entre partículas de suelo. En suelos de partículas gruesas como las arenas, los poros son de mayor tamaño que en suelos de partículas finas como las arcillas.

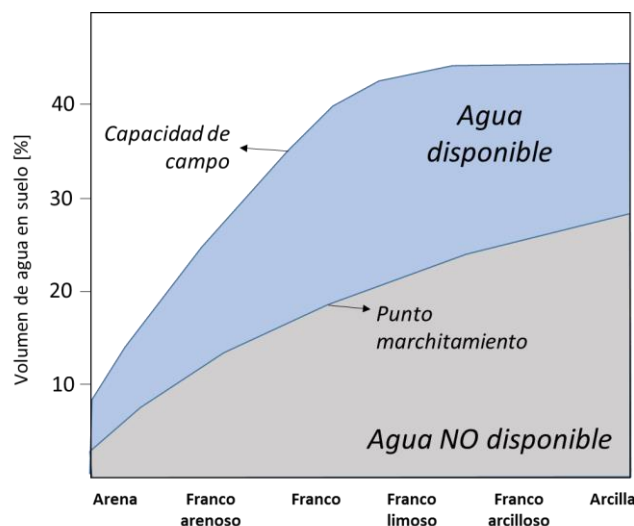


Figura A 20. Esquema de retención de agua según tipo de suelo (Sheppard & Hoyle, 2018)

Los valores de contenido volumétrico de agua en suelo para condiciones de saturación, capacidad de campo y punto de marchitamiento se determinan a partir de evaluaciones locales. El modelo AquaCrop suministra valores por defecto para estos parámetros, en caso de no contar con información del área de interés (Dirk Raes, Steduto, Hsiao, & Fereres, 2011). Estos valores se utilizan en este estudio y se presentan en la Tabla A 3.

Tabla A 3. Valores de parámetros de contenido volumétrico de agua por defecto en el modelo AquaCrop

Tipo suelo	SAT [%vol]	FC [%vol]	PWP [%vol]
arena	36	13	6
arenoso franco	38	16	8
franco arenoso	41	22	10
franco	46	31	15
franco limoso	46	33	13
limoso	43	33	9
franco arcillo arenoso	47	32	20
franco arcilloso	50	39	23
franco arcillo limoso	52	44	23
arcillo arenoso	50	39	27
arcillo limoso	54	50	32
arcilla	55	54	39
impermeable	0.5	0.3	0.1

La determinación de la textura del suelo se hace a partir de las fracciones de arcilla, limo y arenas que lo compongan. Esta clasificación por tipo que se muestra en la tabla anterior se obtiene a partir del triángulo de clase textural del suelo, publicado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA por sus siglas en inglés. Este esquema se presenta en la Figura A 21.

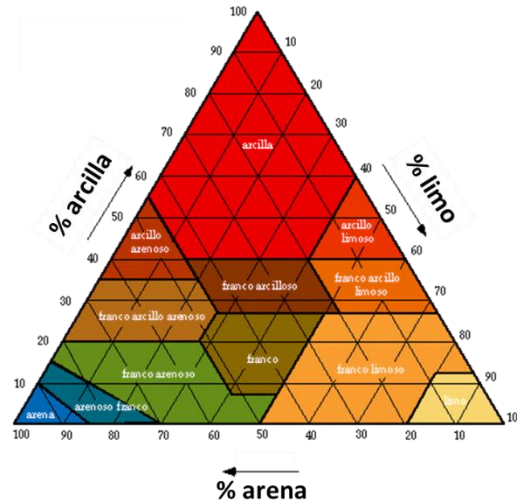


Figura A 21. Triángulo de clases texturales básicas de suelos según el tamaño de partículas. Elaborado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

A. 3.3 Vulnerabilidad de cultivos

La modelación de la vulnerabilidad se realiza siguiendo la metodología de cálculo del rendimiento definida por la FAO. La vulnerabilidad se define en términos de la pérdida de rendimiento que sufre el cultivo durante un período prolongado de escasez de agua. Dado que se aplica un modelo agronómico de respuesta de cultivos, no se emplearán curvas o funciones de vulnerabilidad. El modelo de respuesta de cultivos al consumo de agua de FAO ha sido ampliamente utilizado en el desarrollo de los programas de riego y en general en la administración de cultivos. La metodología propuesta por este grupo consultor es la única actualmente que utiliza un modelo de esta complejidad en la evaluación probabilista del riesgo de sequía.

A. 3.3.1 Rendimiento como función del consumo de agua

Con el objetivo de mejorar la eficiencia y la productividad del uso del agua en cultivos, la división de Tierra y Agua de la FAO ha desarrollado una línea de investigación sobre la gestión eficaz del agua en la agricultura de secano e irrigada. El objetivo general es aumentar los ingresos de los agricultores mejorando el rendimiento agrícola, respondiendo a la creciente demanda de alimentos y a los limitados recursos hídricos. El enfoque inicial para modelar la relación entre el rendimiento de los cultivos y el consumo de agua se encuentra publicado en el documento de FAO: *Irrigation and Drainage paper No. 33 Yield response to water* (Doorenbos, Kassam, Bentvelsen, Branscheid, & Plusje, 1979). Este es un enfoque simplificado, en donde la pérdida relativa de rendimiento en cualquier cultivo $\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right)$, se relaciona proporcionalmente a la reducción relativa en el consumo de agua en términos de la evapotranspiración $\left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right)$, por medio de un coeficiente de proporcionalidad (K_y), que es específico para cada tipo de cultivo y fase fenológica.

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right)$$

60

en donde Y es el rendimiento real, Y_x es el máximo rendimiento, el cual depende de la genética del cultivo y las condiciones climáticas, y se calcula asumiendo que los factores agronómicos (agua, fertilizantes, plagas y enfermedades) no son limitantes. ET es la evapotranspiración real, calculada para condiciones específicas de precipitación y temperatura, y ET_x es la máxima evapotranspiración, calculada asumiendo que los requerimientos de agua del cultivo están totalmente satisfechos.

Este es un enfoque apropiado para propósitos de planificación general y evaluación rápida (Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012b) y puede aplicarse a todos los cultivos agrícolas (herbáceos, árboles y vides), usando el valor apropiado de K_y . Este coeficiente, que es específico de los cultivos y varía a lo largo de la temporada de crecimiento, incluye los procesos biológicos, físicos y químicos involucrados en la producción de biomasa. La Figura A 22 muestra la función lineal de producción de agua para el maíz. En términos generales, si $K_y > 1$, se trata de un cultivo muy sensible al estrés hídrico, mientras que si $K_y < 1$, se trata de un cultivo más tolerante al déficit de agua. Adicionalmente, los cultivos en estado vegetativo o de maduración son más resistentes que los cultivos en etapas de floración o de formación de rendimiento.

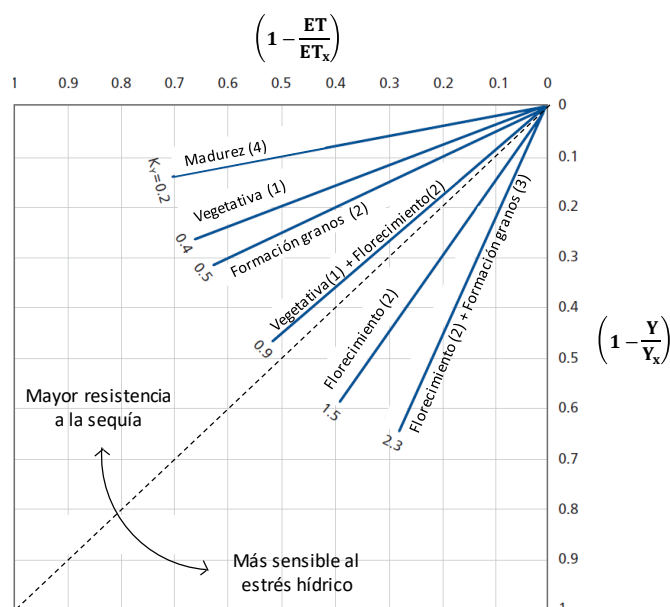


Figura A 22. Funciones de agua-rendimiento para el maíz (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 8)

Utilizando la Ecuación 60 como punto de partida, la FAO desarrolló un modelo avanzado de respuesta de rendimiento como función del consumo de agua, el cual se encuentra publicado en el documento *Irrigation and Drainage Paper No. 66 Crop yield response to water* (Steduto et al., 2012b). Este nuevo enfoque permite calcular la biomasa de los cultivos con base en la cantidad de agua transpirada y el rendimiento del cultivo como la proporción de biomasa que entra en las partes cosechables de las plantas. Algunas de las características del modelo de la FAO, que son interesantes para la evaluación del riesgo de sequía, son:

- El modelo considera la relación proporcional entre el estrés hídrico y la reducción de la producción de biomasa. En consecuencia, la reducción de la producción de biomasa está relacionada con la reducción de los rendimientos y las pérdidas económicas asociadas con el peligro de sequía.

- El modelo de la FAO incluye el efecto de las anomalías de la humedad del suelo y la respuesta fisiológica de los cultivos al déficit hídrico.
- El modelo calcula la producción de biomasa en una escala de tiempo diaria, para representar mejor la dinámica de la respuesta del cultivo al agua en diferentes etapas de crecimiento. Esta característica es conveniente porque los parámetros meteorológicos, utilizados para calcular el riesgo de sequía, también tienen una escala de tiempo diaria.
- Como la producción de biomasa se calcula a partir de las series de precipitación y temperatura, el modelo puede introducir el efecto de los escenarios de cambio climático. Se incluye también la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.
- La FAO ha establecido parámetros estándar para los cultivos, con sus correspondientes procedimientos de calibración y validación.
- Es posible incorporar modificadores asociados a prácticas agrícolas (por ejemplo, riego o fertilización), en función de la información disponible.

El modelo de respuesta de cultivos tiene cuatro componentes principales: el clima (en términos de temperatura, precipitación, demanda por evaporación y concentración de dióxido de carbono), los cultivos (procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento), el suelo (balance de agua y sal) y el manejo y administración (prácticas agrícolas). Cada uno de los componentes se explica brevemente a continuación, según lo contenido en Steduto et al. (Steduto et al., 2012b).

A. 3.3.2 Clima

La temperatura influye en el desarrollo de los cultivos y la precipitación es determinante para el balance hídrico del suelo en la zona radicular y el estrés hídrico. Por lo tanto, las principales variables climáticas para el modelo son las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire, las precipitaciones diarias totales y la demanda evaporativa de la atmósfera, expresadas como evapotranspiración. Para el caso del modelo de evaluación del riesgo de sequía aplicado en este estudio, todas estas variables climáticas se calculan previamente en la evaluación de la amenaza y se utilizan para calcular los indicadores de sequía.

Adicionalmente, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) se incluye en la evaluación, ya que es un aspecto que afecta la expansión del cultivo y la conductancia estomática. Los valores por defecto de las concentraciones anuales de CO_2 se miden en el Observatorio Mauna Loa, en Hawai (www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/). Para el caso de la evaluación prospectiva de riesgo, se utiliza la concentración de dióxido de carbono para el último año disponible en la evaluación base y para la evaluación de los modelos con cambio climático se usan las proyecciones de concentración de dióxido de carbono según el escenario de RCP (trayectoria representativa de concentración) analizada.

A. 3.3.3 Cultivo

Los cultivos se modelan en términos de los procesos biológicos, físicos y químicos que determinan su rendimiento. El modelo permite evaluar cómo los cultivos crecen y se desarrollan a lo largo de su ciclo de crecimiento específico, creciendo el follaje, profundizando sus raíces y acumulando biomasa. Todas las etapas fenológicas (o etapas de crecimiento) se consideran en el modelo: vegetativo, floración, formación

de rendimiento y maduración, incluyendo etapas fenológicas distintas para cultivos herbáceos o forrajeros.

La fenología se refiere a las etapas de desarrollo de los cultivos y su duración, que se puede definir en días de grado de crecimiento (GDD – *Growing Degree Days*) o días calendario. La cobertura vegetal (CC – *Canopy Cover*) es la representación de la cantidad de follaje, la cual se considera proporcional a la cantidad de agua transpirada y la cantidad de biomasa producida. El subcomponente de profundidad de enraizamiento modela el proceso en el cual las raíces se profundizan a una tasa relativa constante mientras que la planta está creciendo hasta la fase de formación de rendimiento. El modelo puede incluir los efectos de capas de suelo o nivel freático superficial que restringen de crecimiento de las raíces.

En la Figura A 23 se muestran las curvas de la cobertura vegetal y profundidad de la raíz. La curva en la parte superior representa el desarrollo de la cobertura vegetal a partir de la expansión (CGC: coeficiente de crecimiento vegetal – *Canopy Growth Coefficient*) y la disminución (CDC: coeficiente de disminución vegetal – *Canopy Decline Coefficient*). La cobertura vegetal se expresa como una fracción de suelo sombreado por las hojas o partes aéreas de las plantas, siendo su nivel máximo (CCx) específico del cultivo. La segunda curva representa la profundidad de enraizamiento efectiva, desde su valor mínimo (Zn) en el momento de la siembra hasta su valor máximo (Zx) en la fecha que se alcanza la madurez del cultivo. Este conjunto de curvas representa el desarrollo del cultivo y su interacción con los sistemas de suelo y aire.

El modelo permite calcular la transpiración de los cultivos separadamente de la evaporación del suelo. El subcomponente de transpiración de cultivos determina el uso de agua de la planta cuando no hay estrés que limite la apertura estomática, característica que es específica del tipo de cultivo y cambia durante su desarrollo. La evaporación del suelo considera la pérdida de agua de la superficie del suelo húmedo no sombreado por la vegetación. Los dos últimos subcomponentes, producción de biomasa y rendimiento cosechable, se pueden resumir en las ecuaciones 61 y 62.

La producción de biomasa se define como:

$$B = WP * \sum Tr \quad 61$$

en donde B es la biomasa producida acumulada, Tr es la transpiración del cultivo sumada durante el período de producción de la biomasa y WP es el parámetro de productividad del agua medido como la cantidad de biomasa seca (kilogramos) por unidad de área (m^2) y de agua transpirada (mm). La robustez del modelo depende de la naturaleza conservadora del WP que permanece constante en un rango de ambientes, cuando se normaliza para demandas evaporativas.

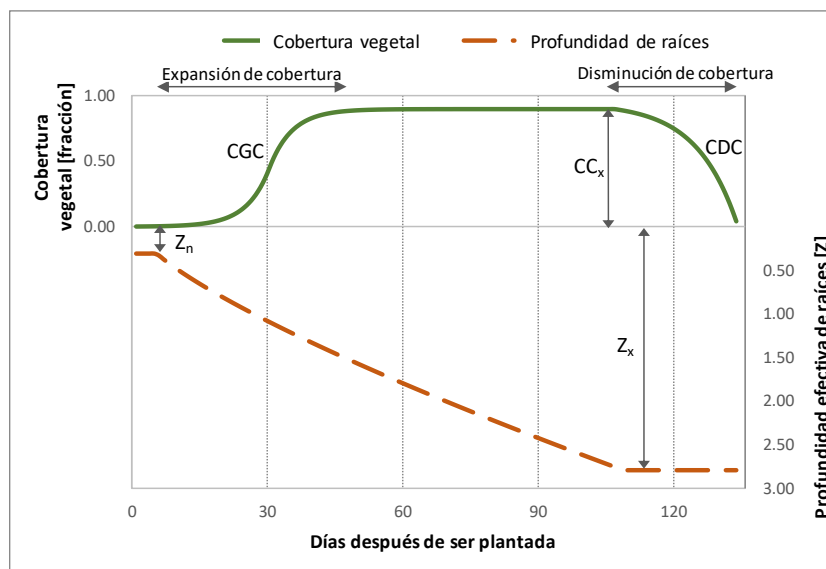


Figura A 23. Representación esquemática del desarrollo en el tiempo de la cobertura vegetal y la profundidad de enraizamiento (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 23)

Finalmente, se utiliza un índice de cosecha HI para estimar el rendimiento Y de la biomasa producida B . Al hacer esta distinción entre la biomasa y el rendimiento, se pueden evaluar por separado los efectos de las condiciones climáticas sobre la producción de biomasa y la cosecha.

$$Y = HI * B$$

62

La Figura A 24 muestra la función del cambio del índice de cosecha HI en el tiempo para cultivos de frutas o granos, para el período de formación del rendimiento (fase de floración hasta la madurez fisiológica). HI comienza a partir de cero, en un crecimiento lento pero acelerado seguido por una tasa de aumento constante hasta que se alcanza el rango superior HI_o . Este nivel superior es el índice de cosecha de los cultivos en condiciones óptimas, es específico del tipo de cultivo y se dispone de datos para su calibración.

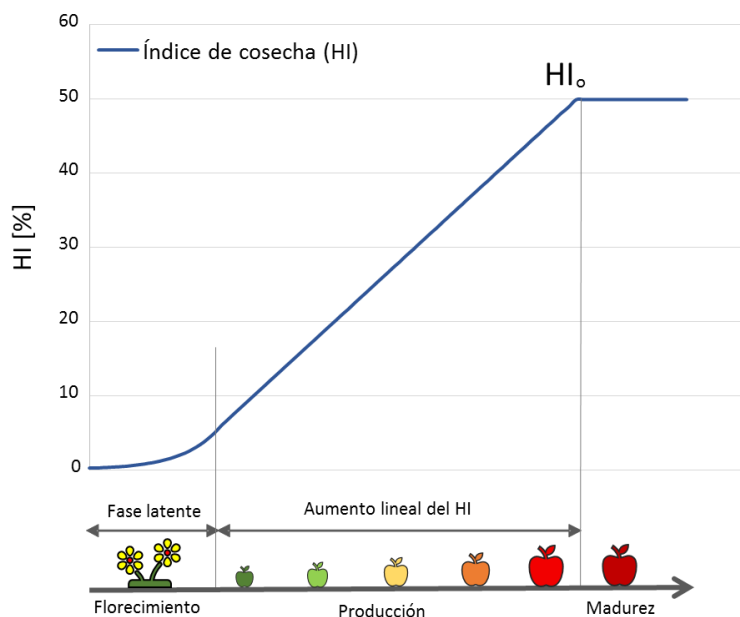


Figura A 24. Representación esquemática del cambio en el tiempo del índice de cosecha (HI) para cultivos de frutas o granos
(Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 27)

A. 3.3.4 Suelo

El componente de suelo incluye su perfil en profundidad y las características del nivel freático dentro del sistema radicular de la planta, expresando la región radicular como un volumen de control en donde se estiman los balances de agua y sal. El suelo puede ser subdividido en capas de profundidad variable, cada una con diferentes características físicas como el contenido de agua en el suelo saturado, el límite superior de agua contenida o capacidad de campo (FC – *Field Capacity*), el punto de marchitamiento permanente (PWP – *Permanent Wilting Point*) o límite inferior del nivel de agua, y la conductividad hidráulica del suelo saturado (K_{sat}). Estos valores son las entradas para determinar la evaporación del suelo, el drenaje interno, la percolación profunda, el escurrimiento superficial y la capilaridad. El nivel freático debe caracterizarse en términos de su profundidad y salinidad.

La Figura A 25 muestra una representación simplificada del modelo del sistema radicular, donde D_r representa el agotamiento de la raíz y W_r es la profundidad equivalente del agua. El agua disponible total (TAW – *Total Available Water*) es la cantidad de agua retenida en la zona de raíces entre la capacidad de campo (límite superior) y el punto de marchitamiento permanente (límite inferior).

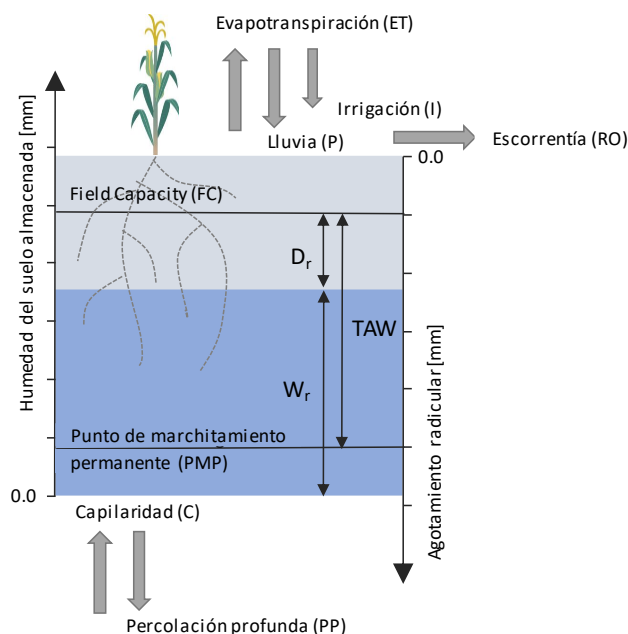


Figura A 25. Representación esquemática del volumen de control de la zona radicular (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 28)

El balance hídrico dentro de la zona radicular se calcula día a día, y para cualquier momento del desarrollo del cultivo. Los caudales de agua entrantes considerados en el modelo son provistos por las lluvias, el riego y la capilaridad. Por otro lado, los flujos de agua salientes considerados en el modelo son el escurrimiento, la evapotranspiración y la percolación profunda.

A. 3.3.5 Manejo

El modelo tiene la capacidad de incorporar las prácticas de manejo en la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, incluyendo el riego y manejo de campo. Las opciones de manejo de riego incluyen la selección de métodos de aplicación de agua y la definición de programas de riego. Las opciones de manejo de campo incluyen la fertilización del suelo, la cobertura del suelo para evitar la evaporación y el uso de protecciones para controlar el escurrimiento superficial. Este tipo de características serán incluidas en la modelación en la medida en que la información necesaria esté disponible.

A. 3.3.6 La dinámica de la respuesta de los cultivos al estrés hídrico

Las condiciones de estrés hídrico son representadas por un coeficiente de estrés (K_s) y un umbral para los indicadores de estrés. K_s es un modificador que cuantifica la intensidad del efecto que produce el estrés hídrico en los procesos de crecimiento específicos para un cultivo y etapa de crecimiento. Como se observa en la Figura A 26, los valores de K_s varían entre 0 (estrés total) y 1 (sin estrés), siguiendo una función lineal o convexa (el grado de curvatura se establece durante la calibración del modelo). Los umbrales para el estrés hídrico están relacionados con el agotamiento del agua del suelo, mientras que los umbrales asociados al estrés por temperatura del aire están relacionados con los grados de crecimiento.

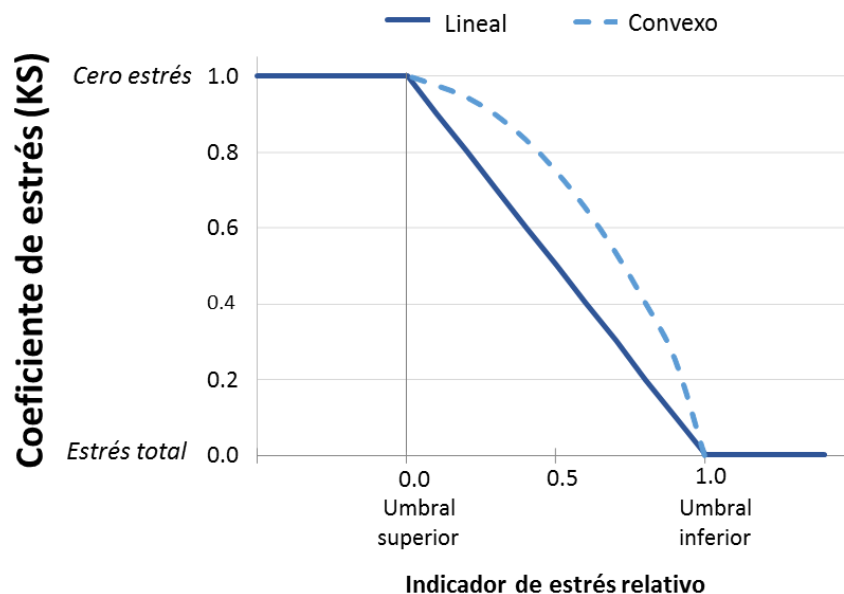


Figura A 26. Función del coeficiente de estrés (Ks) (Adaptado de Steduto et al., 2012, p. 32)

El modelo permite calcular los efectos del déficit hídrico (entendido como falta de agua en la región radicular del suelo) 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 A 27 muestra estos cinco procesos (líneas punteadas), dentro del esquema general de desarrollo de rendimiento bajo estrés hídrico. Un resumen general del proceso de cálculo se presenta a continuación. Nótese que todos los pasos del proceso se calculan en intervalos de tiempo diarios.

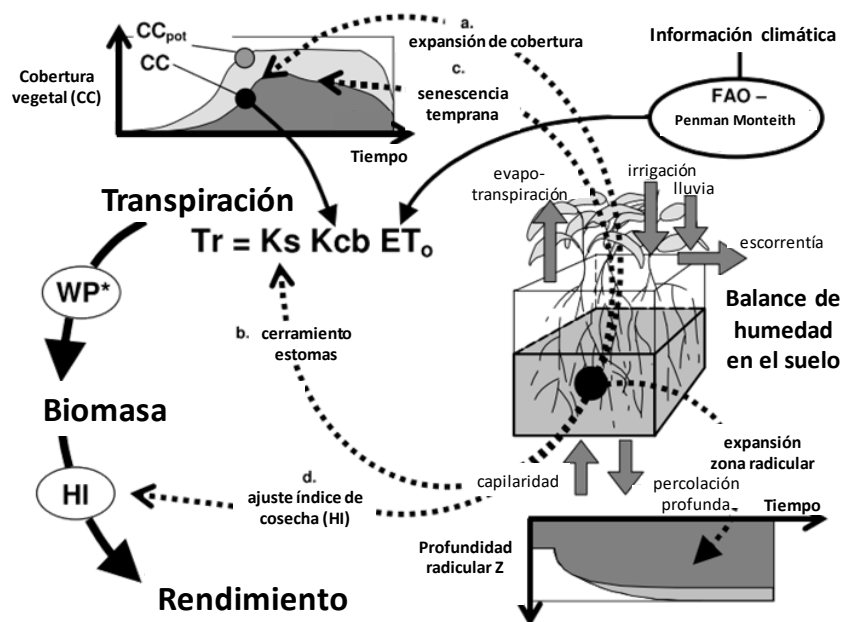


Figura A 27. Representación esquemática de la respuesta del cultivo al estrés hídrico (Adaptado de Raes et al., 2011)

1. *Balance del agua en el suelo:* determina la cantidad de agua almacenada en la zona radicular, contabilizando los flujos de agua entrante y saliente. El crecimiento del cultivo no se ve afectado y no hay estrés hídrico ($K_s = 1$) entre el nivel de capacidad de campo (FC) y el nivel superior de agotamiento de la zona de raíz. En el otro extremo, entre el umbral inferior en el agotamiento de la zona de raíz y el punto de marchitamiento permanente hay tensión total ($K_s = 0$) y el crecimiento del cultivo se ve completamente impactado. A medida que se reduce el agua almacenada en el volumen de control del suelo, el coeficiente de estrés disminuye.
2. *Expansión de la cobertura vegetal:* Se simula el efecto del déficit hídrico en la expansión de la cobertura, mediante la reducción del coeficiente de crecimiento vegetal (CGC) por el coeficiente de estrés hídrico para la expansión de cobertura $K_{s,exp,w}$, y modificando el coeficiente de disminución de cobertura por coeficiente de estrés hídrico de senescencia temprana $K_{s,sen}$.
Por una parte, cuando el agotamiento de la zona radicular está por debajo de los umbrales superiores de contenido de agua, $K_{s,exp,w}$ se hace menor que 1 y la cobertura reduce su tasa de expansión. Cuando el agotamiento de la zona radicular está por debajo del límite inferior, $K_{s,exp,w} = 0$ y se detiene el desarrollo de la cobertura. Por otra parte, cuando el estrés hídrico es severo (agotamiento de la zona radicular cerca del punto de marchitamiento permanente), se desencadena la senescencia temprana. El grado de senescencia está descrito por $K_{s,sen}$. La cobertura vegetal máxima no puede ser alcanzada bajo condiciones de estrés hídrico, o podría alcanzarse en una última etapa de la temporada, como se muestra en la Figura A 29.

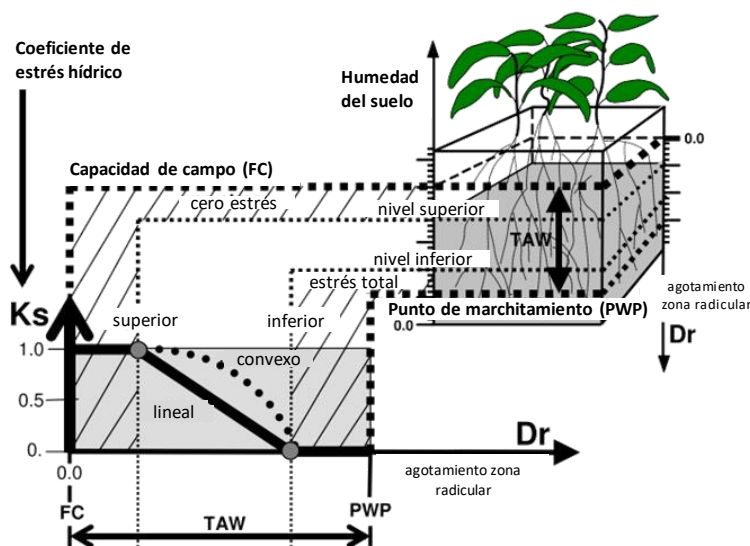


Figura A 28. Representación esquemática del coeficiente de estrés hídrico (Adaptado de Raes et al., 2011)

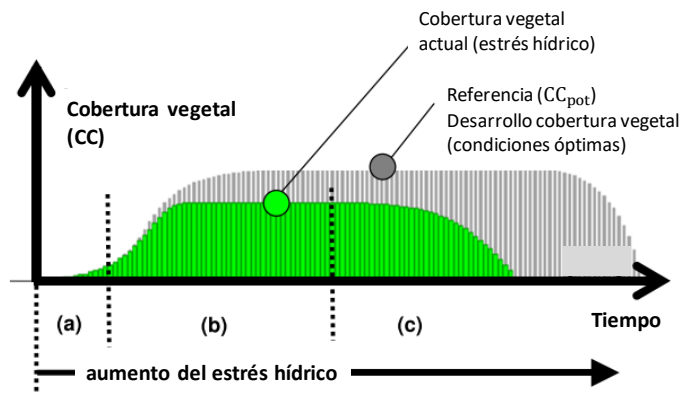


Figura A 29. Representación esquemática de la expansión de la cobertura vegetal, bajo condiciones óptimas (gris) y bajo estrés hídrico (verde). (Adaptado de Raes et al., 2011)

3. **Transpiración:** se calcula la potencia de evaporación de la atmósfera considerando un coeficiente de cultivo K_{cb} y el coeficiente de estrés hídrico K_s , como se muestra en la ecuación 63. La evapotranspiración potencial (ET_o) se calcula usando la ecuación de Penman-Monteith de FAO (Allen et al., 1998).

$$Tr = K_s(K_{cb}CC^*)ET_o \quad 63$$

El coeficiente de transpiración del cultivo K_{cb} es un parámetro que debe ser ajustado continuamente en función de la cobertura vegetal simulada, con el fin de considerar los efectos de envejecimiento y senescencia. El coeficiente de estrés hídrico K_s , utilizado en caso de escasez de agua es un coeficiente de estrés por cierre estomático $K_{s,sto}$, también con valores entre 1 (sin estrés) y 0 (total estrés).

4. **Biomasa arriba de la superficie:** La relación entre la biomasa producida y el agua consumida por un cultivo específico se conoce es la productividad del agua (WP), la cual tiende a ser lineal para una condición climática dada, como se muestra en la ecuación 64. Para incluir condiciones climáticas alteradas, se emplea la productividad del agua normalizada WP^{**} en la simulación del desarrollo de biomasa sobre el suelo. Utilizando el parámetro normalizado, el modelo puede aplicarse a diferentes regiones y estaciones. La normalización se realiza para la concentración atmosférica de CO_2 y la demanda evaporativa de la atmósfera (Dirk Raes et al., 2011).

La producción de biomasa arriba de la superficie se calcula, para un paso de tiempo diario, de la siguiente manera:

$$B = K_{sb}WP^* \sum_i \frac{Tr_i}{ET_{o_i}} \quad 64$$

en donde la productividad del agua normalizada WP^* se multiplica por la relación entre la transpiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia del día de cálculo $\frac{Tr_i}{ET_{o_i}}$ (expresión que se agrega durante todo el periodo de desarrollo del cultivo), y por el coeficiente de estrés por temperatura K_{sb} . Este coeficiente decrece a medida que la temperatura disminuye, y alcanza un valor de cero cuando hace demasiado frío y se detiene el crecimiento vegetal.

5. *Rendimiento*: Como se mencionó anteriormente, el rendimiento se calcula de multiplicar la biomasa sobre el suelo por un índice de cosecha, que depende del tipo de cultivo. Para considerar el estrés hídrico, debe ajustarse el índice de cosecha de su valor de referencia HI_o en condiciones óptimas, a su valor en condiciones reales, mediante la inclusión del factor f_{HI} :

$$Y = f_{HI} * HI_o * B \quad 65$$

El índice de cosecha puede ajustarse al déficit hídrico y a las variaciones de la temperatura del aire, y depende de la etapa del cultivo y la intensidad del estrés durante la temporada de crecimiento.

A. 3.4 Modelación de incendios de cobertura vegetal

En términos de la evaluación probabilista del riesgo, la amenaza por incendio forestal se define como una situación física (combustibles, clima, topografía) con potencial de generar daños a la propiedad o el medio ambiente asociados a la quema de vegetación (Scott & Reinhardt, 2001). La naturaleza de los incendios forestales, que pueden ser intensos, rápidos y destructivos, sugieren un potencial de daño cada vez que ocurren. Por tanto, evaluar la amenaza por incendio forestal es cuestión de evaluar el potencial de su ocurrencia, propagación y extinción.

Estos procesos no dependen de una sola característica del combustible o del ambiente, en realidad resultan de ciertas combinaciones de combustible, clima y topografía que conducen al desarrollo y propagación continua del fuego. La metodología adoptada para la evaluación de la amenaza por incendios forestales está orientada a determinar estas combinaciones a través de la modelación sistemática y prospectiva de los procesos que definen un incendio forestal, y se resume de la siguiente manera:

- Simular las condiciones iniciales que favorecen la ocurrencia de los incendios.
- Generar de forma aleatoria puntos de ignición en zonas de alta susceptibilidad.
- Propagar el incendio dependiendo del estrato de combustible que este consumiendo el fuego. Estimar la tasa máxima de propagación potencial de incendio de superficie y copas para cada punto que conforma el perímetro de avance del incendio.
- Representar los cambios en la forma y tamaño del incendio respecto al tiempo.
- Simular la extinción del incendio cuando las condiciones propicias para la propagación no puedan mantenerse en el tiempo o se establezca la finalización predeterminada del evento según su duración.

La modelación de un fenómeno de tal complejidad debe llevarse a cabo de manera que sea posible dar cuenta del problema y se pueda incorporar la incertidumbre que surge de la innegable simplificación que el modelo hace del problema real. En la Figura A 30 se resume la metodología utilizada para la evaluación de la amenaza por incendios forestales.

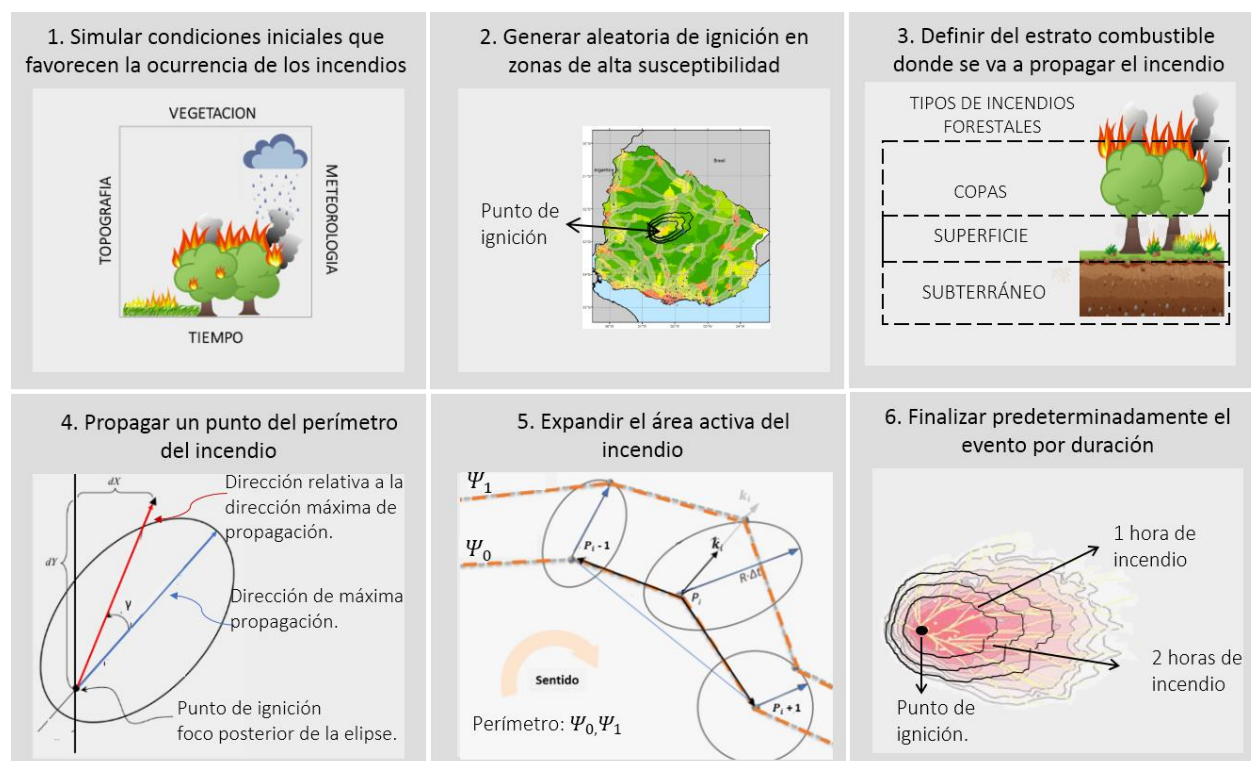


Figura A 30. Metodología utilizada para la evaluación de la amenaza por incendios forestales.

La modelación de incendios forestales debe basarse en la simulación de las condiciones iniciales que favorecen la ocurrencia de los incendios. Las condiciones iniciales consideradas en el modelo propuesto son:

- Temperatura del aire
- Humedad del aire
- Humedad de la vegetación
- Dirección y velocidad del viento
- Aspecto e inclinación de la pendiente

A. 3.4.1 Velocidad y dirección del viento

Para la evaluación de la amenaza se aplicará una metodología basada en eventos para crear un conjunto de condiciones de vientos fuertes en el país. El peligro asociado a los eventos de viento fuerte se define con el uso de un valor de frecuencia anual de ocurrencia y su severidad, caracterizada por un parámetro de intensidad calculado en cada localización geográfica específica. Por ejemplo, la intensidad para vientos fuertes puede ser la velocidad instantánea del viento o la velocidad de las ráfagas de 3 segundos, a 10 metros sobre la superficie (v_{10}). La evaluación del riesgo se basa en la frecuencia histórica de ocurrencia de eventos de viento fuerte y sus diversos grados de intensidad. Una vez definidos los parámetros que caracterizan la ocurrencia de dichos eventos, desde un punto de vista físico, es necesario generar un conjunto de eventos estocásticos a través de la simulación de una serie de eventos aleatorios. El conjunto de eventos aleatorios contiene todas las formas posibles en que el peligro relacionado con viento fuerte

puede manifestarse en el territorio de análisis. Para cada evento, la amenaza se caracteriza, en cualquier punto del territorio, a través de la distribución de probabilidad de la intensidad, definida en términos de su valor esperado y su varianza.

Generación estocástica de eventos de viento fuerte

La metodología propuesta utiliza un generador de eventos sintéticos de viento fuerte a partir de distribuciones paramétricas de probabilidad para definir conjuntos de datos históricos y estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de velocidad y dirección del viento, incluso fuera del rango de observaciones históricas. La metodología toma cada mes del año hidrológico en un análisis separado, y encuentra la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a los registros históricos haciendo uso de la estimación de densidad de kernel. Posteriormente, se generan números aleatorios para un determinado número de simulaciones, usando los parámetros de la distribución de probabilidad ajustada. Las series sintéticas de viento son luego utilizadas para generar mapas de amenaza integrada para diferentes periodos de retorno para toda el área de análisis. El esquema que describe el generador sintético de viento se presenta en la Figura A 31. A continuación, se hace una descripción detallada de la metodología.

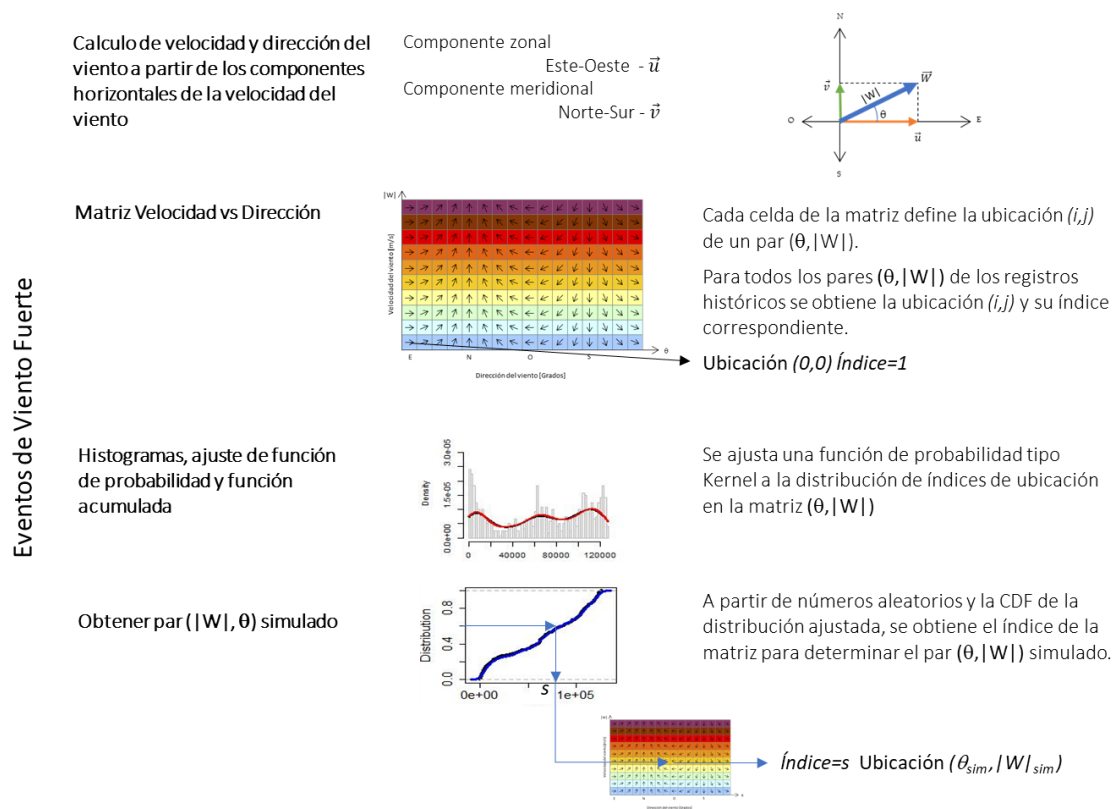
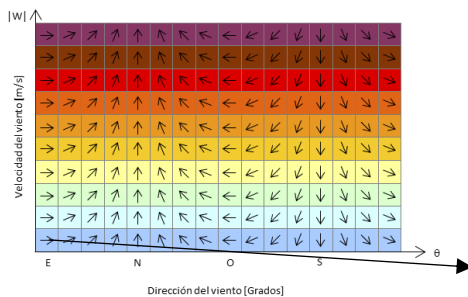


Figura A 31. Metodología de simulación estocástica de variables de viento

La información requerida para el modelo de viento fuerte consiste en registros históricos de la componente horizontal del viento, esto es su dirección y velocidad. Esta información se puede obtener de fuentes oficiales que administran estaciones en tierra, que deben estar debidamente georeferenciadas.

En caso de no contar con información medida en estaciones en superficie, la información de entrada para el modelo de amenaza de viento fuerte puede obtenerse de bases de datos con información resultado de reanálisis del clima global. La base de datos propuesta para este estudio es ERA5 del Copernicus Climate Change Service (2017). ERA5 es la 5ta generación del modelo generado por el centro de pronóstico europeo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). La información del modelo es libre para descarga y es publicada con resolución horizontal de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ en tierra y registros a escala horaria disponibles desde 1979 hasta el presente (con pocos meses de retraso antes de su publicación). Entre las variables disponibles están las componentes horizontales de la velocidad del viento medido a 10 m de la superficie y la velocidad de ráfaga. A partir de estas componentes, zonal y meridional, se puede estimar la magnitud y dirección del vector resultante del viento.

El primer paso es entonces obtener los componentes u y v del viento, si la información se obtiene de una base de datos tipo ERA5, o la magnitud y dirección del viento, si la información proviene de fuentes locales. Los vectores u y v del viento pueden transformarse en la magnitud y dirección del viento haciendo uso de funciones sencillas (la magnitud es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de u y v , y la dirección del viento se calcula a partir de trigonometría). Es importante notar que la dirección del viento en meteorología indica desde donde viene el viento y se mide con respecto al eje Norte ($N=0^\circ$) e incrementa en el sentido horario ($E=90^\circ$, $S=180^\circ$ y $O=270^\circ$). Una vez se tiene la información del par velocidad y dirección para cada registro histórico, se procede a obtener un índice de localización único para cada par, según su ubicación en una matriz que relaciona magnitudes de velocidad (eje vertical) con direcciones del viento (eje horizontal). Esta matriz se muestra en la Figura A 32. La Figura A 33 muestra el ejemplo del cálculo de frecuencia de pares dirección, velocidad del viento sobre la matriz de índices. Se pueden ver las zonas donde hay una mayor concentración de valores (barras más altas) que indican que para esa zona de dirección y viento se presentan valores más frecuentes que cuando hay menos concentración de valores (barras más bajas).



Cada celda de la matriz define la ubicación (i,j) de un par $(\theta, |W|)$.

Para todos los pares $(\theta, |W|)$ de los registros históricos se obtiene la ubicación (i,j) y su índice correspondiente.

Ubicación $(0,0)$ Índice=1

Ubicación (i,j) Índice= $i*j$

Figura A 32. Matriz de índices i,j para pares $(\theta, |W|)$

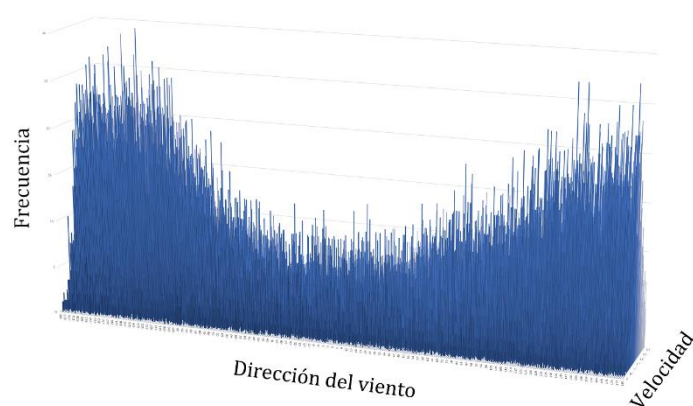


Figura A 33. Matriz de frecuencia para registros de viento del dataset ERA5 para una ubicación ejemplo.

Como cada celda del par dirección y velocidad tienen un índice asociado a la ubicación dentro de la matriz, se puede obtener un histograma de valores que relacione la frecuencia de ocurrencia de ese índice de ubicación. Sobre este histograma se estima la distribución kernel, que es lo mismo que su media móvil. La función acumulada de la función kernel ajustada se utiliza para generar simulaciones aleatorias del índice de localización dentro de la matriz. Este procedimiento se puede hacer a escala anual (ubicando en la matriz todos los registros históricos) o filtrando la información por mes o grupo de días. La Figura A 34 muestra el ejemplo de este procedimiento para dos meses (febrero a la izquierda y julio a la derecha) del histograma de registros históricos (izquierda), la distribución kernel ajustada a este histograma (curva negra), el histograma de registros simulados (derecha) y la curva kernel ajustada a los valores simulados (curva roja). También se muestra el ajuste de la función acumulada de distribución (gráfica abajo) que compara la muestra de registros históricos (curva negra) y de registros simulados (curva azul). Este ejemplo muestra el buen ajuste que se logra con las distribuciones kernel de los registros históricos y las simulaciones.

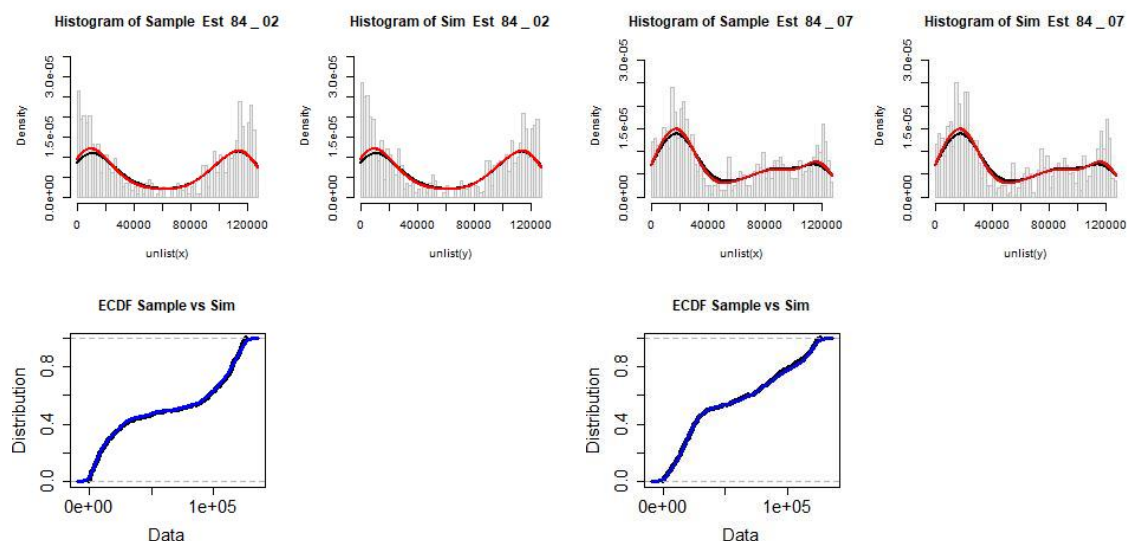
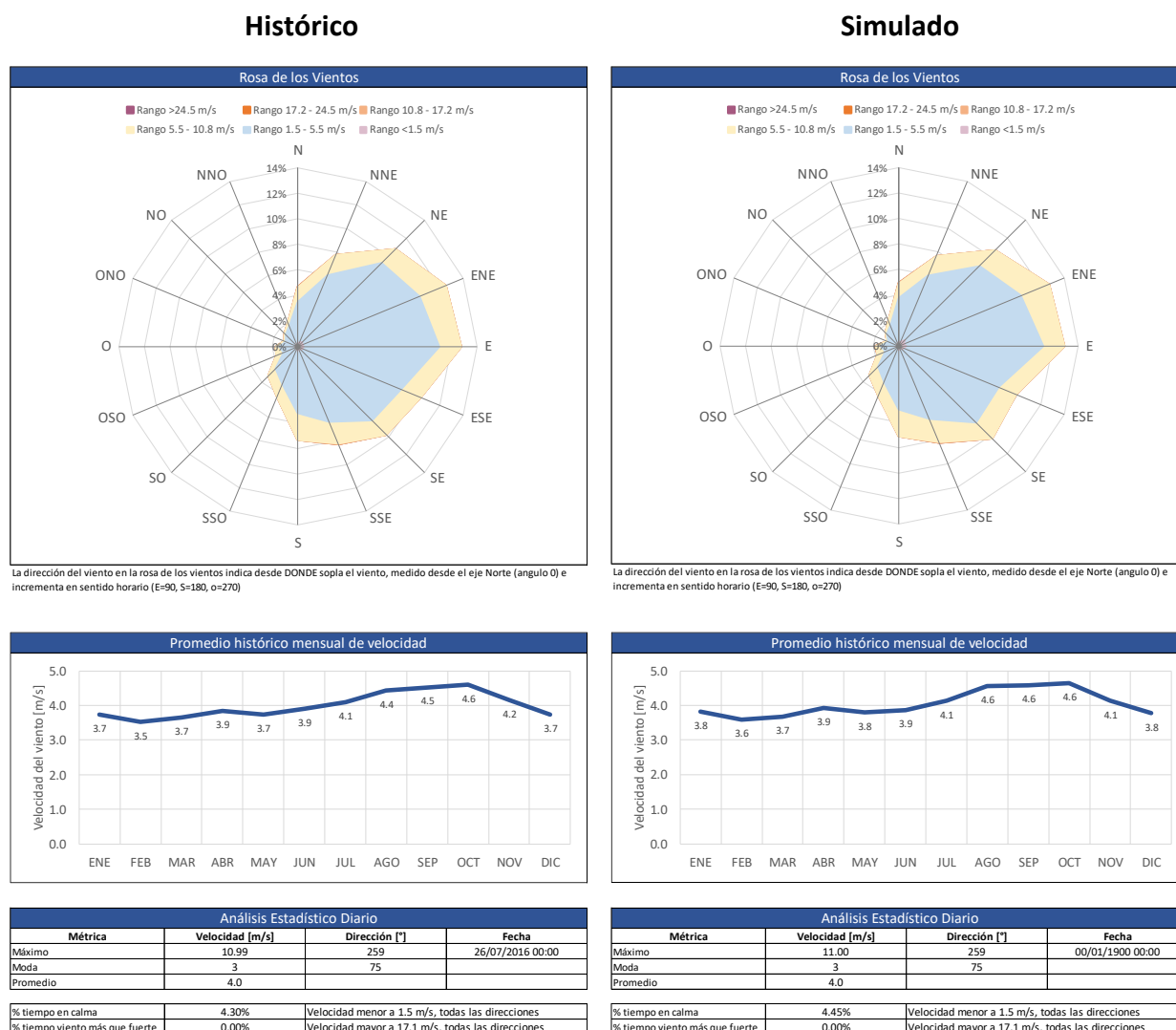


Figura A 34. Ejemplo de histogramas de índice de localización, ajuste de función kernel y función acumulada de la distribución para dos meses diferentes en una estación virtual.

Luego de obtener los índices de localización dentro de la matriz, se puede volver a la matriz original y obtener los valores de dirección y velocidad para cada uno de los n valores simulados. Con esto, se obtienen n pares nuevos de parámetros que definen las condiciones de viento en la ubicación de interés. Una vez se obtiene los parámetros que definen el viento, se puede hacer un análisis estadístico para verificar, en la ubicación de interés, cómo se compara la media de viento en los registros históricos y la media de viento en los registros simulados. Un ejemplo de este análisis estadístico se muestra en la Figura A 35, que incluye la rosa de los vientos, que indica para diferentes rangos de velocidad, la dirección predominante de donde sopla el viento. También se incluye la variación mensual de la velocidad del viento, un análisis estadístico diario, que incluye el porcentaje de tiempo en calma (velocidad menor a 1.5 m/s) y porcentaje de tiempo más que fuerte (velocidad mayor a 17 m/s). La gráfica de caja y bigotes muestra la dispersión del valor de velocidad medida, que para el caso del dataset ERA5 es un dato cada hora.



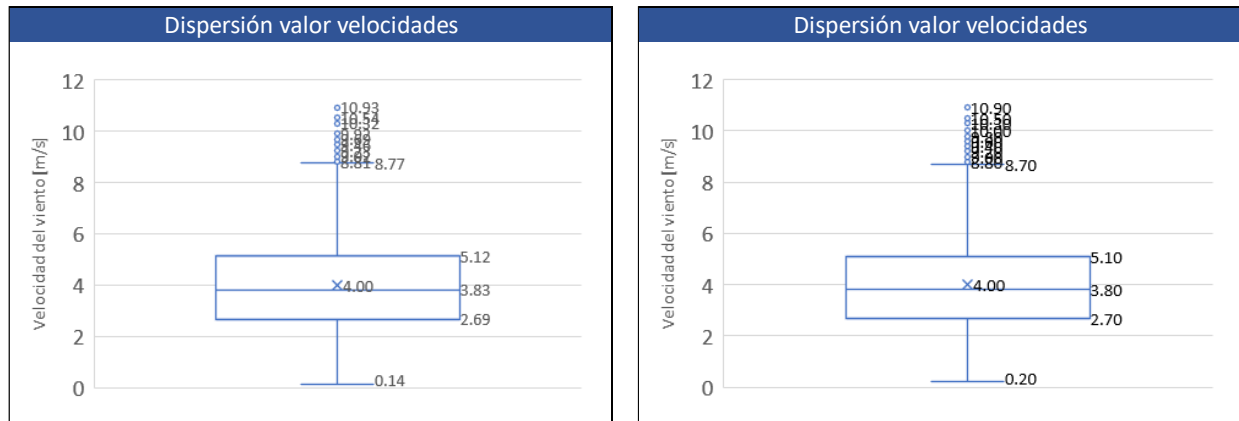


Figura A 35. Comparación entre la media de viento de los registros históricos (izquierda) vs. Los parámetros de viento simulado estocásticamente (derecha).

A. 3.4.2 Índices de susceptibilidad de incendios forestales

Constantemente numerosos incendios forestales, causados naturalmente o por generación antrópica, se presentan en zonas de difícil acceso, haciendolos complejos de combatir. Algunas de las variables ambientales que afectan el riesgo por incendio son la temperatura, la humedad del suelo, el déficit de humedad, y la estabilidad atmosférica (Keetch and Byram, 1968; Zhdanko, 1965; Groisman et al., 2007). Debido a esto, se han creado diferentes índices para poder calcular la amenaza por incendios forestales en una región y son comúnmente usados para prever cuándo las condiciones climáticas pueden derivar en un incendio forestal difícil de manejar (Srock et al., 2018). Estos índices se explican a continuación:

Índice de Angstrom

Es un índice desarrollado en 1942 en Suecia, basado en condiciones climáticas y se clasifica en 5 clases: improbable, desfavorable, favorable, más favorable y muy probable (ver Tabla A 4). Entre más bajo el valor mayor es el riesgo (Forest service, 2013). Su fórmula es la siguiente:

$$A = \frac{Rh}{20} + \frac{27 - T}{10} \quad 66$$

Donde, Rh es la humedad relativa en % y T es la temperatura en °C.

Tabla A 4. Clasificación del índice Angstrom (Forest Service, 2013).

Valor	Condición
> 4	Improbable
4 - 2.5	Desfavorable
2.5 - 2	Favorable
< 2	Muy probable

Índice de Chandler (Chandler Burning Index)

Es un índice basado en temperatura y humedad relativa para calcular el riesgo de incendios forestales. Su ecuación es la siguiente:

$$CBI = \left((110 - 1.373Rh) - 0.54 * (10.20 - T) \right) * (124 * 10^{(-0.0142Rh)}) / 60 \quad 67$$

Donde, Rh es la humedad relativa en porcentaje y T es la temperatura en °C (Stillwater, 2020).

Se divide en 5 categorías: bajo, moderado, alto, muy alto y extremo (ver Tabla A 5). Bajo indica que no es posible que se genere un incendio a partir de brasas, aunque una fuente de calor mayor como un rayo si lo puede causar; en el nivel moderado generalmente el número de inicio de incendios es bajo, mayormente accidentales y se pueden controlar fácilmente. En alto es fácil el estado de ignición, la propagación es rápida y los incendios son difíciles de controlar si no se ejecutan acciones tempranamente. Muy alto indica que los incendios comienzan muy fácilmente por cualquier causa, se propagan e incrementan su intensidad rápidamente. En el caso extremo, todos los incendios son potencialmente serios, desarrollan una gran intensidad y velocidad, llegan a ser inmanejables, solo pueden contenerse un poco atacando los flancos y esperando que el clima ayude (Stillwater, 2020).

Tabla A 5. Clasificación del índice de Chandler (Forest Service, 2013).

Valor	Condición
<50	Bajo
50 - 75	Moderado
75 - 90	Alto
90 - 97.5	Muy alto
> 97.5	Extremo

Índice de viento seco y caliente (Hot-Dry-Windy Index)

Basado en temperatura, humedad y viento, analiza la información atmosférica en busca de la ocurrencia de ciertos tipos de fenómenos. Su objetivo es poder cuantificar el potencial de un incendio forestal y al tener en cuenta estos tres parámetros es aplicable en cualquier región (Srock et al., 2018). Se calcula a partir de las siguientes ecuaciones:

$$HDW = U * VPD \quad 68$$

$$VPD = e_s - e \quad 69$$

Donde, U es la velocidad del viento en m/s, e_s es la presión de vapor saturado y e es la presión de vapor en hPa.

Índice de humedad del combustible (Fuel Moisture Index)

Es simple y de fácil manejo, hace uso de la temperatura y la humedad relativa, y combinado con la velocidad del viento proporciona un índice de riesgo de incendio, el cual ha mostrado muy buen

comportamiento con otros índices (Sharples et al., 2009, 2009b). No presenta una clasificación definida, pero entre más bajo sea el valor mayor será el riesgo de incendio. Es calculado a partir de la ecuación:

$$FMI = U/10 - 0.25(T - H) \quad 70$$

Donde, T es la temperatura en °C, H es la humedad relativa en % y U la velocidad del viento en km/h.

Índice de Fosberg (Fosberg Fire Weather Index)

Es un índice basado en temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, diseñado para analizar la relación entre clima y el comportamiento de incendios forestales (University of Washington, 2020; Sharples et al., 2009b). Fosberg asume que las propiedades de la cama de combustible como la relación área de superficie / volumen y la humedad de extinción son fijas en tiempo y espacio (Goodrick, 2002). Se divide esencialmente en dos componentes, el primero es la humedad del combustible determinada por Simard (1968) y la segunda es la tasa de propagación basada en el modelo de Rothermel (1972). El índice presenta la siguiente ecuación:

$$FFWI = n * \sqrt{1 + U^2} / 0.3002 \quad 71$$

$$n = 1 - 2(m/30) + 1.5(m/30)^2 - 0.5(m/30)^3 \quad 72$$

Donde, U es la velocidad del viento en millas por hora y m es el contenido de humedad según Simard (Goodrick, 2002; Sharples et al., 2009b).

Altos valores del índice implican largas longitudes de llama y secado rápido. Cuando el valor es 100 significa que el contenido de humedad es 0.

Índice Mark4 (McArthur Grassland Mark4)

A partir de la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire y además asumiendo una cantidad de combustible igual a 4.5 t/ha, proporciona una imagen directamente relacionada con la posibilidad de que se genere un incendio (Sharples et al., 2009). Se expresa de la siguiente manera:

$$GFDI4 = \exp^{(0.0217 - 0.009432(100 - C)^{1.536} + 0.02764T - 0.2205\sqrt{H} + 0.6422\sqrt{U})} \quad 73$$

Donde, C es el grado del pasto curado, el cual se encuentra en un rango entre 0% y 100%, T es la temperatura, H la humedad relativa y U la velocidad del viento (Sharples et al., 2009b).

Índice Mark5 (McArthur Grassland Mark5)

Otra versión del índice propuesto por McArthur, tomando como parámetros la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, carga disponible de combustible y porcentaje de pasto curado, busca ser aplicable de una forma más amplia que el índice Mark4 (Sharples et al., 2009b; Noble et al., 1980). El método de cálculo es el siguiente:

$$m = \frac{(97.7 + 4.06Rh)}{T + 6} - 0.00854Rh + \frac{3000}{c} - 30 \quad 74$$

Si $m > 30$	$GFDI5 = 0$	75
Si $18.8 < m < 30$	$GFDI5 = 0.299f * \exp(-1.686 + 0.0403U) * (30 - m)$	76
Si $m < 18.8$	$GFDI5 = 3.35f * \exp(-0.0897m + 0.0403U)$	77

Donde, m es el contenido de humedad del combustible en porcentaje, Rh es la humedad relativa en porcentaje, T es la temperatura en °C, c es el porcentaje de pasto curado, f es la carga disponible de combustible en T/ha y U es la velocidad del viento en km/h (Sharples et al., 2009b).

Índice de sequía de Keetch Byram (Keetch Byram Drought Index)

También denominado KBDI, es un índice utilizado para formular un factor de disponibilidad de combustible que modifica la respuesta del índice (Goodrick, 2002). Es un indicador de sequía diseñado para aplicaciones forestales. Sus valores se encuentran entre 0 y 800, en donde el valor más alto indica sequía extrema y 0 corresponde a suelo saturado.

El índice depende de la precipitación diaria, temperatura máxima diaria, precipitación media anual y un factor de disponibilidad de combustible (FAF, por sus siglas en inglés) (Goodrick, 2002). Representa el efecto de la evapotranspiración y la precipitación para producir deficiencia en la humedad acumulada sobre el suelo (Keetch and Byram, 1968). La lógica detrás del índice es que el suelo húmedo suprime los incendios forestales, mientras que el suelo orgánico seco los aumenta y los hace difíciles de controlar (Groisman et al., 2007).

Su cálculos son diarios, se empieza con un valor de cero o el correspondiente a un suelo cercano a la saturación, luego se incrementa en función de la evapotranspiración, dependiendo del KBDI actual, la temperatura y la precipitación media anual, y se reduce por una lluvia neta si existe (Groisman et al., 2007).

Índice McArthur's FFDI (Forest Fire Danger Index)

Índice desarrollado para medir el riesgo de incendio en los bosques de Australia (Griffiths, 1999; Noble et al., 1980). Está basado en temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y un componente representando el combustible disponible. Se divide en 5 clases: bajo, moderado, alto, muy alto y extremo como se observa en la Tabla A 6 (Dowdy, 2009). Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$FFDI = 2e^{(-0.45 + 0.987 \ln(DF) - 0.0345Rh + 0.0338T + 0.0234v)} \quad 78$$

Donde, DF es un factor de sequía dado como un número entre 0 a 10 y representa la influencia de las temperaturas recientes y los eventos de precipitación sobre la disponibilidad de combustible, se obtiene como parte del índice KBDI, Rh es la humedad relativa en porcentaje, T es la temperatura en °C y v es la velocidad del viento en km/h (Sharples et al., 2009; Dowdy, 2009).

Tabla A 6. Clasificación del índice FFDI (Dowdy, 2009).

Valor	Condición
<5	Bajo
5 - 11	Moderado
12 - 24	Alto
25 – 50	Muy alto
> 50	Extremo

Índice de humedad del combustible - KBDI

Dado que el índice FMI es muy útil para evaluar el riesgo de incendios, se presenta una variación del índice multiplicado por el valor de un factor de sequía para tener en cuenta los efectos a largo plazo de la humedad (Sharples et al., 2009b). En este caso el índice KBDI fue usado y su formulación es:

$$mFMI = FMI * KBDI \quad 79$$

Índice de Fosberg modificado

Es una modificación del índice de Fosberg para tener en cuenta sequías (Goodrick, 2002). Al tener en cuenta que es una herramienta potencial para evaluar la influencia del clima sobre los incendios forestales basados en temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, una modificación que incluya el impacto de la precipitación es de gran aporte. La adición del comportamiento de la precipitación permite capturar las variaciones espaciales en el potencial de incendio y se logra mediante un factor de disponibilidad de combustible (FAF) definido en el índice KBDI. El uso del KBDI en el índice de Fosberg es para escalarlo y reflejar la disponibilidad total de combustible (Goodrick, 2002). La ecuación para el factor de disponibilidad de combustible usada en función del KBDI (K) es:

$$FAF = 0.000002K^2 + 0.72 \quad 80$$

Y finalmente el índice de Fosberg se multiplica por este factor para obtener el modificado:

$$mFFWI = FAF * FFWI \quad 81$$

Índice de Nesterov

Es un índice basado en el déficit de humedad, temperatura y precipitación, su ecuación es:

$$G = \sum (T * d) \quad 82$$

$$d = T - T_d \quad 83$$

Donde, T es la temperatura del medio día en °C, d es el déficit de saturación en el punto de rocío en hPa, Td es el punto de rocío en hPa (Inumet, 2020). Los totales son calculados para temperaturas positivas y días consecutivos con precipitación menor a 3 mm, cuando la precipitación es mayor a 3 o la temperatura es negativa el índice vuelve a cero (Groisman et al., 2007).

Índice de Nesterov modificado

La modificación al índice de Nesterov se realiza mediante un factor de reducción K similar al usado en el índice de Zhdanko (Groisman et al., 2007), este factor depende de la precipitación y se distribuye de la siguiente manera:

Tabla A 7. Distribución del factor K (Groisman et al., 2007).

Precipitación	K
< 0.1	1
0.1 - 1	0.8
1 - 3	0.6
3 - 6	0.4
6 - 15	0.2
15 - 19	0.1
> 19	0

De esta manera el índice queda:

$$modNesterov = indiceNesterov * K \quad 84$$

Índice de Zhdanko

Índice sugerido por Zhdanko en 1965, expresado mediante:

$$Zh(N) = [Zh(N - 1) + d] * K(N) \quad 85$$

Donde, d es el déficit de saturación en el punto de rocío y K es un coeficiente con rango entre 0 y 1 que controla los cambios del índice cuando ocurre precipitación en el día N (Groisman et al., 2007). El factor K es 1 cuando no ocurre precipitación y 0 cuando esta supera los 20 mm, ver Tabla A 7.

A. 3.4.3 Humedad de combustible fino

Representa el contenido de humedad de combustibles finos, madera muerta y hojarasca sobre el suelo del bosque (Dowdy, 2009). La cantidad de humedad que se encuentra en el combustible es un factor clave para determinar el potencial de un incendio, por esta razón, es muy importante poder estimar este parámetro para el análisis de los incendios forestales (Sharples et al., 2009). Diferentes ecuaciones han sido creadas mediante observaciones en laboratorios forestales y de campo por diferentes autores, se consideran en la metodología aplicada en este estudio y se presentan a continuación:

Tabla A 8. Ecuaciones para el cálculo de la humedad de combustible fino.

Referencia	Ecuación	
Pech (1968)	$si \ Rh \leq 40,$ $m = 0.136Rh^{1.07} + 0.00059 * exp^{0.3Rh}$ $si \ 40 < Rh < 75,$ $m = 0.2772Rh - 4.013 + 0.18 * (21.1 - T) * (1 - 54.6 * exp^{-0.1Rh})$ $si \ Rh \geq 75,$ $m = 0.618Rh^{0.753} + 0.18 * (21.1 - T) * abs(1 - 54.6^{-0.1Rh}) + 0.000454 * exp^{0.1Rh}$	86

Referencia	Ecuación	
Simard (1968)	$\begin{aligned} &\text{si } Rh \geq 50, \\ &\quad m = 21.06 - 0.4944Rh + 0.005565Rh^2 - 0.00063RhT \\ &\text{si } 50 > Rh \geq 10 \\ &\quad m = 1.76 + 0.1601Rh - 0.0266T \\ &\text{si } Rh < 10 \\ &\quad m = 0.03 + 0.2626Rh - 0.00104RhT \end{aligned}$	87
Van Wagner (1972)	$m = 0.942Rh^{0.679} + 0.000499 * \exp^{0.1Rh} + 0.18 * (21.1 - T) * (1 - \exp^{-0.115Rh})$	88
Anderson (1964)	$m = 1.651Rh^{0.493} + 0.001972 * \exp^{0.092Rh} + 0.101 * (23.9 - T)$	89
Pook (1993)	$m = 5.658 + 0.04651Rh + \frac{0.0003151Rh^3}{T} - 0.1854T^{0.77}$	90

A. 3.4.4 Ignición

Cuando la vegetación se encuentra en condiciones de temperatura y humedad apropiadas, se facilita o favorece el proceso de ignición. Se considerará la posibilidad de ignición antrópica, la cual se distribuirá en función a la cercanía a vías y centros poblados, con una tasa de ocurrencia que se establecerá a partir de la información histórica de incendios registrados en el pasado.

La ignición se da una vez se supera el umbral de temperatura de ignición de la materia orgánica seca. La ignición es mucho más probable que ocurra en la hojarasca que se encuentra en la superficie del terreno. Las condiciones más favorables de ignición estarán usualmente asociadas a procesos de sequía prolongados.

A. 3.4.5 Susceptibilidad del terreno a incendios forestales

Adicional a estimar la probabilidad de presentarse un incendio forestal al coincidir condiciones de clima y humedad del suelo y la vegetación desfavorables, se debe considerar en dónde pueden ocurrir los puntos iniciales del incendio. Para determinar la ubicación más probable de los puntos de posible ignición se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Localización de reportes de incendios forestales de la base de datos DesInventar. En total se tienen 42 reportes de eventos en zonas no urbanas registrados entre 1990 y 2011. Estos eventos se registran a partir de reportes hechos a autoridades y una revisión de eventos publicados en la prensa. Aunque es información incompleta, da una buena idea de dónde se localizan en mayor medida los incendios en el país.
- El modelo considera que el inicio de los incendios se da por acción antrópica, es decir, el fuego inicia por acción del hombre ya sea por fogatas descuidadas, quemas de vegetación para agricultura, entre otros. Por esta razón se considera que el área más cercana a las vías principales es de mayor susceptibilidad a sufrir incendios porque habría más presencia de seres humanos. Se considera que el para las vías primarias del país, el área de influencia es de 10 km a cada lado de la calzada y para las vías secundarias es de 5 km a cada lado.

- Para complementar el punto anterior, se considera que las zonas del país con mayor densidad poblacional son más susceptibles a sufrir incendios que las zonas en donde la población está más dispersa. Es decir, entre mayor gente viva en una sección censal, mayor es la probabilidad de que pueda iniciar un incendio en esta sección. La información de la densidad poblacional se obtuvo a partir del Censo demográfico del año 2011, realizado por el INE y al cual se puede acceder a los microdatos en http://www3.ine.gub.uy:82/anda4/index.php/catalog/243/get_microdata.

A. 3.4.6 Combustión y propagación

Una vez iniciado el incendio, este se propaga dependiendo del estrato (capa horizontal de materiales de características similares) de combustible que el fuego está consumiendo. La variabilidad espacial y temporal de las condiciones ambientales que favorecen la ocurrencia de un incendio forestal permite que se reconozcan 3 tipos: *subterráneo*, *superficie* y *copas* (Scott, 2007). Un incendio subterráneo consume cualquier tipo de material combustible (materia orgánica y raíces) que se encuentre situado inmediatamente debajo del suelo. Un incendio de superficie es aquel que arde en la capa de combustible de la superficie, que se encuentra por encima del suelo y por debajo la copa de los árboles. Un incendio de copas quema el combustible del dosel del bosque (Malen, 2009). En la Figura A 36 se muestra los tipos de incendios dependiendo del combustible disponible por estrato.

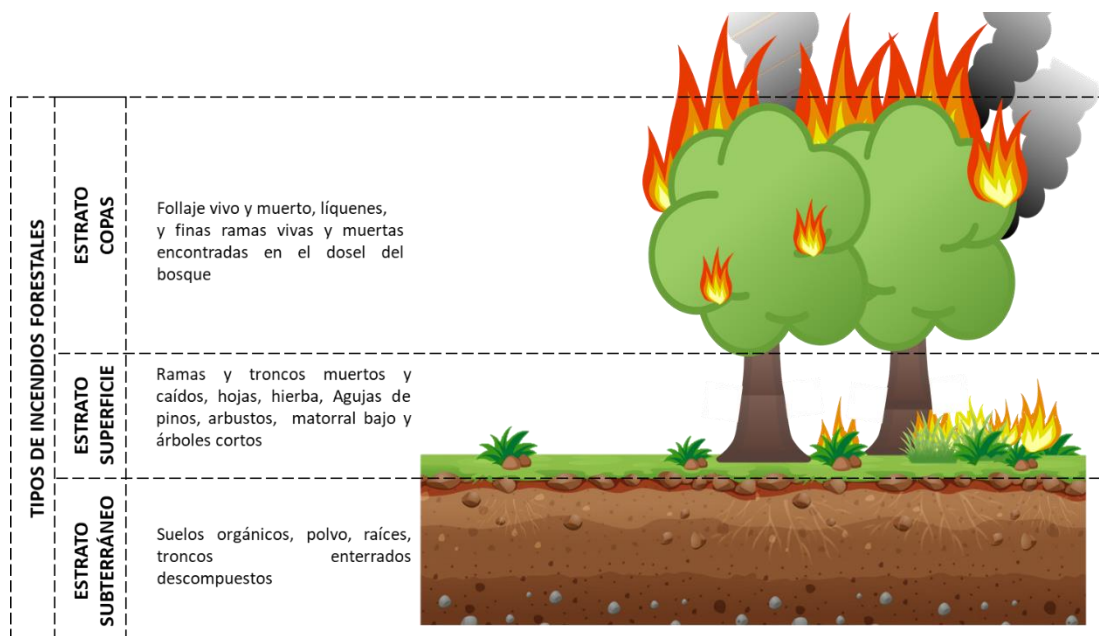


Figura A 36. Tipo de incendios forestales según el estrato de combustible en el que se desarrolla.

El incendio subterráneo no será considerado dentro del análisis al ser poco frecuente y requerir condiciones muy específicas para su desarrollo.

La propagación inicia a partir de un punto de ignición, y a medida que avanza el tiempo, es convertido en un área de incendio activa contenida por un polígono cerrado. El perímetro de este polígono se llama camino y consiste en una lista de nodos o puntos unidos implícitamente como vértices (Tirailleur, 2012). Para modelar la expansión del área activa del incendio es necesario recorrer punto por punto del

perímetro y determinar el comportamiento potencial del incendio de superficie y vincularlo con el de copas a través del cálculo de la velocidad en dirección de máxima propagación propuesto por Rothermel (1972).

La dirección de desplazamiento de un punto será perpendicular a una línea formada por sus vecinos más próximos, el anterior y el posterior. Esta dirección no necesariamente coincide con la dirección de máxima propagación, lo que hace necesario calcular la velocidad de propagación en dirección del desplazamiento del punto. Una vez calculada esta velocidad, es multiplicada por el paso de tiempo de la modelación para establecer la distancia de desplazamiento del punto. En la simulación, el movimiento es aplicado a todos los nodos al mismo tiempo después de su cálculo y antes del siguiente paso de tiempo de simulación. Una descripción más detallada de cómo se simula la expansión del incendio se presenta en la Sección 0. A continuación, en la Figura A 37 se presenta un esquema del procedimiento matemático que debe realizarse en cada uno de los puntos del perímetro.

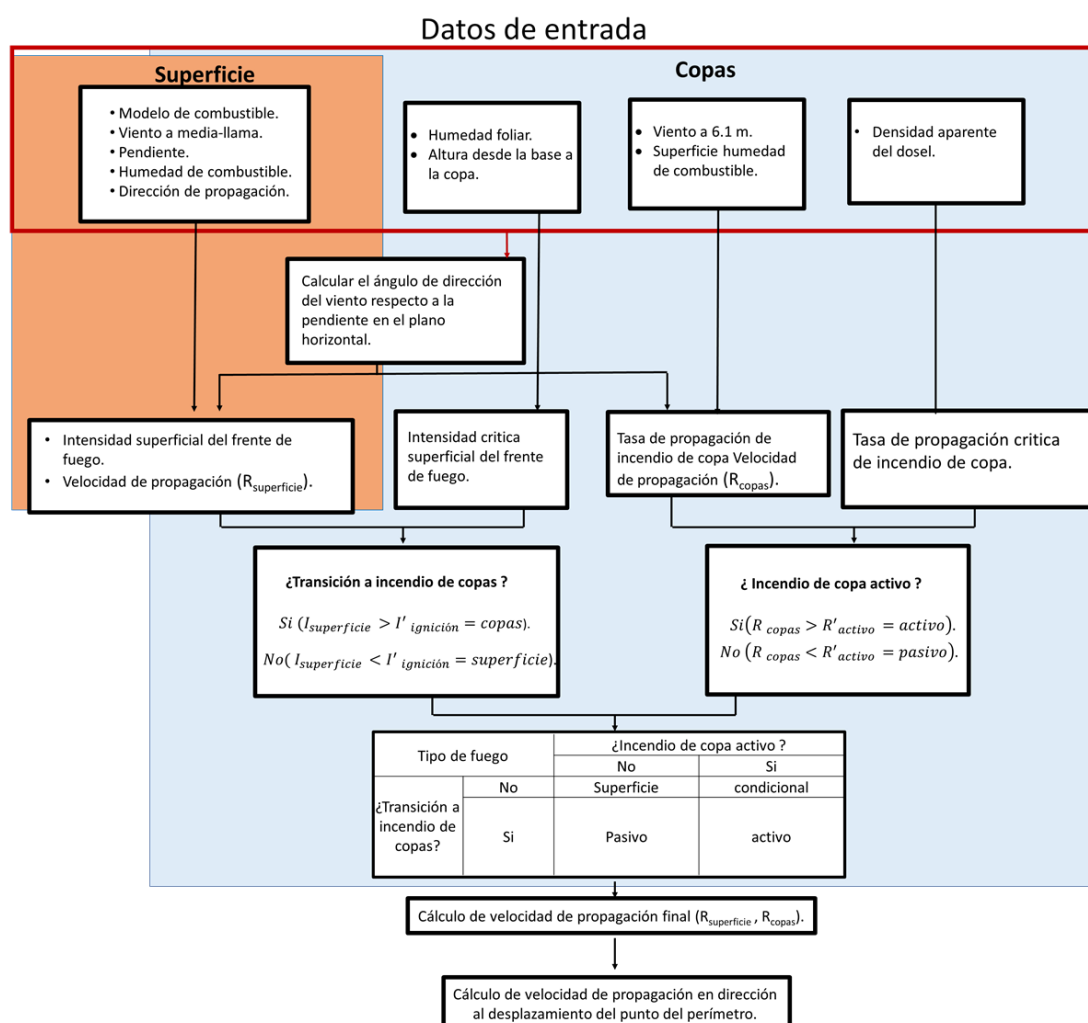


Figura A 37. Esquema del procedimiento matemático que debe realizarse en cada uno de los puntos del perímetro.

Modelar la propagación del fuego espacial y temporalmente es uno de los objetivos principales de la evaluación de la amenaza ante un incendio forestal, por consiguiente, en las siguientes secciones se revisarán los conceptos y modelos matemáticos usados dentro de la metodología.

Velocidad de propagación de incendios de superficie

La modelación de la propagación del incendio de superficie está fundamentada en el modelo semi-empírico de Rothermel (1972) y ajustado por Albini (1976). El principio de conservación de energía es aplicado a un volumen unitario de combustible que se encuentra delante de un incendio que avanza constantemente sobre un lecho de combustible homogéneo (Rothermel, 1972). La tasa de propagación es entonces una relación entre el flujo de calor recibido de la fuente y el calor requerido para la ignición del combustible (Zárate, 2004). La representación matemática de la tasa de propagación no ha sido resuelta analíticamente, por lo cual se usan métodos experimentales para establecer los términos desconocidos, así como simplificar el modelo con los siguientes supuestos (Andrews, 2018):

- Se asume un frente de llama lineal y se calcula la velocidad de propagación de un incendio con o sin viento o pendiente.
- El modelo es para el fuego ardiendo cuesta arriba con el viento, a través de un combustible uniforme.
- El combustible es una mezcla de varias clases de tamaño de combustible vivo y muerto, con una sola profundidad representativa.
- El modelo requiere la presencia de combustible muerto fino, que es el componente del combustible más influyente.
- El modelo solo considera combustible que se encuentre en el estrato de superficie hasta aproximadamente 2 metros sobre suelo; el combustible de superficie puede incluir arbustos y árboles pequeños.
- El modelo fue diseñado para utilizar datos de combustible, humedad y topografía que deben estar disponibles antes de que se simule la ignición.
- El modelo no es aplicable para: fuego de copas en árboles, combustión ardiente (combustión sin llamas que es más lenta y presenta temperaturas más bajas), combustión de material después de que ha pasado el frente del incendio.
- El modelo de Rothermel puede ser usado en conjunto con otros modelos (para determinar la longitud de la llama, humedad del combustible, combustible, viento, dirección de propagación, etc.).

La Ecuación 91 representa la tasa de propagación del frente del fuego para vientos ascendentes en la dirección de la pendiente. El numerador simboliza la cantidad de calor transferida al combustible, mientras que el denominador representa la cantidad de calor requerida para llevar este combustible a la temperatura de ignición (Malen, 2009). La definición de los componentes de la ecuación de propagación de incendios de superficie del modelo de Rothermel se presentan en la Tabla A 9.

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad 91$$

Tabla A 9. Definición de los componentes de la ecuación de propagación de incendio de superficie del modelo de Rothermel.
Fuente: (Zárate, 2004)

Nombre	Símbolo	Unidades	Explicación
Velocidad de propagación	R	(m/min)	Frente llameante de un fuego superficial.
Intensidad de la reacción	I_R	(KJ/min/m ²)	Tasa de liberación de energía por unidad de área de frente de fuego.
Relación de flujo de propagación	ξ	Fracción	Proporción de intensidad de reacción que calienta las partículas de combustible adyacentes a la ignición (sin viento).
Factor de viento	Φ_w	Fracción	Multiplicador adimensional que representa el efecto del viento en el aumento de la relación de flujo de propagación.
Factor de pendiente	Φ_s	Fracción	Multiplicador adimensional que representa el efecto de pendiente en el aumento de la relación de flujo de propagación.
Densidad aparente	ρ_b	Kg/m ³	Cantidad de combustible seco al horno por metro cúbico de lecho de combustible.
Número de calentamiento efectivo	ε	Fracción	Proporción de una partícula de combustible que se calienta a la temperatura de ignición en el momento en que comienza la combustión en llamas.
Calor de preignición	Q_{ig}	KJ/Kg	Cantidad de calor requerida para encender un kilogramo de combustible.
Flujo de propagación sin-viento, sin-pendiente	$I_R \xi$	(KJ/min/m ²)	Tasa de liberación de calor de un incendio al combustible por delante del fuego, sin viento ni pendiente.
$(1+\Phi_w+\Phi_s)$	-	Adimensional	Aumento del flujo de propagación sin viento y sin pendiente debido al viento y la pendiente.
Fuente de calor	$I_R \xi (1+\Phi_w+\Phi_s)$	(KJ/min/m)	Flujo de propagación.
Calor requerido para la ignición del combustible	$\rho_b \varepsilon Q_{ig}$	KJ/m ³	-
Tasa de propagación sin-viento, sin-pendiente	$I_R \xi / \rho_b \varepsilon Q_{ig}$	(m/min)	-

La determinación de los componentes presentados deriva una serie de cálculos adicionales que fueron implementados en el modelo, los cuales se muestran en la Figura A 38 en forma de diagrama de flujo. Para el modelo Rothermel los parámetros intrínsecos a las características del lecho de combustible son asignados a modelos de combustible estandarizados (Anderson, 1982; Scott & Burgan, 2005).

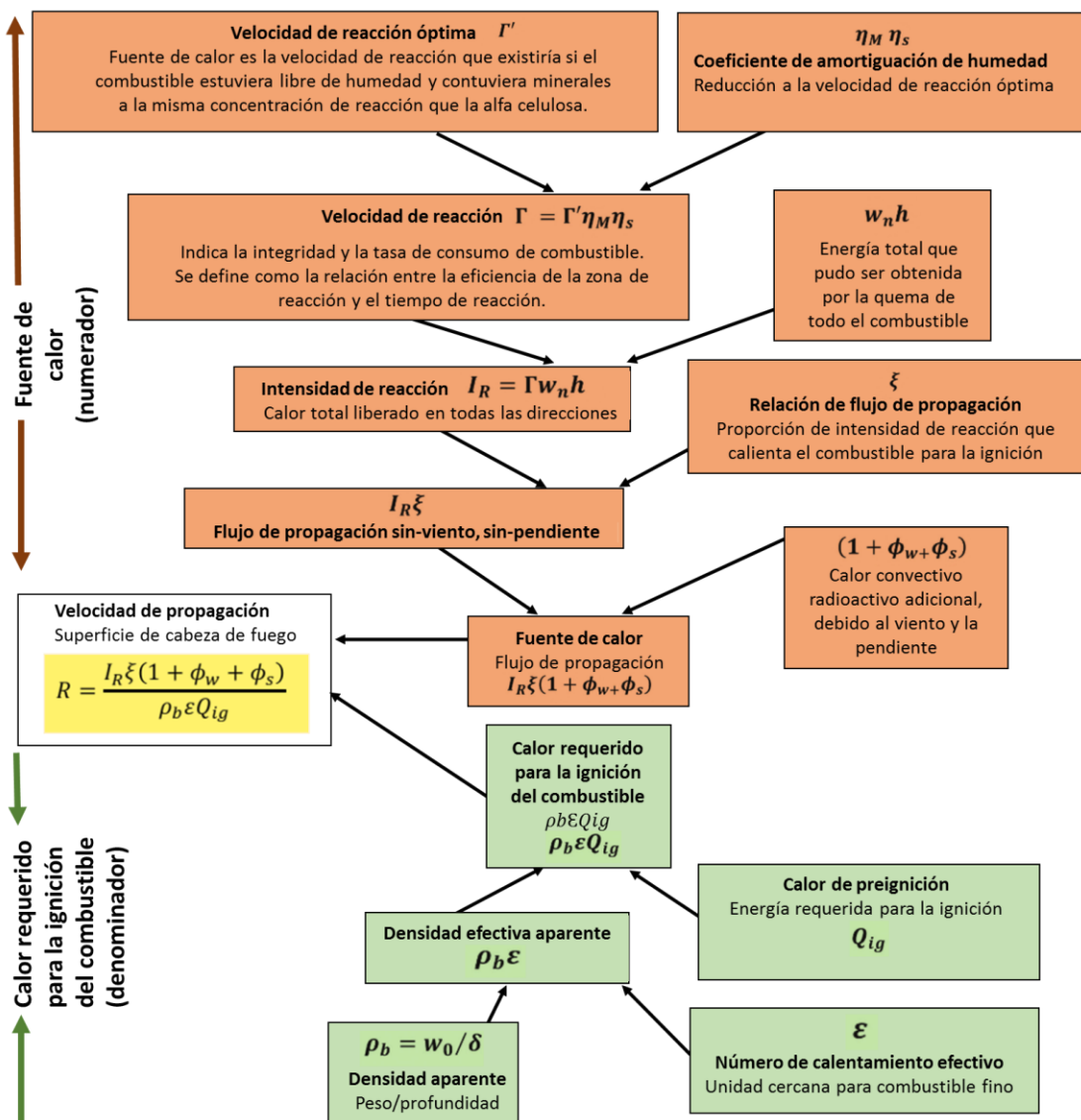


Figura A 38. Diagrama de flujo del cálculo de velocidad de propagación del modelo de Rothermel. Fuente: Este esquema fue adaptado de (Andrews, 2018)

Velocidad de propagación de incendios de copas

Un incendio de superficie puede hacer la transición a algún tipo de incendio de copas (pasivo, activo o condicional), dependiendo de la intensidad del incendio de superficie y las características propias de las copas de los árboles (Seli et al., 2019). Un *incendio pasivo de copas* es aquel que se desarrolla principalmente como un incendio de superficie y que a medida que avanza enciende intermitentemente las ramas y follaje de pequeños grupos de árboles, pero no puede mantener una llama sólida en la copa por mucho tiempo (Wooten, 2001). Por otro lado, un *incendio activo de copas* se entiende como un incendio en donde todo el complejo de combustible está envuelto en llamas, es decir, el dosel de los árboles es consumido como una unidad, pero el movimiento del fuego a través de las copas de los árboles

sigue dependiendo del calor liberado por el combustible de superficie para una propagación continua. Existe un tipo de fuego hipotético en el que se cumplen las condiciones requeridas para el fuego de copas activo sostenido, pero no las condiciones requeridas para su ignición. Otro tipo depende del desarrollo activo del incendio de copas y de las condiciones precedentes (si se ha iniciado o no el incendio) del entorno y es considerado como un *incendio condicional* (Scott, 2007).

La metodología para evaluar la amenaza de incendios de copas sigue los lineamientos propuestos por Scott & Reinhardt (2001), quienes proponen evaluar el potencial del incendio de copas vinculándolo con el modelo de superficie, así como generar una transición entre ambos. Rothermel (1991) relacionó, a través de una regresión lineal, las velocidades observadas de propagación de incendios de copas con su modelo de superficie utilizando los parámetros del modelo de combustible de superficie FM10 (carga alta de ramas y tallos bajo arbolado) y considerando la velocidad del viento a media llama como el 40% de la velocidad observada a 6,1 m (Anderson, 1982; Rothermel, 1991; Scott & Reinhardt, 2001). La correlación se muestra a continuación:

$$R = 3.34 \left(\frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \right)_{FM10} \quad 92$$

Determinación del tipo de incendio forestal

El inicio del incendio de copas se da cuando el follaje de las copas de los árboles pierde su humedad y es llevado a temperatura de ignición debido al calor generado por el fuego de superficie. La intensidad y velocidad crítica del frente del fuego a la cual un incendio de copas se inicia ($I'_{inicial}$) se muestran en las Ecuaciones 93 a 95 (Wagner, 1977).

$$I_{superficie} = I_R \left(\frac{384}{\sigma} \right) \quad I'_{inicial} = \left(\frac{CBH(460 + 25.9FMC)}{100} \right)^{\frac{3}{2}} \quad 93$$

$$R_{superficie} = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad R'_{inicial} = \frac{60I'_{inicial}}{HPA} \quad 94$$

$$R_{copas} = 3.34 \left(\frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \right)_{FM10} \quad R'_{activo} = \frac{3.0}{CBD} \quad 95$$

Tabla A 10. Parámetros de entrada para las ecuaciones de copas.

Variable	Descripción
CBH	Altura desde la base hasta el inicio de la copa del árbol
HPA	Calor liberado por unidad de área
FMC	Contenido de humedad foliar
CBD	Densidad aparente del dosel
CFL	Carga de combustible de copas
$I'_{inicial}$	Intensidad de la línea de fuego crítica para iniciar un incendio de copas
$I_{superficie}$	Intensidad del fuego superficial

Variable	Descripción
I_R	Intensidad de la reacción
$R_{superficie}$	Velocidad de propagación para un incendio de superficie
ξ	Relación de flujo de propagación
ϕ_w	Coefficiente del viento
ϕ_s	Factor de la pendiente
ρ_b	Densidad aparente del lecho de combustible seco
ϵ	Número de calentamiento efectivo
Q_{ig}	Calor de preignición
R	Velocidad de propagación hacia adelante
$R'_{inicial}$	Velocidad de propagación crítica para iniciar un incendio de copas
R'_{activo}	Velocidad de propagación crítica para mantener un incendio de copas activo
σ	Relación superficie / volumen de las partículas de combustible

Una vez se inicia el incendio de copas, este puede pasar de pasivo a activo si una tasa crítica de flujo de masa horizontal de combustible en la zona de llamas es superada. Esto significa que el dosel de los árboles debe contar con una densidad suficiente para que se pueda transportar el fuego entre las copas. A partir de una tasa crítica de flujo constante e igual a $0.05 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$ se calcula la velocidad crítica (R'_{activo}) de propagación para que se dé un incendio de copas activo (ver Ecuación 95) (Wagner, 1977).

Para que se dé un incendio de copas activo dos criterios deben cumplirse, primero un fuego generado en la superficie con suficiente intensidad debe encender las copas de los árboles ($I_{superficie} > I'_{inicial}$), si este criterio no se cumple el fuego se seguirá propagando en superficie. En segundo lugar, si se puede iniciar el incendio de copas, la tasa de propagación potencial del fuego de copas debe ser suficiente para que se mantenga el flujo de masa horizontal ($R_{copas} > R'_{activo}$) (Wagner, 1977). Si este criterio no se cumple, el fuego seguirá encendiendo los árboles individualmente pero no podrá propagarse. En la Figura A 39 se describe el proceso de clasificación del incendio forestal.

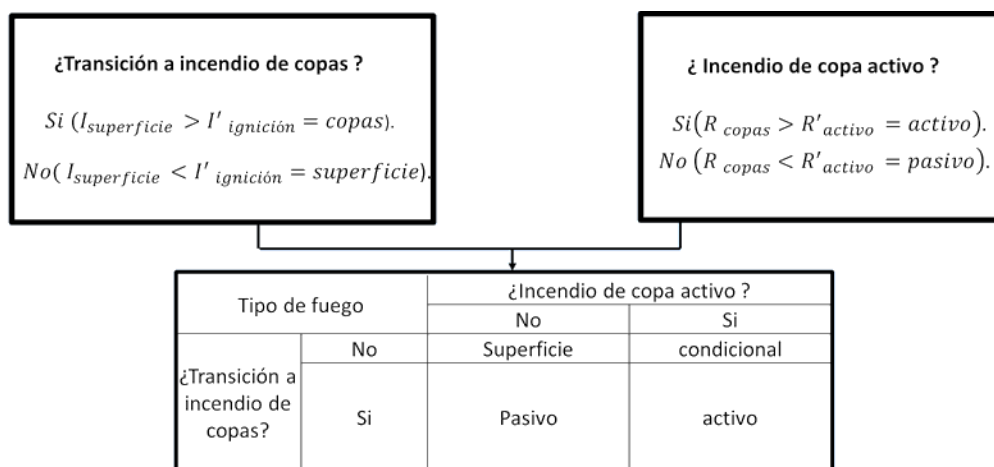


Figura A 39. Clasificación del incendio forestal.

Velocidad general de propagación

Después del proceso anterior, donde se calculó la velocidad de propagación de superficie y la velocidad de copas, es necesario relacionar estos dos resultados para determinar la velocidad general de propagación del incendio. Esto se logra mediante la Ecuación 96.

$$R_{final} = R_{superficie} + CFB(R_{activo} - R_{superficie}) \quad 96$$

Donde, CFB es la fracción quemada de copas, y dependiendo de su valor, se puede establecer si el incendio es solo de superficie, o si es de copas pasivo o activo. En caso tal que no exista vegetación con altura de copas, el CFB será 0 y la velocidad final de propagación será igual a la de superficie.

Fracción quemada de copas (CFB)

El CFB (Crown Fraction Burned) es una fracción de las copas de los árboles que han sido consumidas por el fuego, su rango varía entre 0 y 1 (Scott et al., 2001; CWFIS, 2020). Es un concepto teórico usado para modelar y clasificar los incendios de copas en pasivo, activo o independiente (poco probable). El incendio es pasivo cuando el CFB se encuentra entre 0.1 y 0.9, es activo si el valor del CFB supera 0.9, y es independiente generalmente al tener valores cercanos a 1. Cuando el valor es 0 indica que es un incendio de superficie (Scott et al., 2001; 2006; NWCG, 2019; CWFIS, 2020). En la Tabla A 11 se resumen las ecuaciones usadas para el cálculo del CFB.

Tabla A 11. Ecuaciones para el cálculo del CFB.

Referencia	Ecuación	
Scott et al. (2001)	$CFB = \frac{(R_{superficie} - R_{inicial})}{(R_{sa} - R_{inicial})}$	Lineal
Van Wagner (1989)	$CFB = 1 - e^{(-0.23(R_{superficie} - R_{inicial}))}$	Exponencial
Scott et al. (2001)	$CFB = 1 - e^{\left(-\left(\frac{-\log 0.1}{0.9(R_{activo} - R_{inicial})}\right) * (R_{superficie} - R_{inicial})\right)}$	Farsite

Donde, $R_{superficie}$ es la velocidad de propagación para un incendio de superficie, $R_{inicial}$ es la velocidad de propagación crítica para iniciar un incendio de copas, R_{activo} es la velocidad de propagación para un incendio de copas completamente activo, y R_{sa} es la velocidad de propagación de fuego superficial prevista correspondiente a las condiciones ambientales para las cuales $R_{activo} = R'_{activo}$, con R'_{activo} como la velocidad de propagación crítica para mantener un incendio de copas activo (Scott et al., 2001).

Direcciones de propagación del fuego

El modelo de propagación de superficie de Rothermel fue desarrollado para estimar la extensión del fuego en función de la pendiente ascendente con el viento. Diferentes adaptaciones se han realizado para encontrar la tasa de máxima propagación, intensidad de la línea de fuego y la longitud de la llama, cuando el viento no se encuentra soplando en dirección de la pendiente ascendente y se extiende en direcciones distintas al máximo (Andrews, 2018; Finney, 2002). En la Tabla A 12 se presentan las diferentes variables utilizadas en la propagación del fuego:

Tabla A 12. Parámetros de entrada para las ecuaciones de dirección de propagación. Ajustado de (Andrews, 2018).

Variable	Descripción
R_0	Velocidad de propagación, sin viento ni pendiente
ϕ_w	Factor de viento
ϕ_s	Factor de pendiente
$\beta, \beta_{op}, E, C, B$	Valores intermedios usados para calcular la velocidad efectiva del viento
H_A	Calor por unidad de área
t	Tiempo transcurrido
ω	Dirección del viento
γ	Dirección desde el punto de ignición
ψ	Dirección normal al perímetro del incendio

Comportamiento del incendio en dirección diferente a la máxima propagación

La ecuación básica de propagación de superficie asume que el efecto del viento y la pendiente van en la misma dirección.

$$R = R_0(1 + \phi_w + \phi_s) = R_0 + R_0\phi_w + R_0\phi_s \quad 97$$

Para la modelación de la propagación del fuego, cuando el viento no sopla cuesta arriba se usa una suma de vectores como se presenta en la Figura A 40. Para un tiempo t , la pendiente del vector tiene magnitud D_s y dirección 0. El vector de viento tiene magnitud D_w en la dirección ω desde la pendiente ascendente.

$$D_s = R_0\phi_s t \quad 98$$

$$D_w = R_0\phi_w t \quad 99$$

El vector de la pendiente es $(D_s, 0)$ y del viento es $(D_w \cos \omega, D_w \sin \omega)$. El vector resultante es $(D_s + D_w \cos \omega, D_w \sin \omega)$. La magnitud del vector de cabeza del fuego es D_H en dirección α .

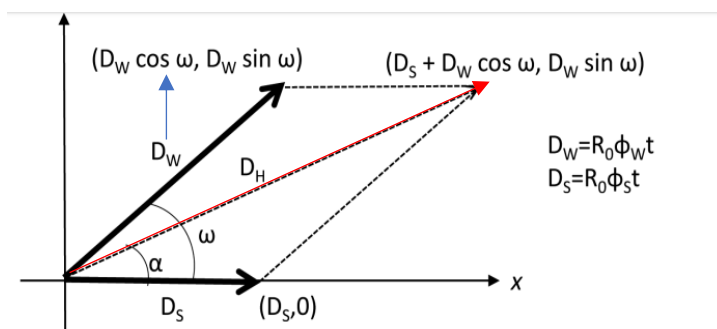


Figura A 40. Suma del vector para encontrar la velocidad de propagación de la cabeza de fuego cuando el viento no sopla cuesta arriba (Andrews, 2018).

$$D_H = (X^2 + Y^2)^{1/2} \quad 100$$

$$X = Ds + Dw \cos \omega \quad 101$$

$$Y = Dw \sin \omega \quad 102$$

La dirección de máxima propagación, relativa a la pendiente ascendente es:

$$\alpha = \sin^{-1}(|Y|/D_H) \quad 103$$

La velocidad de propagación en la dirección α (máxima propagación) es:

$$R_H = R_0 + D_H/t \quad 104$$

El factor de viento efectivo (φ_E) en la dirección de máxima propagación es calculada a partir de:

$$R_H = R_0(1 + \varphi_E) \quad 105$$

$$\varphi_E = (R_H/R_0) - 1 \quad 106$$

La velocidad del viento efectiva en dirección de la máxima propagación esta asociada al factor de viento efectivo.

$$U_E = \left[\varphi_E (\beta/\beta_{op})^E / C \right]^{-B} \quad 107$$

Propagación del fuego desde un solo punto de ignición

La propagación de un incendio cuando su ignición es un solo punto, se asume como una forma elíptica con el fuego avanzando constantemente a través del tiempo (Andrews, 2018; Bova et al., 2016). La dirección de propagación máxima y la velocidad de propagación en esa dirección se describen en la Figura A 41.

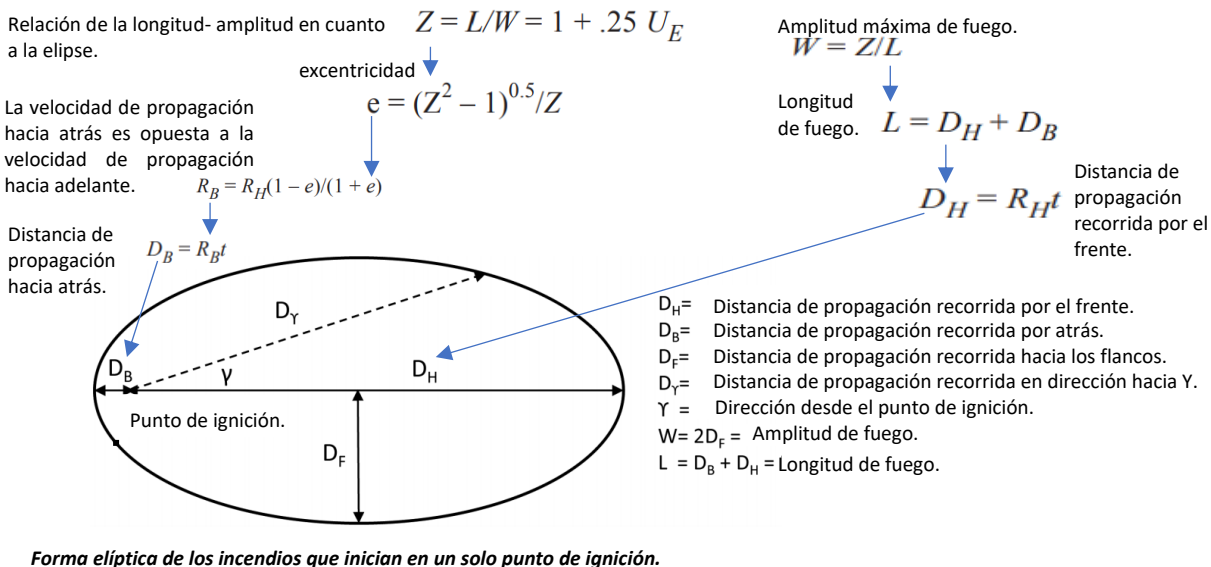
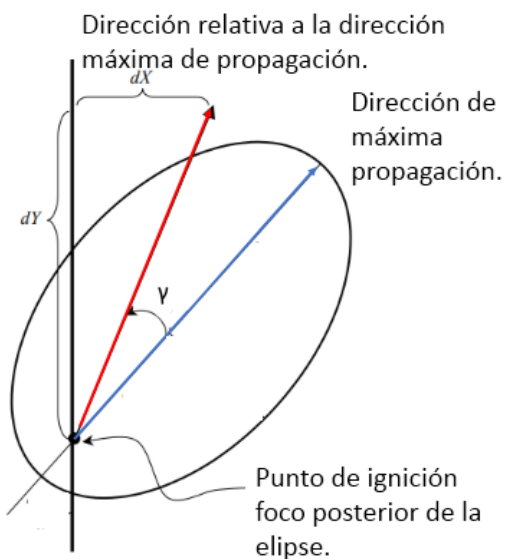


Figura A 41. Fuego propagado desde un solo punto de ignición. Ajustado de (Andrews, 2018).

Finalmente la velocidad de propagación desde un punto de ignición relativa a la dirección de máxima propagación (R_Y) es:



$$R_Y = R_H \frac{(1 - e)}{(1 + e * \cos \gamma)}$$

108

Figura A 42. Velocidad de propagación desde un punto de ignición relativa a la dirección de máxima propagación. Fuente: (Finney, 2002)

Simulación de la propagación del incendio

La propagación de los incendios se realiza tomando como base el software de código libre Tirailleur, que permite modelar la expansión de un incendio forestal; sin embargo, es necesario combinarlo con otros mecanismos como la función de Rothermel para obtener una tasa de propagación y así obtener un comportamiento realista de la expansión del fuego (Tirailleur, 2012). La Figura A 43 muestra la expansión del área activa del incendio.

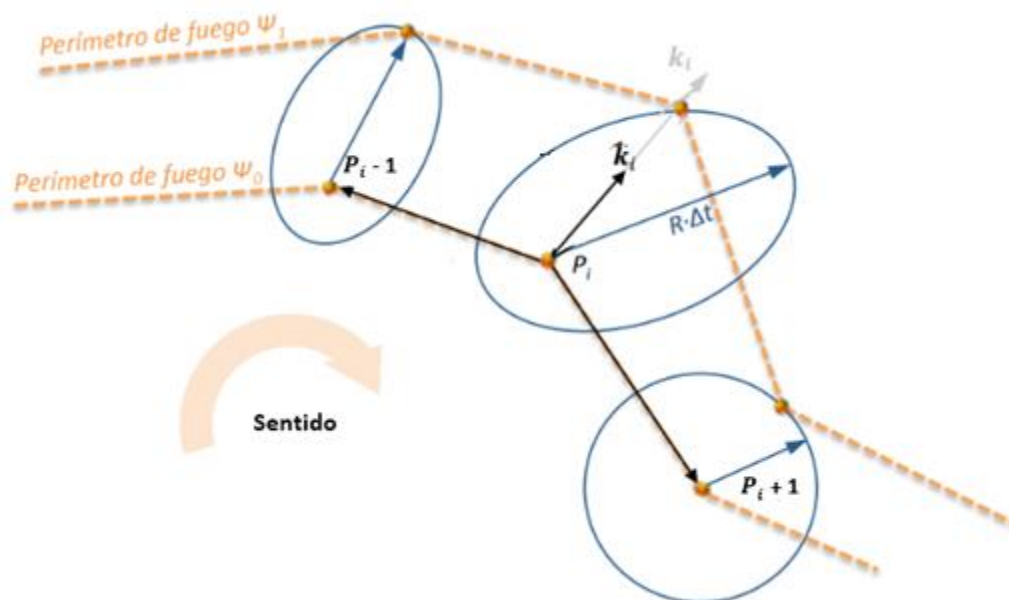


Figura A 43. Expansión del área activa de fuego. Fuente: Adaptada de (Torazza, 2014)

En la Figura A 44 se puede observar un ejemplo de modelación de un incendio forestal con una duración de 20 horas, sobre una base de información de combustible usada para fines de prueba. En color amarillo se ve el inicio del incendio y cada polígono representa el avance con una diferencia de 2 horas hasta llegar a la línea roja correspondiente a 20 horas.

La simulación muestra como el perímetro del incendio puede avanzar libremente a medida que transcurre el tiempo si no encuentra ninguna restricción, pero al llegar a un tipo de combustible que no es inflamable como el agua o roca, no se puede propagar en esa dirección. También, la influencia de la dirección del viento y la capacidad de combustión de cada tipo de combustible, puede generar que este sea más rápido o lento.

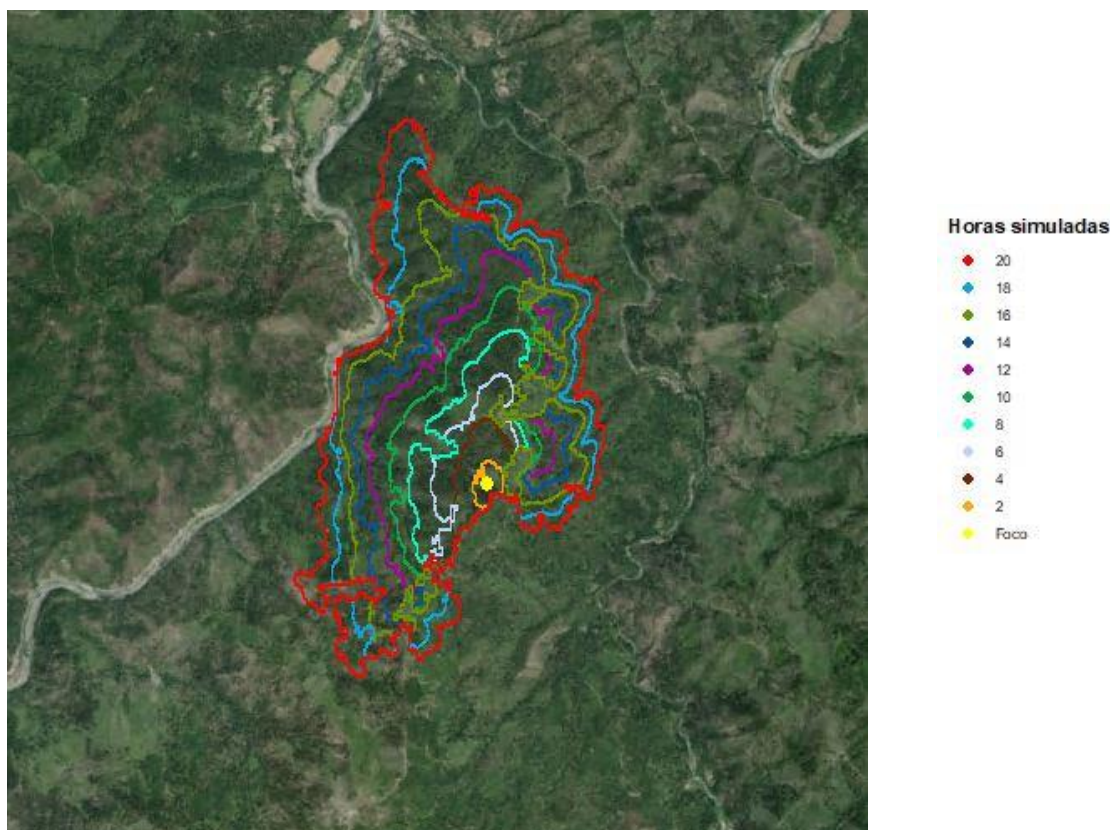


Figura A 44. Simulación de un incendio con una duración de 20 horas.

A. 3.4.7 Extinción

Para extinguir el incendio, se tiene en cuenta la humedad de la vegetación (parámetro de entrada para el cálculo de la velocidad de propagación) calculado a partir de las ecuaciones de Pech, Simard, McArthur, Anderson y Van Wagner que dependen de la temperatura y de la humedad relativa.

La metodología al calcular la velocidad de propagación de un punto con el modelo de Rothermel utiliza un parámetro del combustible llamado humedad de extinción, que por definición es: “la humedad a la cual el combustible muerto ya no puede soportar la propagación de un incendio de superficie”. En este sentido, con el cambio en las variables climáticas, la humedad de la vegetación se puede comparar con la humedad de extinción, de manera que si la primera es superior no habrá propagación ni intensidad de reacción y se dará por terminado el incendio en ese punto.

Otro factor que se tiene en cuenta es la velocidad del viento, si esta es menor al Índice de Superficie (Surfacing Index), el cual es la velocidad del viento en la que el fuego activo de copas se apaga (Scott and Reinhardt, 2001), también se dejará de propagar el incendio en ese punto.

Adicionalmente si de todos los puntos que conforman el perímetro exterior, ninguno se puede desplazar en un momento determinado por la presencia de barreras no combustibles, se entiende que se dejó de propagar todo el incendio y se procede a finalizar la simulación.

También se tiene la opción de realizar la simulación hasta un número determinado de horas del evento y de esta manera observar cómo y hasta dónde se propagó el incendio en esa duración definida.

A.3.5 Valoración económica de los servicios ecosistémicos que presta la vegetación susceptible a incendios forestales

Para cuantificar las pérdidas generadas al momento de exponer la vegetación a los escenarios que definen la amenaza por incendios forestales, se realiza una valoración económica de los servicios ecosistémicos que dicha vegetación presta. Estos servicios no son proporcionados por la vegetación como unidades sino que son el resultado del engranaje complejo de relaciones que existen entre las distintas comunidades de organismos vivos y el medio ambiente (CONABIO, 2019).

Debido a que el valor de la vegetación no puede ser capturado por los mercados comerciales ni cuantificado adecuadamente en términos de área y producción como un stock de capital, es necesario considerar los servicios ecosistémicos como un flujo de materiales, energía e información entre el capital natural (plantas, minerales, animales, aire etc.) que combinado con el capital humano (personas) y manufacturado (máquinas e infraestructura) generan bienestar humano (Costanza et al., 1997). En consecuencia, los servicios ecosistémicos se definen como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y su valor es, por tanto, la contribución relativa de los ecosistemas al bienestar humano (Costanza et al., 2014). El valor económico de los servicios ecosistémicos puede entenderse como el valor monetario necesario para compensar los impactos generados por la no prestación de estos servicios o como el costo de replicarlos en una biosfera artificial (Costanza et al., 1997, 2014).

Costanza et al. (1997) estimaron el valor de 17 servicios ecosistémicos para 16 biomas y generaron un valor global agregado expresado en unidades monetarias. Posteriormente Groot et al. (2012) estimó el valor monetario de los servicios ecosistémicos proporcionados por 10 biomas principales basados en estudios de casos locales en todo el mundo que fueron recopilados en *La Base de Datos de Valoración de Servicios Ecosistémicos- ESVD* (Ecosystem Services Value Database), la cual cuenta con más de 1350 puntos de información y más de 300 ubicaciones de casos de estudio. A partir de las estimaciones de Groot et al. (2012), Costanza et al. (2014) actualizó el valor global agregado de los servicios ecosistémicos y evaluó los cambios entre las estimaciones realizadas en 1997 y 2012.

Los valores de los servicios ecosistémicos contenidos en la ESVD se han reportado en múltiples métricas y monedas para diferentes periodos de tiempo. Para ayudar a la comparación y agregación directa de estos valores, los avalúos fueron estandarizados a unidades espaciales, temporales y monetarias comunes, por ejemplo dólares internacionales de 2007 por hectárea por año (Int \$ / ha / año) (Groot et al., 2012).

En la siguiente figura se muestra cómo cambia el rango de los valores de los servicios ecosistémicos reportados en la ESVD por tipo de bioma, que puede ser atribuido al método de valoración utilizado o al lugar en donde se realizó la estimación.

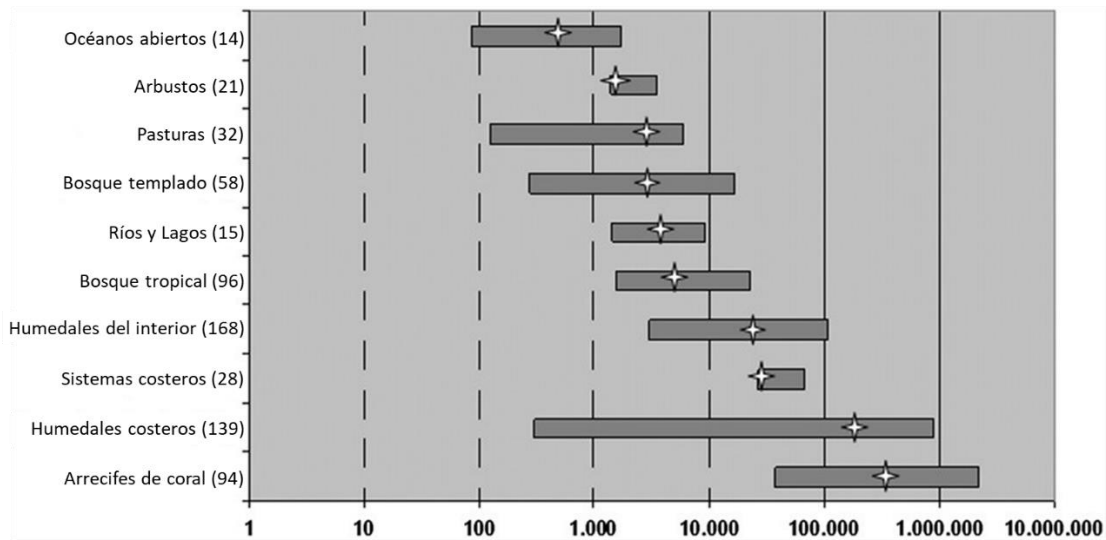


Figura A 45. Rango y promedio (estrella) del valor de los servicios ecosistémicos por bioma (en int. \$ / Ha / año, 2007). El número total de valores por bioma utilizados está entre paréntesis Fuente: (Van der Ploeg et al., 2010)

Para calcular el valor expuesto total de la vegetación se utiliza la transferencia básica de beneficios. Esta técnica, utilizada en Costanza et al. (1997) y Groot et al. (2012), asume un valor unitario constante por hectárea de tipo de ecosistema. Los valores unitarios reportados en Costanza et al. (2014) son el promedio de las estimaciones mostradas en la Figura A 45.

Para obtener el valor de los servicios ecosistémicos de cada clase se debe establecer un Factor de Restauración. Este factor es un elemento necesario para definir en un año cuántas son las pérdidas que puede ocasionar un incendio forestal. Al tener valores expuestos por hectárea anual es necesario ajustar estos valores para cada clase, ya que los tiempos de recuperación ante un evento de incendio varían entre una y otra. El Factor de Restauración se puede entender como un porcentaje del año en el que se prestan los servicios ecosistémicos. Por ejemplo, para la clase de cultivos que tienen dos fechas de siembra en el año, si ocurre un incendio en una de las siembras, la producción de esa siembra no se completa y se asocia a un Factor de Restauración del 50% en esa zona. Por otro lado, para que las pasturas vuelvan a crecer y recuperarse se demoran entre 3 a 4 meses (González et al., 1994, Baker, 2020) lo que implica que la prestación de los servicios ecosistémicos de las pasturas puede restaurarse en menos de un año, por lo tanto, se tomó un Factor de Restauración del 33%. Por el contrario, la capacidad de los bosques para retornar a su estado natural antes del incendio es prolongada y toma más de un año (Chen et al., 2014, Barzola, 2017, Costa et al., 2017), por esto aplica un Factor de Restauración de 100%.

A. 3.6 Procedimiento para el cálculo de riesgo

Al realizar la evaluación de riesgo por escenarios, los eventos de sequía o incendio valorados se organizan en una gráfica de pérdida vs. tiempo, como se muestra en la Figura A 46. Al establecer una pérdida económica p , se puede identificar en la gráfica todos los eventos cuyas pérdidas exceden p . Los tiempos entre eventos ($T_1, T_2, \dots, T_{1n}$) también se estiman a partir de la Figura A 46 y se usan para estimar el parámetro λ de una distribución exponencial, la cual corresponde a la distribución de probabilidad del tiempo entre eventos de un proceso de Poisson. Además, este parámetro de la distribución exponencial tiene la particularidad de ser el mismo λ que define el proceso de Poisson completamente (i.e. es la misma

tasa de excedencia, $\lambda = v(p)$). Para el caso de la evaluación prospectiva del riesgo por sequía, la ventana de tiempo considerada para calcular λ es igual al número de simulaciones estocásticas de las series climáticas, y en este caso es de 1,000 años equivalentes.

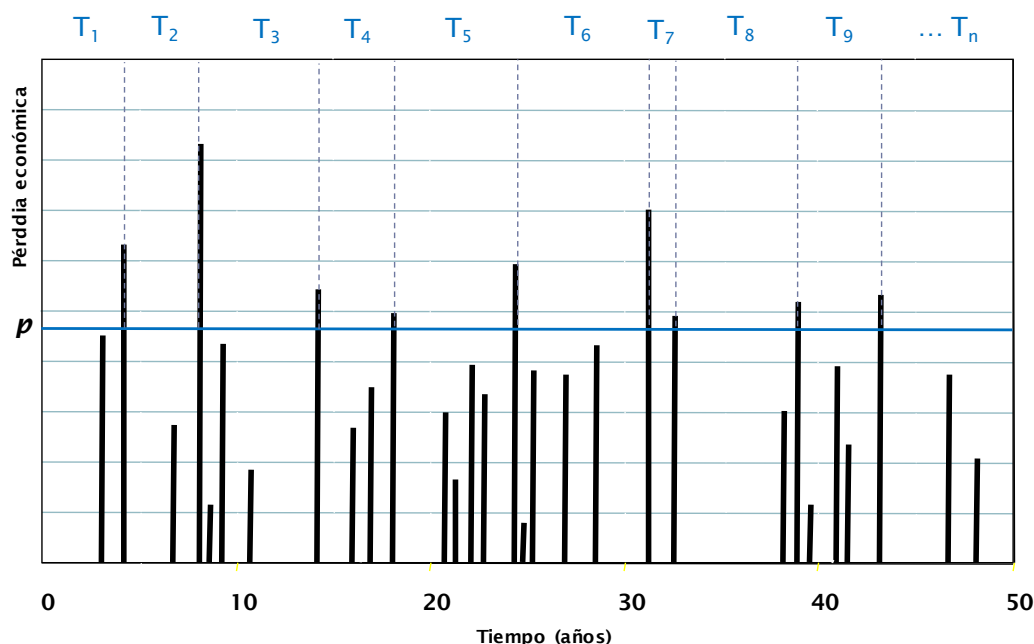


Figura A 46. Pérdidas por evento en una ventana amplia de tiempo

La tasa de excedencia poblacional (λ) es estimada mediante la tasa de excedencia empírica (Λ) de la siguiente manera:

$$\Lambda = \frac{n-1}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad 109$$

En donde n es el número de eventos que superan la pérdida p y T_i son los tiempos observados. Este estimador cumple con los cuatro criterios estadísticos de calidad de la estimación de parámetros de distribuciones de probabilidad: es no sesgado, de varianza mínima, consistente y suficiente. Ahora bien, es posible demostrar que el estimador Λ sigue una distribución de probabilidad *Gamma inversa* con parámetros n y $(n-1)\lambda$, a partir de lo cual se puede determinar su coeficiente de variación (CV) como:

$$CV = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \quad 110$$

El coeficiente de variación indica la relación entre la desviación estándar y la media de una variable aleatoria. Como se indica en la Ecuación 110, CV disminuye a medida que el número de datos (n) aumenta. La Ecuación 110 es una fórmula estándar, aplicable a cualquier problema de estimación del riesgo por eventos, en donde el CV de la tasa de excedencia varía con el tamaño de la muestra como se indica en la Figura A 47.

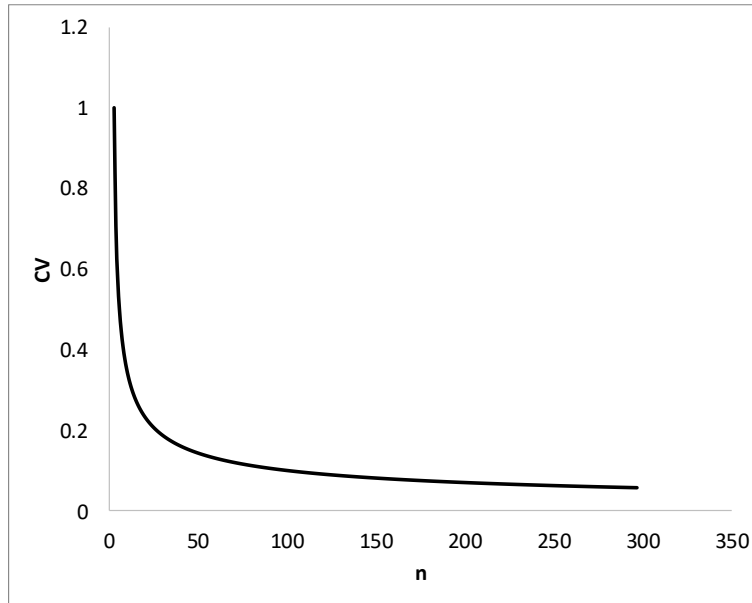


Figura A 47. Variación del coeficiente de variación de la tasa de excedencia con el tamaño de la muestra.

El CV crece rápidamente a medida que n disminuye. Esto quiere decir que, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas grandes (eventos catastróficos) a partir de pocos eventos modelados, para los cuales se contará con un valor pequeño de n (es decir, pocos eventos que exceden esa pérdida dentro del conjunto de escenarios de sequía), la dispersión de la estimación (i.e. su desviación estándar) es muy grande en comparación a la estimación misma, lo cual implica una mayor incertidumbre. Por el contrario, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas con un mayor número de eventos modelados, n será necesariamente un número más grande y, en consecuencia, la dispersión de la tasa disminuye a valores incluso despreciables en la práctica. Esto es por lo que, para que el resultado sea estadísticamente suficiente se debe hacer uso de un gran número de años simulados dentro de los cuales se pueda identificar un número considerable de eventos de sequía.

A. 3.6.1 Curva de excedencia de pérdidas

Como se mencionó anteriormente, la tasa de excedencia es igual al parámetro λ que define la ocurrencia en el tiempo de los eventos de pérdida, es decir:

$$v(p) = \frac{n_p - 1}{\sum_{i=1}^{n_p} T_i} \quad 111$$

en donde p es la pérdida económica, $v(p)$ es su tasa anual de excedencia, n_p es el número total de eventos en los cuales se supera p y T_i es el tiempo i entre eventos que superan p . El periodo de retorno $Tr(p)$ se calcula como el inverso de la tasa de excedencia $v(p)$.

$$Tr = \frac{1}{v(p)} \quad 112$$

El periodo de retorno es el valor esperado del tiempo entre eventos. Es decir, corresponde al periodo de tiempo promedio para el cual, considerando una ventana temporal de observación suficientemente amplia, se verá igualada o excedida una pérdida dada, y se muestra en el eje vertical de la derecha de la curva ejemplo mostrada en la Figura A 48.

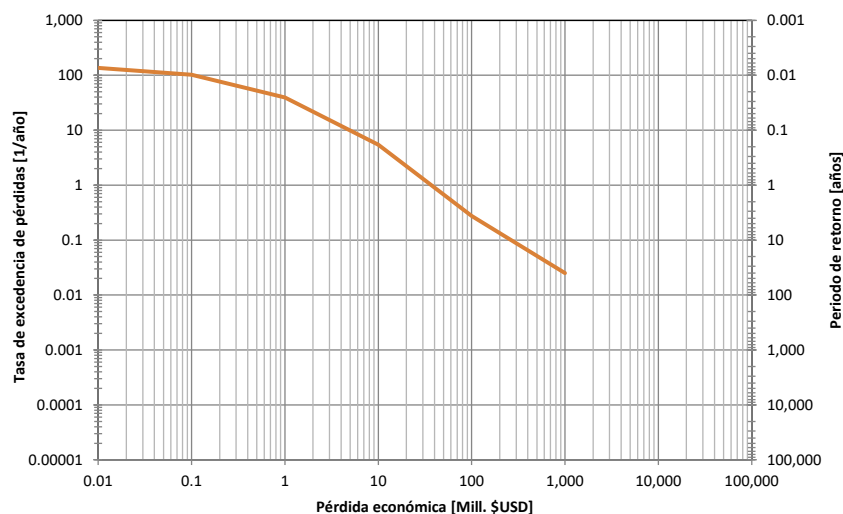


Figura A 48. Ejemplo de curva de excedencia de pérdidas. El eje vertical muestra la tasa de excedencia (izquierda) y su valor inverso o periodo de retorno (derecha). El eje horizontal muestra la pérdida asociada.

El cálculo de la Ecuación 111 corresponde a la estimación de la tasa de excedencia de las cuantías de pérdida que ocurren en todos los elementos expuestos para todos los eventos potencialmente nocivos incluidos en el modelo de amenaza (el conjunto de escenarios estocásticos de sequía o incendio previamente identificados).

A. 4 INCORPORACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

Existe una amplia gama de posibilidades para reducir el riesgo. Por ejemplo, en problemas de riesgo de inundaciones, el uso de defensas contra inundaciones es una práctica común. Sin embargo, no es la única posibilidad disponible. La mejor combinación de alternativas de reducción de riesgos es, en general, bastante difícil de obtener sin arbitrariedad.

La curva de excedencia de pérdidas, entre muchas propiedades interesantes, se puede estratificar para definir un conjunto de intervenciones para reducir el riesgo. Cada intervención afecta la curva de forma diferente, construyendo una estrategia de gestión de riesgos. El panorama de riesgos se modifica cuando se aplica una estrategia de mitigación. La mejor manera de definir si una estrategia es lo suficientemente buena para reducir el riesgo es realizar la evaluación del riesgo, incluido su efecto. El objetivo es identificar un conjunto de alternativas de gestión de riesgos que sean altamente eficientes en la reducción de riesgos. Esto se logra aplicando Ingeniería de Control de Riesgos (RCE – Risk Control Engineering).

RCE es un marco metodológico diseñado específicamente para ayudar a los gobiernos, las instituciones y las partes interesadas del sector privado a cumplir los objetivos de resiliencia mediante la identificación del conjunto de alternativas de gestión de riesgos que son más eficientes para reducir el riesgo hasta un nivel esperado predefinido. El proceso de RCE se resume en la Figura A 50.

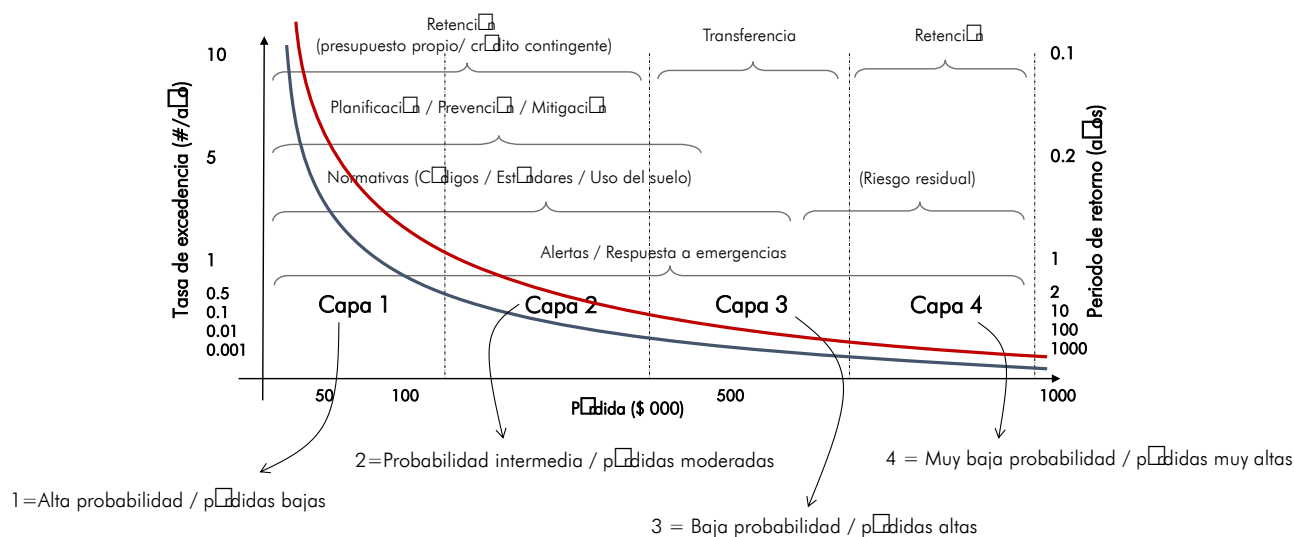


Figura A 49. Curva de excedencia de pérdidas estratificada para definir acciones para reducir el riesgo

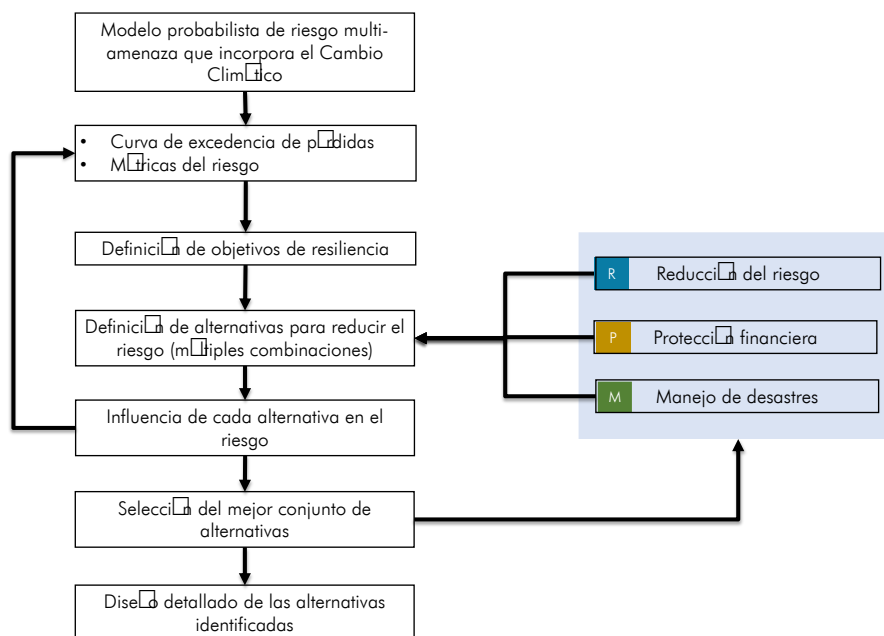


Figura A 50. Proceso de Ingeniería de Control del Riesgo

El objetivo de resiliencia se define como la reducción esperada del riesgo después de la aplicación de varias alternativas de gestión de riesgos. Esto significa que un objetivo de resiliencia es una nueva curva de excedencia de pérdidas, reducida del resultado de riesgo real a un nivel de riesgo aceptable (ver Figura A 51).

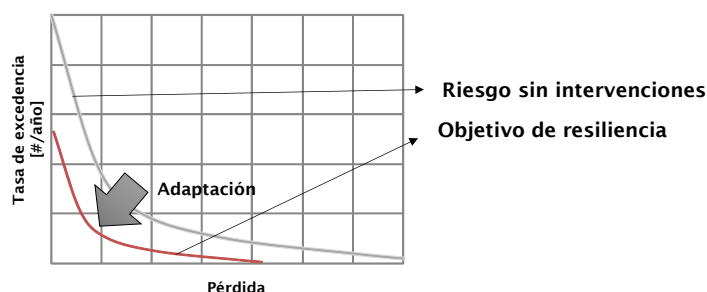


Figura A 51. Definición de un objetivo de resiliencia

Un objetivo de resiliencia se puede lograr mediante una combinación de muchas alternativas de gestión de riesgos. Las alternativas disponibles incluyen, entre otras: definición de estándares de construcción para nuevos edificios e infraestructura, implementación de obras de mitigación de control de peligros o reducción de vulnerabilidades, planificación del uso del suelo basado en riesgos, protección financiera, planes de respuesta a emergencias y sistemas de alerta temprana. La implementación de cualquiera de estas alternativas modificará el riesgo, de una manera que solo se puede conocer incorporándolo a los modelos de peligrosidad y riesgo y obteniendo nuevamente los resultados. Por ejemplo, la Figura A 52 muestra mapas de riesgo (en términos de PAE edificio por edificio) para Santa Fe, Argentina, con y sin ninguna modificación de las defensas perimetrales contra inundaciones de la ciudad. Las líneas negras en la Figura muestran la ubicación de los diques de defensa.



Figura A 52. Ilustración del efecto de diques de inundación mejorados en el centro de Santa Fe, Argentina. Izquierda: mapa de PAE con diques en el estado actual. Derecha: mapa de PAE con diques adaptados.

Una combinación de alternativas se define en términos de: (i) las alternativas consideradas; (ii) las capacidades de reducción de riesgos de cada alternativa; (iii) el costo de implementación de la combinación y; (iv) el impacto que tiene en la reducción del riesgo. La Figura A 53 ejemplifica una combinación de alternativas sobre una curva de excedencia de pérdidas.

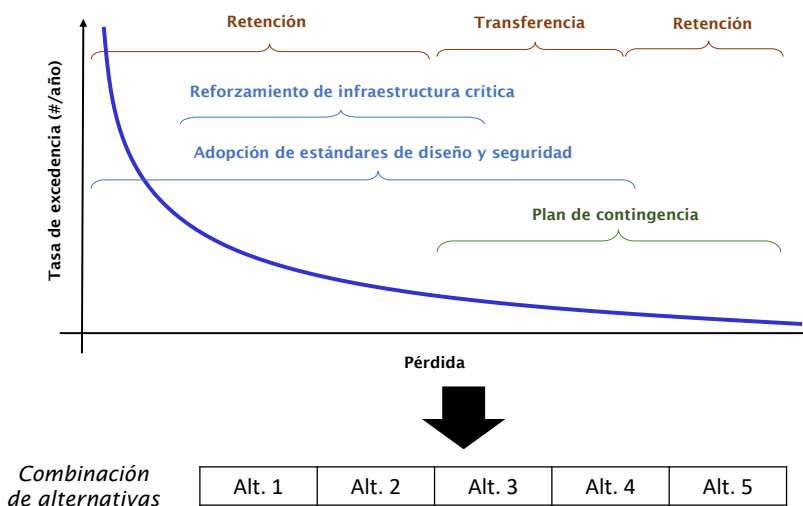


Figura A 53. Ejemplo de una combinación de alternativas Nótese que cada alternativa tiene un dominio de reducción de riesgo en términos del rango de pérdidas que reduce.

Se crean muchas combinaciones para identificar posibles estrategias que cumplen el mismo objetivo a diferentes costos. Las mejores alternativas se seleccionan a partir de un proceso de optimización en el que se seleccionan como campeones las combinaciones que mejor cumplen con el objetivo de resiliencia, al menor costo (es decir, las mejores relaciones costo / beneficio). A continuación, se resume el proceso de

optimización implementado dentro del marco RCE, que se basa en la programación evolutiva (algoritmos genéticos).

1. Se crean al azar combinaciones de alternativas para poblar la primera generación. Cada combinación se considera un individuo. El genotipo de un individuo es el conjunto de alternativas (ver Figura A 54). Tenga en cuenta que cada individuo tiene una capacidad diferente para alcanzar el objetivo de resiliencia. El que mejor cumple con el objetivo se considera el Campeón.

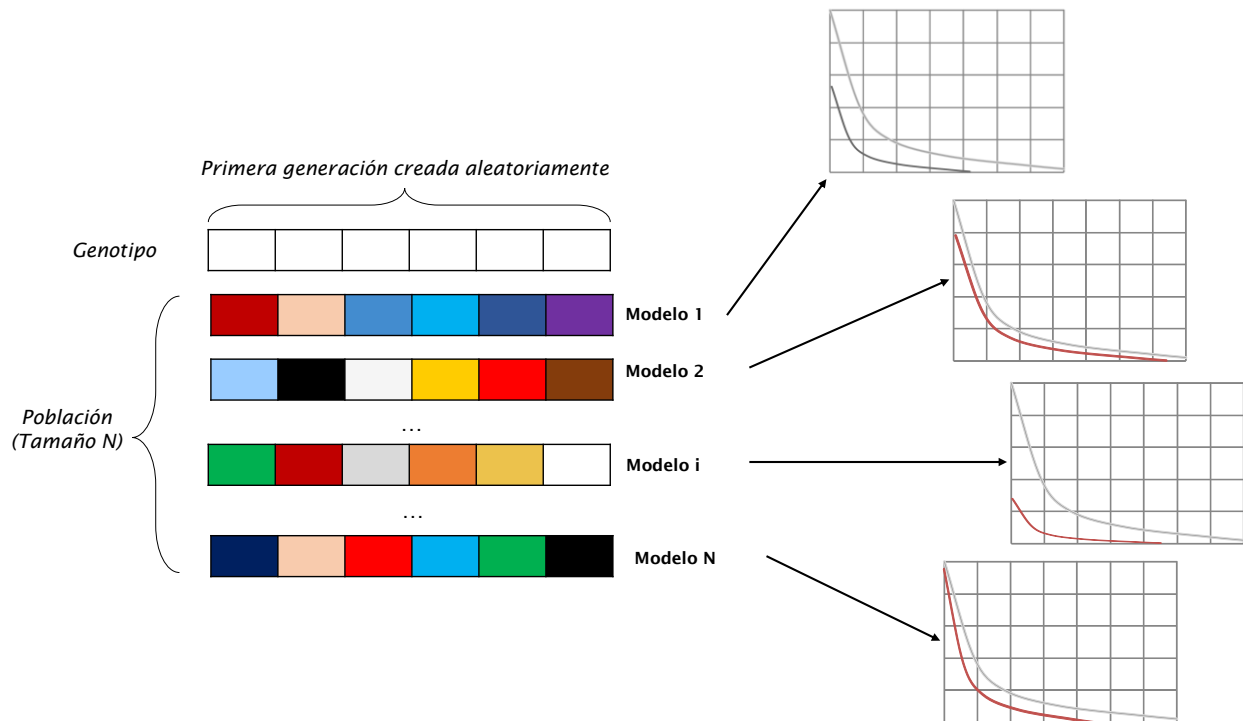


Figura A 54. Ilustración de la creación de una primera generación de combinaciones. Los colores en los cuadros son para ilustrar las diferentes características dentro de cada alternativa.

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.

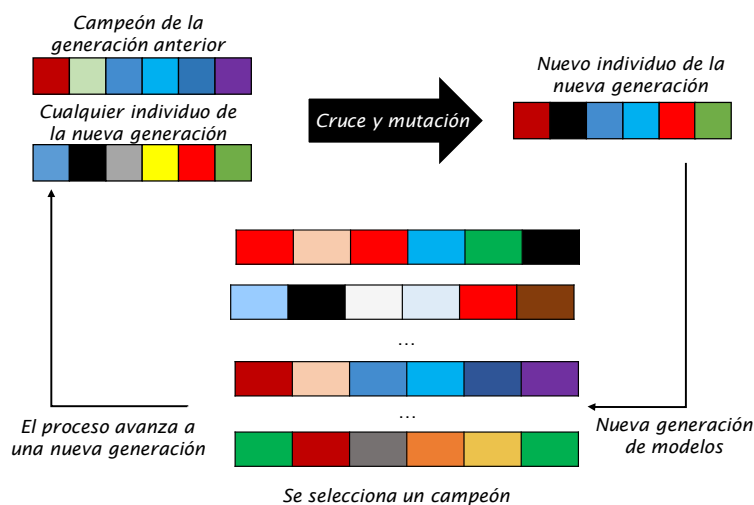


Figura A 55. Ilustración del proceso evolutivo para la optimización de combinación de alternativas

El Campeón de la última generación tiene la combinación de alternativas de reducción de riesgos que mejor se ajustan al objetivo de resiliencia. Esta combinación es un fuerte candidato para convertirse en la estrategia de reducción de riesgos a emprender.