

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

CO-T3812-002

Análisis de Riesgo de Línea Base (Entregable 2)

Preparado para:



COLOMBIA
POTENCIA DE LA
VIDA



Ambiente



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Enero de 2024

Consultor

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



Cardona, Omar-Darío; Bernal, Gabriel A.; Villegas, Claudia P.; González, Diana M.; Rincón, David F.; Molina, John F.; Grajales, Sthefania; Herrera, Sergio A.; Acosta, Mariana; Suárez, Dora C.; Pérez, Maria del Pilar; Marulanda, Paula M.; Marulanda, Mabel C. (2024). Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2, Análisis de Riesgo de Línea Base, Banco Interamericano de Desarrollo, Minambiente de Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	ALCANCE DEL ESTUDIO	5
1.2	CLIMAS CONSIDERADOS.....	5
1.3	MÉTRICAS DEL RIESGO.....	6
1.3.1	PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)	6
1.3.2	PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)	6
1.4	CONSIDERACIONES SOBRE LAS PÉRDIDAS ECONÓMICAS CALCULADAS	7
2	RIESGO POR HURACÁN	8
2.1	MODELO DE CÁLCULO	8
2.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	9
3	RIESGO POR INUNDACIÓN	11
3.1	MODELO DE CÁLCULO	11
3.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	12
4	RIESGO POR DESLIZAMIENTOS.....	14
4.1	MODELO DE CÁLCULO	14
4.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	15
5	RIESGO POR SEQUÍA	17
5.1	MODELO DE CÁLCULO	17
5.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	18
6	RIESGO POR INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL.....	20
6.1	MODELO DE CÁLCULO	21
6.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	22
7	REFERENCIAS	24

1 INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de esta consultoría es brindar elementos técnicos que soporten la implementación de medidas de adaptación, a través de la cuantificación de su efectividad en términos de reducción del riesgo. Si bien gestión del riesgo de desastres y adaptación al cambio climático no son lo mismo, desde un punto de vista netamente práctico, es posible obviar esa diferencia, toda vez que las acciones de adaptación que puedan implementarse ante fenómenos peligrosos derivados del clima, son en esencia acciones de gestión del riesgo. El enfoque acá empleado para el desarrollo del trabajo ha sido previamente implementado en la Fase 1 de la E2050 (Cardona et al. 2020), en donde se evaluó el riesgo al 2050 ante múltiples amenazas y para múltiples sectores. Esta consultoría aplica el mismo marco conceptual, pero en municipios específicos del país, a una mayor resolución, como casos piloto de una aplicación en escala reducida.

Para medir la efectividad de las acciones de adaptación, primero debe evaluarse el riesgo incorporando el efecto perturbador del cambio climático sobre los peligros hidrometeorológicos, para después incorporar en el propio modelo las medidas de adaptación y evaluar su efectividad en términos de, por ejemplo, una relación beneficio-costos asociada a su implementación, o cualquier otro indicador de efectividad que se decida. En esta consultoría, se plantea un enfoque metodológico fundamentado en modelación del riesgo catastrófico, a partir de la cual se determina el nivel de riesgo actual y también el riesgo que existiría al 2050 bajo diferentes trayectorias de gases de efecto invernadero. Los resultados de la modelación del riesgo constituyen el contenido de este informe. La verificación de la efectividad de las medidas de adaptación a implementar en el territorio peruano corresponde a la siguiente fase de este trabajo. La Figura 1 ilustra el enfoque metodológico general para este estudio.

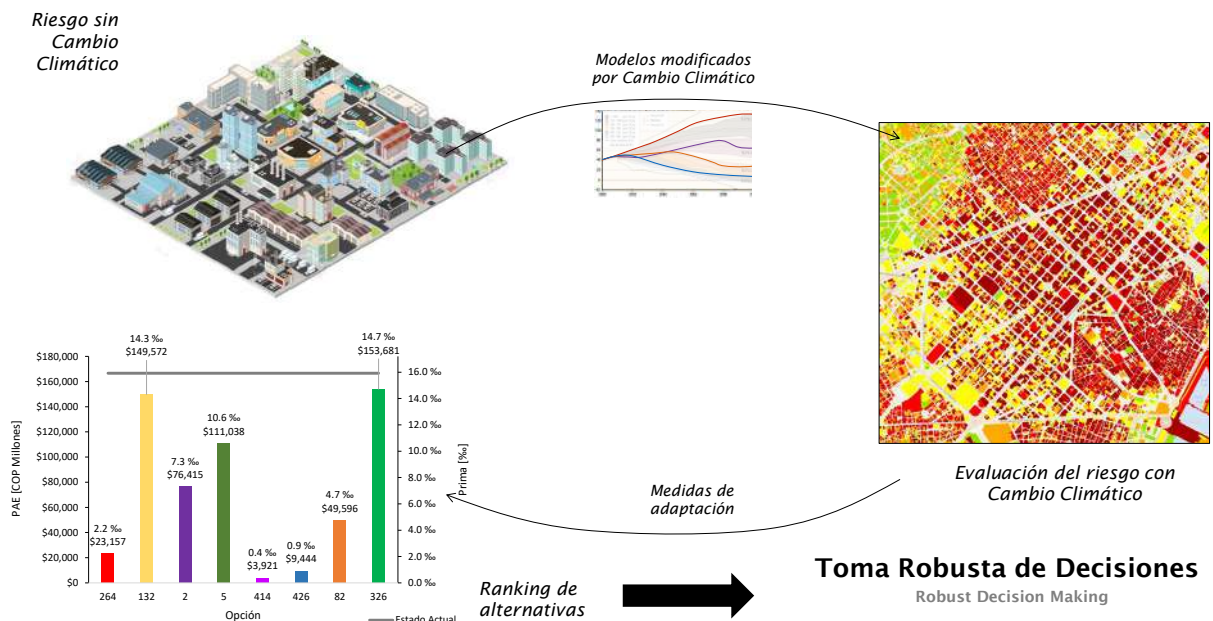


Figura 1. Ilustración del enfoque metodológico y fases del modelo.

1.1 Alcance del estudio

Este estudio plantea la justificación de medidas de adaptación, con base en la *evaluación probabilista del riesgo*, *toma robusta de decisiones* y la *ingeniería de control del riesgo*, que son metodologías y enfoques totalmente compatibles con el fin de racionalmente justificar un plan de medidas de adaptación y sus condiciones de implementación en el territorio. Este enfoque es aplicado para todos los casos presentados en la Tabla 1, en la que se resumen la amenaza, portafolio de exposición y municipios de cálculo que hacen parte del alcance del estudio.

Tabla 1. Alcance de la consultoría

Amenaza	Sector	Portafolios	Ubicación (municipio)			
Huracán	Construcciones	Residencial, educación, salud, comercial, industrial, institucional	Archipiélago de San Andrés,		La Guajira	
			San Andrés	Providencia	Manaure	Uribia
					Riohacha	
Incendios forestales	Servicios ecosistémicos	Bosques de frontera agrícola	Huila	Casanare	Caquetá	Vichada
			Palermo	Orocué	San Vicente	Cumaribo
Deslizamientos	Infraestructura	Red vial primaria, secundaria, terciaria y local	Bogotá D.C.	Caldas	Caldas <small>(27 municipios)</small>	Cauca <small>(42 municipios)</small>
			Bogotá	Manizales		
Sequía	Agrícola	Maíz amarillo, maíz blanco, arroz de secano, arroz de riesgo, yuca	Sucre	Córdoba	Tolima	
			San Onofre	Lorica	Espinal	Guamo
Inundación	Construcciones	Residencial, educación, salud, comercial, industrial, institucional	Bolívar	Córdoba	Sucre	
			Magangué	Ayapel	San Marcos	Guaranda

1.2 Climas considerados

Con excepción de la evaluación por huracán, en todos los casos se calculó el riesgo considerando 6 climas diferentes estudiados (todas las proyecciones son al 2050):

- Clima base: clima actual caracterizado por la climatología histórica (periodo de 1980 a 2010).
- RCP 2.6: clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 2.6.
- RCP 4.5: clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 4.5.
- RCP 6: clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 6.0.
- RCP 8.5: clima descrito por el modelo HadGEM2-AO para el RCP 8.5.
- CC IDEAM: clima descrito según lo proyectado por IDEAM en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

Para el caso de huracán, el modelo de cambio climático corresponde a:

- Escenario de emisiones RCP 8.5 y trayectorias simuladas según proyecciones de los modelos CMCC-CM2-VHRA, CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3P-HR, y HadGEM3-GC31-HM.

Los detalles sobre la selección del modelo GCM de referencia empleado para las proyecciones climáticas, así como el procedimiento de simulación del forzamiento meteorológico, pueden consultarse en los reportes de la Fase 1 de este estudio para E2050 (Cardona et al. 2020).

1.3 Métricas del riesgo

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 pérdida. 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 eventos hidrometeorológicos. La curva de excedencia de pérdidas es el resultado fundamental del riesgo, no obstante, es común representar el riesgo por medio de otras métricas más fáciles de comunicar, como es el caso de la *pérdida anual esperada* (PAE) y la curva de *pérdida máxima probable* (PML).

1.3.1 Pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual promedio que, de sumarse, en el largo plazo, equivaldría a todas las pérdidas futuras. La PAE sería la prima pura anual justa para cubrir anualmente todas las pérdidas que pueden presentarse. Se puede calcular como el área bajo la curva de excedencia de pérdidas.

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdidas, de la ocurrencia de eventos de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Es el indicador más robusto del riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de pérdidas en un solo número, sino por ser relativamente insensible a la incertidumbre.

1.3.2 Pérdida máxima probable (PML)

Si bien el principal resultado de la evaluación del riesgo es la curva de excedencia de pérdidas, la curva de PML¹ es usualmente preferida debido a que, en general, es más fácil de comprender la noción de un periodo de retorno. La curva de excedencia de pérdidas y la curva de PML son equivalentes en la información contenida.

De la curva de PML se pueden determinar los valores de pérdida para periodos de retorno arbitrarios. La selección del periodo de retorno para una PML como referente depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. La Figura 2 muestra un ejemplo de una curva de PML, en donde, a partir de un período de retorno seleccionado en el eje horizontal, que en este ejemplo es de 400 años, se puede determinar el valor de la pérdida en el eje vertical, lo que indica que esta pérdida se superará en promedio cada 400 años.

¹ Probable Maximum Loss

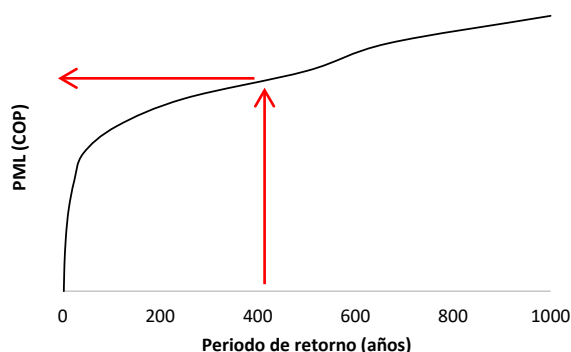


Figura 2. Ejemplo de curva de PML

1.4 Consideraciones sobre las pérdidas económicas calculadas

La evaluación probabilista del riesgo se fundamenta en técnicas de modelación del riesgo catastrófico para la cuantificación de posibles pérdidas causadas sobre los elementos expuestos por la ocurrencia natural de fenómenos amenazantes. Las pérdidas modeladas tienen diferentes características según el tipo de amenaza y elementos expuestos estudiados, que son relevantes para su correcta interpretación. En este estudio, se debe hacer diferencia entre tres tipos específicos de pérdida:

- Las pérdidas causadas por inundaciones, huracanes y deslizamientos sobre edificaciones e infraestructura son pérdidas sobre activos físicos. Significa que los valores expuestos son valores de reposición, los cuales se pagan con el fin de reponer el activo perdido al mismo estado en el que se encontraba inicialmente una vez ocurrido el evento, o un estado mínimo equivalente según su condición de uso. Son pérdidas de gran magnitud y baja frecuencia.
- Las pérdidas causadas en el sector agrícola por sequías son pérdidas en producción, es decir una disminución en el ingreso resultante de la actividad agrícola. Es decir, no se mide el daño o detrimento en un activo físico, sino la disminución en un flujo económico. Estas son pérdidas de baja magnitud y alta frecuencia
- Las pérdidas resultantes de la ocurrencia de incendios forestales son pérdidas en flujos anuales de servicios ecosistémicos. Guardan cierta similitud con las pérdidas al sector agrícola, con la diferencia que los montos de pérdida son en general mucho más grandes, dada la importancia relativa de los servicios ecosistémicos en diferentes dimensiones. Son entonces pérdidas de gran magnitud y alta frecuencia.

1.5 Toma Robusta de Decisiones

Como resultado final de esta consultoría, se implementará la metodología acoplada de evaluación probabilista del riesgo y toma de decisiones robustas (PRA – RDM), con el fin de establecer las combinaciones de acciones o medidas de adaptación que, en conjunto, son más efectivas para la reducción del riesgo, ante múltiples posibles futuros climáticos dominados por profunda incertidumbre. Como parte de la implementación de la RDM, se realizaron 3 talleres participativos con diferentes instituciones del orden nacional y local, con el fin de recoger opiniones y visiones sobre las medidas de adaptación a considerar en el desarrollo de este trabajo. El Anexo 6 a este informe, resume los talleres realizados.

2 RIESGO POR HURACÁN

La modelación del riesgo por huracán se concentró en municipios al norte de Colombia, en los departamentos de la Guajira y el Archipiélago de San Andrés y Providencia, los cuales se encuentran en la zona del territorio que es susceptible al tránsito de huracanes. Los municipios incluidos en la evaluación detallada son Riohacha, Manaure y Uribia en La Guajira, y San Andrés y Providencia, en el Archipiélago.

2.1 Modelo de cálculo

La Figura 3 presenta un esquema resumido con los principales componentes del modelo probabilista de riesgo por huracán, implementado en los municipios mencionados. Las métricas de riesgo resultantes son las definidas en la sección 1.3.

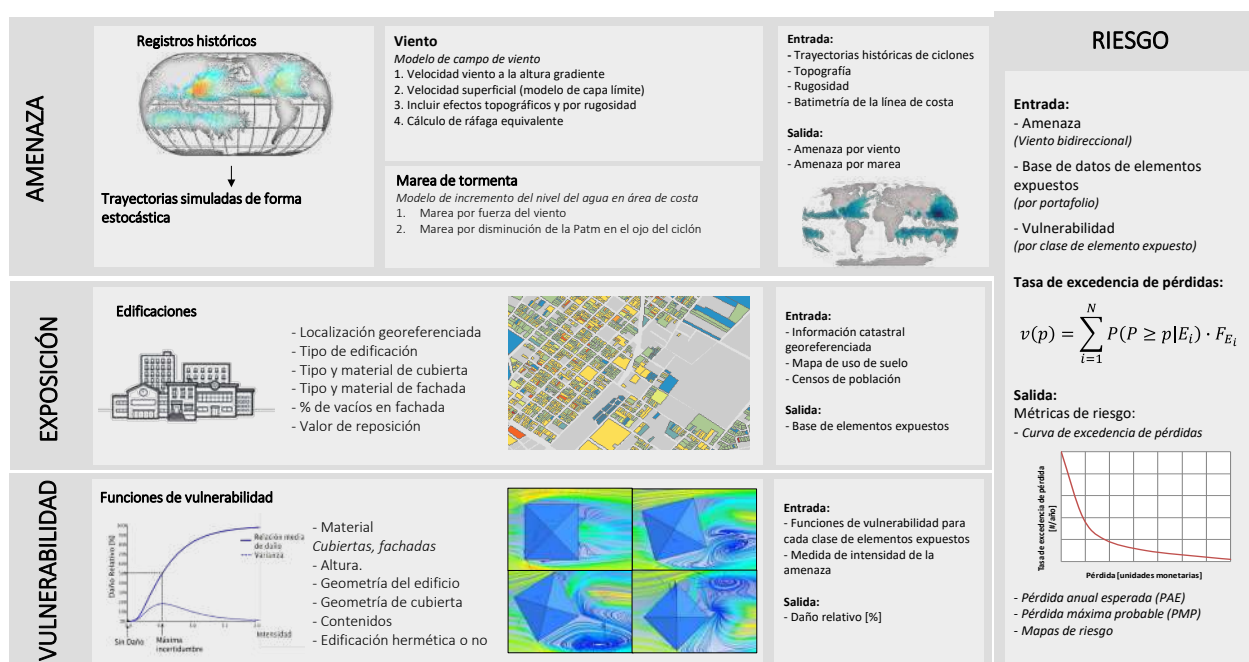


Figura 3. Esquema de componentes del modelo por huracán implementado.

La modelación del riesgo por ciclones tropicales se basa en la simulación de trayectorias ciclónicas, bajo diferentes condiciones climáticas. La amenaza se modeló en toda la extensión del Caribe colombiano, considerando un catálogo base conformado por 1560 trayectorias², y 1500 trayectorias ciclónicas sintéticas obtenidas para una trayectoria de gases de efecto invernadero SSP5-RCP8.5 al 2050. Cada trayectoria ciclónica incluida es perturbada estocásticamente para conformar nuevas trayectorias sintéticas, completando así un catálogo de simulación de 306,000 huracanes para los cuales se determinan sus campos de viento y marea de tormenta y los efectos correspondientes sobre los municipios incluidos. Para considerar el cambio climático se incluyeron las trayectorias simuladas por Bloemendaal et al. (2020) al 2050, obtenidas de su modelo STORM, en donde se consideran las proyecciones de 5 modelos de

² Tomadas de la base de datos IBTrACS (Knapp et al. 2010) con corte al 2022.

circulación global (GCM)³, los cuales son los únicos que, a la fecha, cuentan con la resolución espacial y temporal para aproximar procesos de mesoescala meteorológica.

Se construyó un modelo de exposición de edificaciones para los 5 municipios incluidos en esta evaluación, el cual incluye los sectores: residencial, salud, educación, comercial, industrial e institucional, cubriendo las zonas urbanas y rurales en toda el área de los municipios, con un total de 281,564 edificaciones en los 5 municipios. La vulnerabilidad se modela por medio de funciones de vulnerabilidad que capturan la variación del daño con la intensidad sobre diferentes tipos constructivos. Se incluyen tipos constructivos diferenciados según el fenómeno considerado. Por ejemplo, en el caso de la resistencia al viento huracanado, lo más significativo es la condición del revestimiento de la edificación, es decir su cubierta y fachada. Por otra parte, para la marea de tormenta, juega un papel más significativo la altura del edificio y el material de la construcción.

2.2 Resultados de la evaluación

La Tabla 2 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 5 municipios, tanto para el clima actual como para el clima RCP 8.5. La Figura 4 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático en cada municipio. La Figura 5 muestra las curvas de PML de cada municipio, para el clima base y el clima RCP8.5.

Tabla 2. Pérdidas Anuales Esperadas por huracán

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	PAE (clima base)		PAE (RCP 8.5)	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
San Andrés	\$ 3,185,480	\$ 19,017	5.97	\$ 30,262	9.5
Providencia	\$ 423,783	\$ 3,581	8.45	\$ 6,891	16.26
Manaure	\$ 1,380,971	\$ 3,729	2.7	\$ 5,800	4.2
Uribe	\$ 2,700,357	\$ 4,861	1.8	\$ 6,751	2.5
Riohacha	\$ 5,909,352	\$ 1,773	0.3	\$ 4,137	0.7

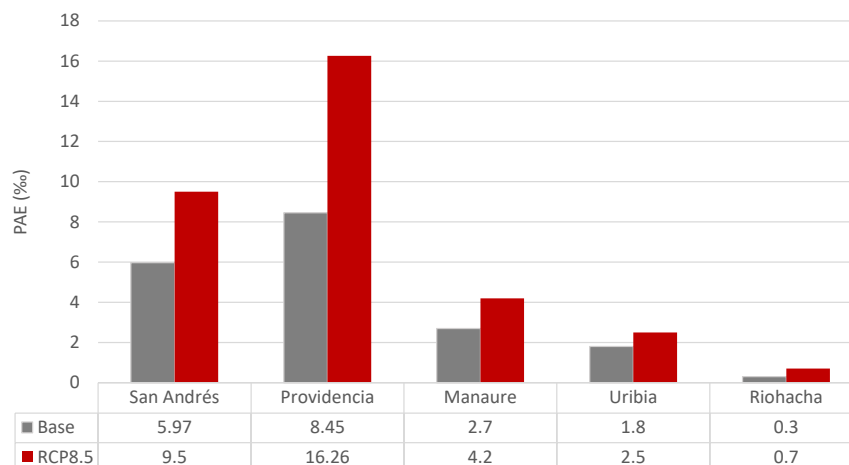


Figura 4. Pérdida anual esperada relativa por huracán (al millar) para los 5 municipios, ante clima base y clima futuro.

³ CMCC-CM2-VHRA, CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3P-HR, y HadGEM3-GC31-HM.

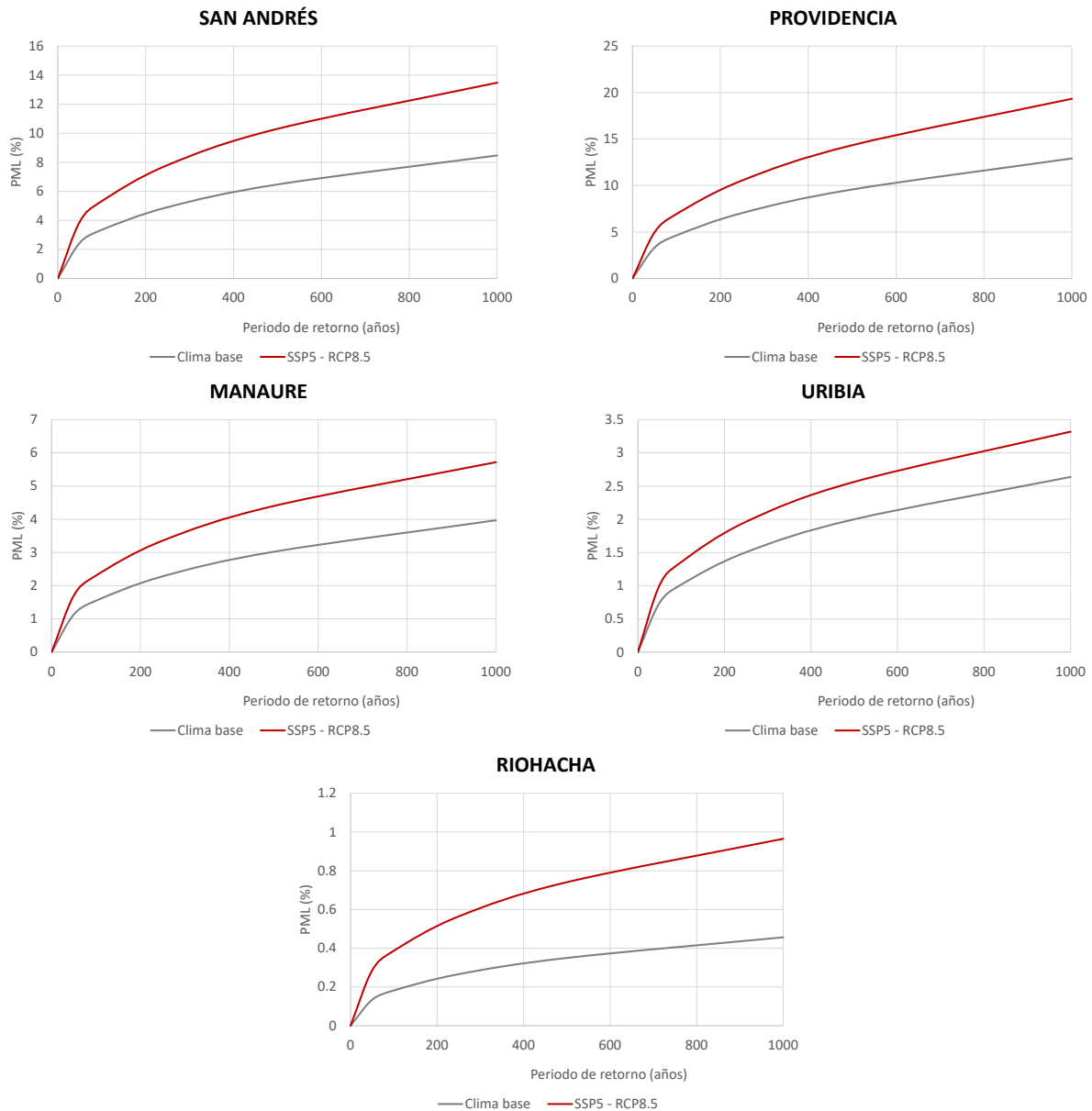


Figura 5. Curvas de PML relativa por huracán (en porcentaje) para los 5 municipios, ante clima base y clima futuro.

Dado que la evaluación se realiza a una escala detallada (edificio a edificio) es posible construir mapas de pérdida anual esperada por ubicación, para cada municipio. Estos mapas se incluyen en el Anexo 1. Así mismo, los archivos georreferenciados correspondientes se incluyen en el Anexo Digital.

3 RIESGO POR INUNDACIÓN

Las inundaciones son un fenómeno recurrente en Colombia, dada la hidrografía del país y sus condiciones climáticas. Así mismo, una parte importante de la población, especialmente aquella con ingresos relativamente bajos, se encuentra asentada en las riberas de los ríos o cerca de fuentes de agua, lo cual genera las condiciones propicias para la ocurrencia de desastres por inundación. En este caso, la modelación se enfoca en 4 municipios del sector conocido como la Mojana, al norte de Colombia, específicamente Magangué (Bolívar), Ayapel (Córdoba), San Marcos y Guaranda (Sucre).

La Mojana es una región de especial importancia hídrica en el país. En ella confluyen 3 ríos importantes: San Jorge, Cauca y Magdalena, junto con otros afluentes de estos de especial relevancia, como el río Nechí o el río Caribona, y cuyos caudales regulan una vasta región de humedales que actúa naturalmente como amortiguador de las crecientes de estos ríos principales. En la Mojana, la existencia del dique ubicado en el margen izquierdo del río Cauca, influye fuertemente en la manifestación estacional de inundaciones, exacerbadas por la ocurrencia de rompederos sobre el dique. Dada su relevancia, el dique marginal es incluido en la modelación de la amenaza por inundaciones en los municipios de esta región.

3.1 Modelo de cálculo

La Figura 6 presenta un esquema resumido con los principales componentes del modelo probabilista de riesgo por inundaciones, implementado en los municipios mencionados. Las métricas de riesgo resultantes son las definidas en la sección 1.3.



Figura 6. Esquema de componentes del modelo de riesgo por inundaciones implementado.

La modelación de la amenaza de inundación por desbordamiento de ríos se compone de 3 submodelos: un modelo meteorológico, mediante el cual se da cuenta de la distribución temporal y espacial de la lluvia

como forzamiento meteorológico fundamental en el problema; un modelo hidrológico, el cual resume todos los procesos de transformación que ocurren al interior de una cuenca y como esta responde, en términos del flujo a la salida, ante diferentes aguaceros incidentes; y un modelo hidráulico, mediante el cual es posible simular el comportamiento del volumen de agua aportado por la cuenca al río.

Se construyó un modelo de exposición de edificaciones para los 4 municipios incluidos en la Mojana, el cual incluye los sectores: residencial, salud, educación, comercial, industrial e institucional, cubriendo las zonas urbanas y rurales en toda el área de los municipios, con un total de 83,768 edificaciones. La vulnerabilidad se modela por medio de funciones de vulnerabilidad que capturan la variación del daño con la intensidad sobre diferentes tipos constructivos. Se incluyen tipos constructivos representativos de las características que son relevantes en la relación entre la intensidad de inundación y el daño en edificaciones.

3.2 Resultados de la evaluación

La Tabla 3 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 4 municipios, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 7 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático en cada municipio. La Figura 8 muestra las curvas de PML de cada municipio.

Tabla 3. Pérdidas Anuales Esperadas por inundación

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	Clima base		RCP2.6		RCP4.5	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Magangué	\$ 4,371,819	\$ 29,728	6.8	\$ 27,980	6.4	\$ 31,040	7.1
Ayapel	\$ 1,852,744	\$ 8,893	4.8	\$ 8,523	4.6	\$ 9,449	5.1
San Marcos	\$ 2,000,700	\$ 20,807	10.4	\$ 19,807	9.9	\$ 21,808	10.9
Guaranda	\$ 610,962	\$ 367	0.60	\$ 312	0.51	\$ 379	0.62

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	RCP6.0		RCP8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Magangué	\$ 4,371,819	\$ 27,542	6.3	\$ 28,854	6.6	\$ 29,728	6.8
Ayapel	\$ 1,852,744	\$ 8,708	4.7	\$ 8,708	4.7	\$ 9,078	4.9
San Marcos	\$ 2,000,700	\$ 19,607	9.8	\$ 20,407	10.2	\$ 21,007	10.5
Guaranda	\$ 610,962	\$ 299	0.49	\$ 373	0.61	\$ 373	0.61

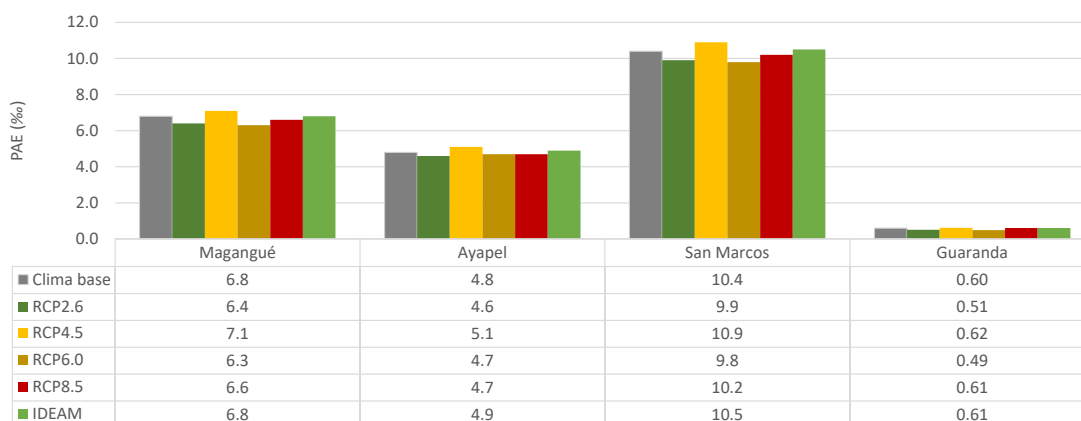


Figura 7. Pérdida anual esperada relativa por inundación (al millar) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

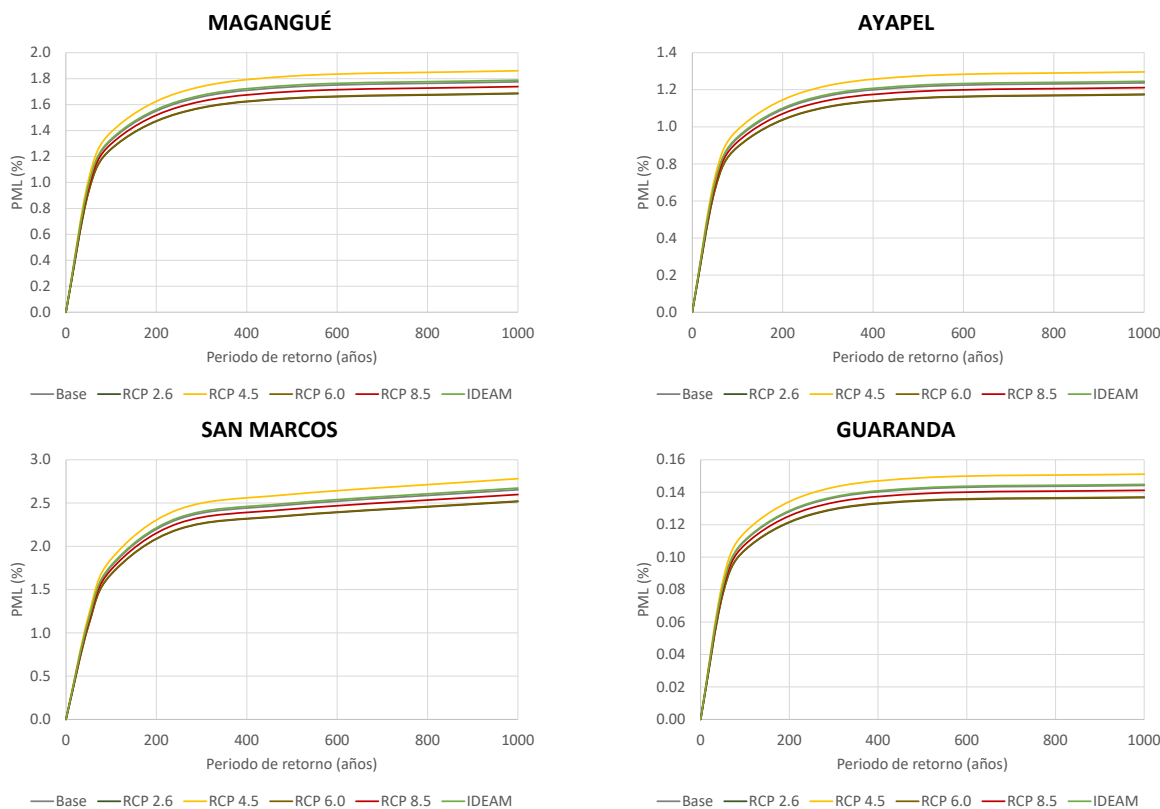


Figura 8. Curvas de PML relativa por inundación (en porcentaje) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

Como para el caso anterior, los mapas de pérdida anual esperada, edificio a edificio, se incluyen en el Anexo 2, y los archivos georreferenciados correspondientes se incluyen en el Anexo Digital.

4 RIESGO POR DESLIZAMIENTOS

Los deslizamientos son un fenómeno propio de la geodinámica terrestre, de muy alta recurrencia, especialmente en territorios como el colombiano, en donde la particular topografía y condiciones geológicas implican una alta susceptibilidad a su ocurrencia. Si bien existen diferentes tipos de movimientos en masa que pueden clasificarse como deslizamientos, en el modelo empleado no es posible capturar las notables diferencias entre uno y otro, sino únicamente la probabilidad que una ubicación específica en el terreno presente un deslizamiento de tierra por cuenta de la susceptibilidad de la ladera y la ocurrencia de la lluvia detonante.

La evaluación se centra en la red vial de del municipio de Manizales, en Caldas, y de la ciudad de Bogotá, como casos a escala de ciudad, pero adicionalmente se trabajan los departamentos de Caldas y Cauca completos, con el fin de considerar vías carreteras intermunicipales que son de muy alta importancia.

4.1 Modelo de cálculo

La Figura 9 presenta un esquema resumido con los principales componentes del modelo probabilista de riesgo por deslizamientos, implementado en los municipios y departamentos mencionados. Las métricas de riesgo resultantes son las definidas en la sección 1.3.

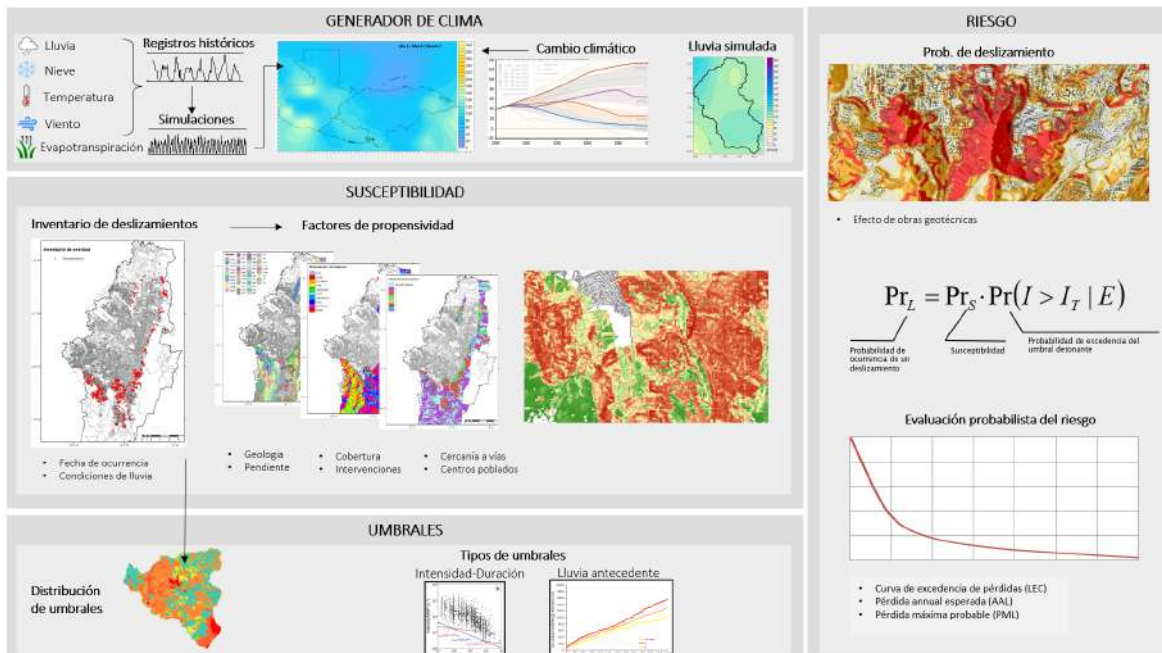


Figura 9. Esquema de componentes del modelo de riesgo por inundaciones implementado.

La amenaza por deslizamientos depende de dos componentes fundamentales, la susceptibilidad, que mide las condiciones intrínsecas de las laderas, es decir, aquellos factores que las hacen propensas a la ocurrencia de deslizamientos, y los fenómenos detonantes, que son factores externos que inducen la ocurrencia de los deslizamientos. Los detonantes son por lo general terremotos y eventos de lluvia intensa, que tengan la capacidad de incrementar las cargas o reducir la resistencia del material de las laderas. Dado

el alcance de este trabajo, el modelo de riesgo se refiere únicamente a deslizamientos detonados por lluvia intensa.

La probabilidad de deslizamiento, ante cada evento simulado de lluvia, se combina con la capa de exposición de forma tal que se busca asociar un tramo vial a un cierto número de celdas circundantes dentro del modelo de amenaza. En este caso, la vulnerabilidad se considera binaria, es decir, se asume que, dado que localmente los deslizamientos son eventos de muy alta energía, si el sitio donde está la infraestructura se desliza, esta se pierde por completo. Esto implica que la probabilidad de deslizamiento puede entenderse una proporción de pérdida sobre el valor de reposición del tramo vial.

4.2 Resultados de la evaluación

La Tabla 4 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 2 municipios y 2 departamentos, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 10 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático. La Figura 11 muestra las curvas de PML de cada municipio.

Tabla 4. Pérdidas Anuales Esperadas por deslizamiento

Municipio / Depto.	Valor expuesto	Clima base		RCP2.6		RCP4.5	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Bogotá	\$ 14,937,508	\$ 1,404	0.094	\$ 1,434	0.096	\$ 1,419	0.095
Manizales	\$ 1,213,309	\$ 995	0.82	\$ 1,189	0.98	\$ 1,031	0.85
Caldas	\$ 13,439,652	\$ 21,503	1.60	\$ 25,132	1.87	\$ 22,444	1.67
Cauca	\$ 66,192,885	\$ 134,372	2.03	\$ 132,386	2.00	\$ 135,033	2.04

Municipio / Depto.	Valor expuesto	RCP6.0		RCP8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Bogotá	\$ 14,937,508	\$ 1,419	0.095	\$ 1,434	0.096	\$ 1,583	0.106
Manizales	\$ 1,213,309	\$ 1,141	0.94	\$ 1,153	0.95	\$ 1,541	1.27
Caldas	\$ 13,439,652	\$ 24,191	1.80	\$ 24,460	1.82	\$ 30,642	2.28
Cauca	\$ 66,192,885	\$ 132,386	2.00	\$ 133,048	2.01	\$ 142,315	2.15

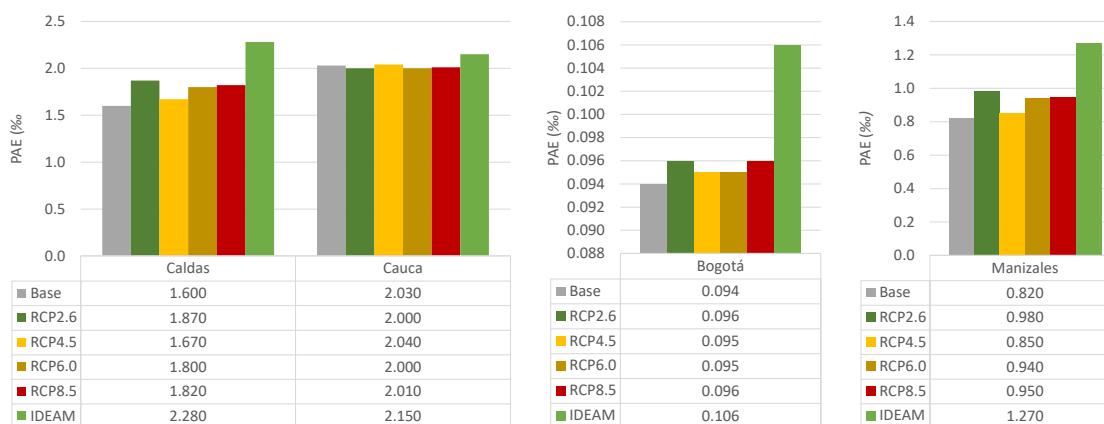


Figura 10. Pérdida anual esperada relativa por deslizamientos (al millar) para los 2 municipios y 2 departamentos, ante clima base y clima futuro.

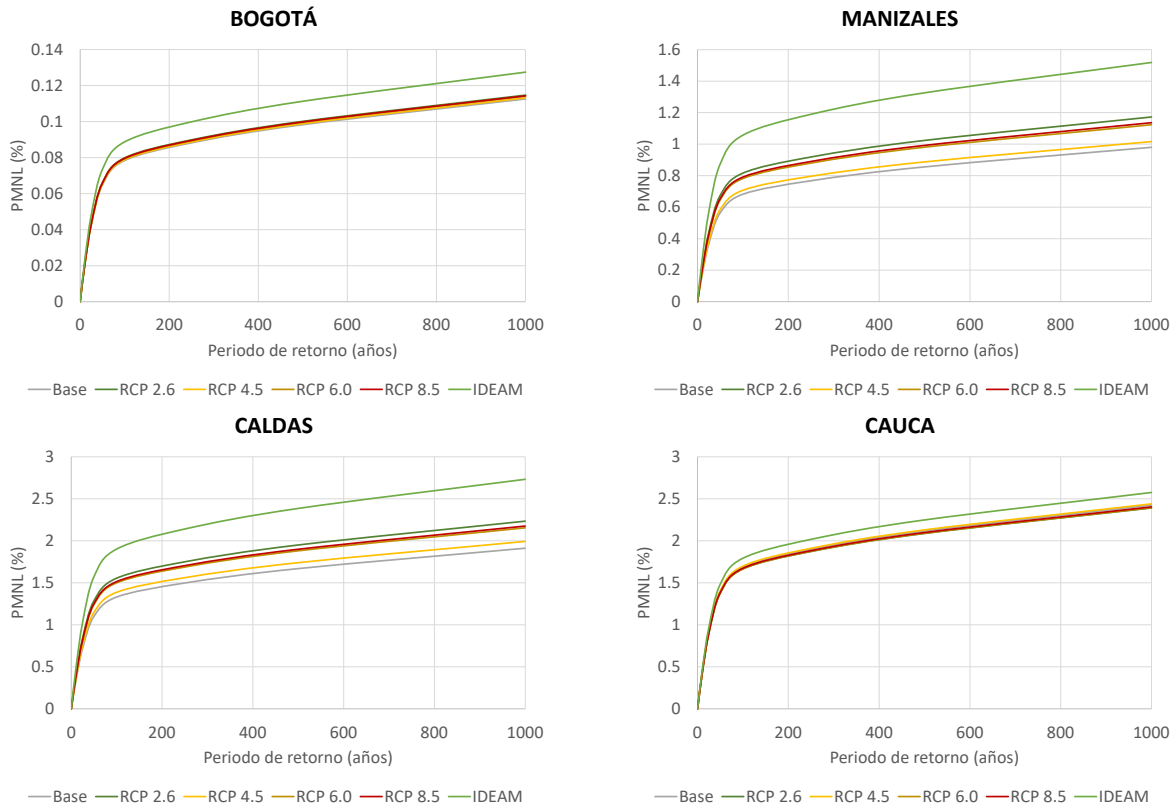


Figura 11. Curvas de PML relativa por deslizamientos (en porcentaje) para los 2 municipios y 2 departamentos, ante clima base y clima futuro.

En este caso, se incluyen en el Anexo 3 mapas de pérdida anual por tramos viales. Estos son tramos seleccionados de forma arbitraria, con longitudes no superiores a los 250 metros. Los archivos georreferenciados se incluyen en el Anexo Digital.

5 RIESGO POR SEQUÍA

La sequía es un evento cuya definición exacta es difícil de establecer, con fechas de inicio y fin, así como una extensión geográfica e intensidad, que dependen de criterios más o menos arbitrarios con los cuales se establezcan estos parámetros. Así mismo, es común diferenciar entre sequía meteorológica, agrícola e hidrológica, en función sistema sobre el cual se mide del desbalance de agua, así como sus impactos. Este trabajo se centra en sequía agrícola sobre varios productos en diferentes ubicaciones, y en donde se aplica un enfoque que no requiere de una definición explícita de los eventos de sequía, sino de una simulación de sus impactos a la producción agrícola, lo cual reduce la arbitrariedad inherente a la definición de los eventos. Esta evaluación se realiza para los portafolios de maíz amarillo, maíz blanco, arroz de secano, arroz de riego y yuca, en los municipios de San Onofre (Sucre), Lorica (Córdoba), Espinal y Guamo (Tolima).

5.1 Modelo de cálculo

La Figura 12 presenta un esquema resumido con los principales componentes del modelo probabilista de riesgo por sequía agrícola, implementado en los municipios mencionados. Las métricas de riesgo resultantes son las definidas en la sección 1.3.

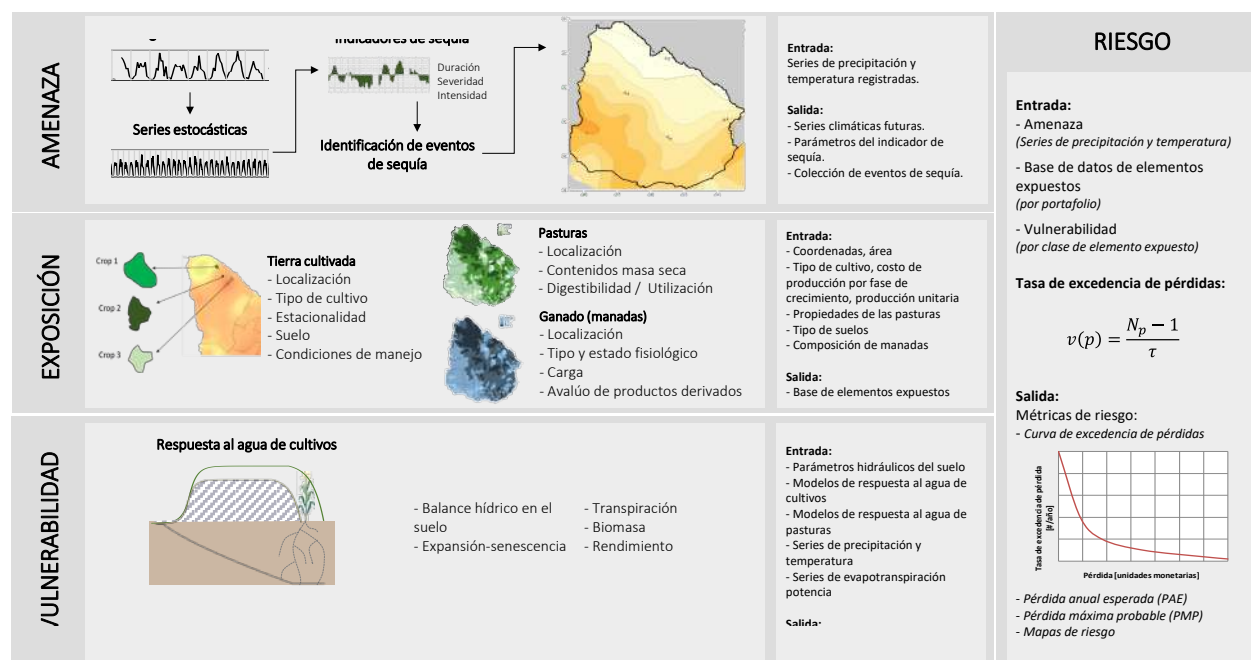


Figura 12. Esquema de componentes del modelo de riesgo por sequía implementado.

La sequía es un fenómeno climático transitorio, que se caracteriza por una reducción en la disponibilidad de agua con respecto a la requerida para mantener la salud de los ecosistemas, el consumo humano y en general el desarrollo social y económico. Toda sequía se debe, esencialmente, a un desbalance entre la oferta y la demanda de agua. Desde el punto de vista de la atmósfera, esta provee una cierta oferta de agua por medio de la precipitación y demanda a su vez una cierta cantidad de agua por medio del proceso de evapotranspiración. Por lo tanto, cuando ese balance se pierde, es decir, cuando la oferta de agua

provista es muy inferior a la demandada, se manifiesta una sequía. Desde el punto de vista agrícola, la oferta de agua se enmarca en el contenido de humedad en el suelo, que puede deberse a precipitación natural o a sistemas de riego, y la demanda es precisamente la cantidad de agua requerida para que la producción agrícola sea la esperada. El desbalance establece una sequía agrícola, en donde el elemento modulador del problema es el suelo. La pérdida de humedad en el suelo limita la producción e incluso, en casos extremos, la impide.

Con el objetivo de simular apropiadamente el desarrollo del perfil de humedad en el suelo a lo largo de una temporada productiva, se implementa un modelo de respuesta de cultivos al agua. Este modelo se alimenta con series meteorológicas (precipitación, temperatura, etc.), así como información del cultivo, con lo cual se determina una pérdida económica asociada a la disminución de ingresos que percibe el agricultor por cuenta de la ocurrencia del evento. El modelo de respuesta al agua implementado es el desarrollado por la FAO e implementado en el software AquaCrop (Steduto et al. 2012). Si bien este no es el único modelo de respuesta al agua de cultivos disponible en la literatura, posiblemente es el más empleado a nivel mundial. Este método fue implementado por INGENIAR en el software DroughtPro (Bernal et al. 2017) de la plataforma CAPRA ROBOT, lo cual permite automatizar el proceso de cálculo.

5.2 Resultados de la evaluación

La Tabla 5 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 4 municipios, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 13 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático en cada municipio. La Figura 14 muestra las curvas de PML de cada municipio.

Tabla 5. Pérdidas Anuales Esperadas por sequía

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	Clima base		RCP 2.6		RCP 4.5	
		(COP millones)	(%)	(COP millones)	(%)	(COP millones)	(%)
San Onofre	\$ 20,406	\$ 2,449	12.0	\$ 2,591	12.7	\$ 2,347	11.5
Lorica	\$ 30,097	\$ 5,959	19.8	\$ 6,682	22.2	\$ 5,568	18.5
Espinal	\$ 225,970	\$ 9,717	4.3	\$ 7,909	3.5	\$ 9,491	4.2
Guamo	\$ 212,401	\$ 11,470	5.4	\$ 9,346	4.4	\$ 9,133	4.3

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	RCP 6.0		RCP 8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(%)	(COP millones)	(%)	(COP millones)	(%)
San Onofre	\$ 20,406	\$ 2,734	13.4	\$ 2,816	13.8	\$ 2,694	13.2
Lorica	\$ 30,097	\$ 7,524	25.0	\$ 7,976	26.5	\$ 7,494	24.9
Espinal	\$ 225,970	\$ 10,621	4.7	\$ 7,683	3.4	\$ 7,909	3.5
Guamo	\$ 212,401	\$ 12,532	5.9	\$ 8,921	4.2	\$ 9,133	4.3

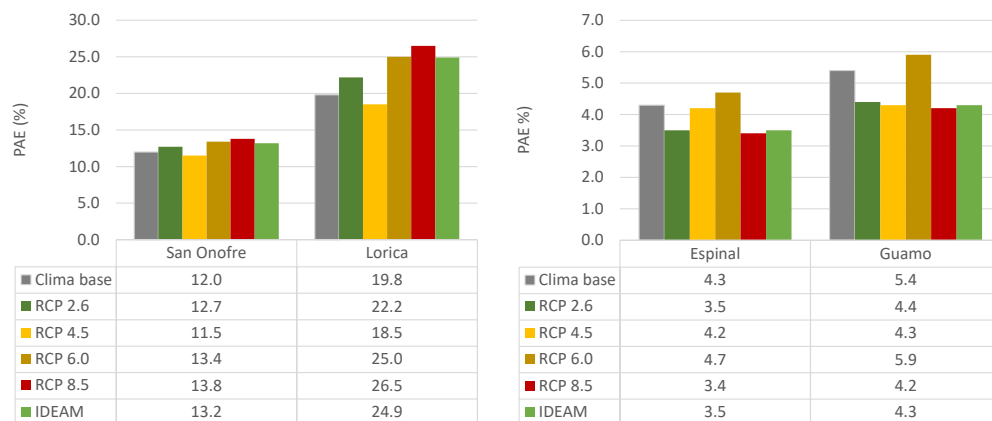


Figura 13. Pérdida anual esperada relativa por sequía (en porcentaje) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

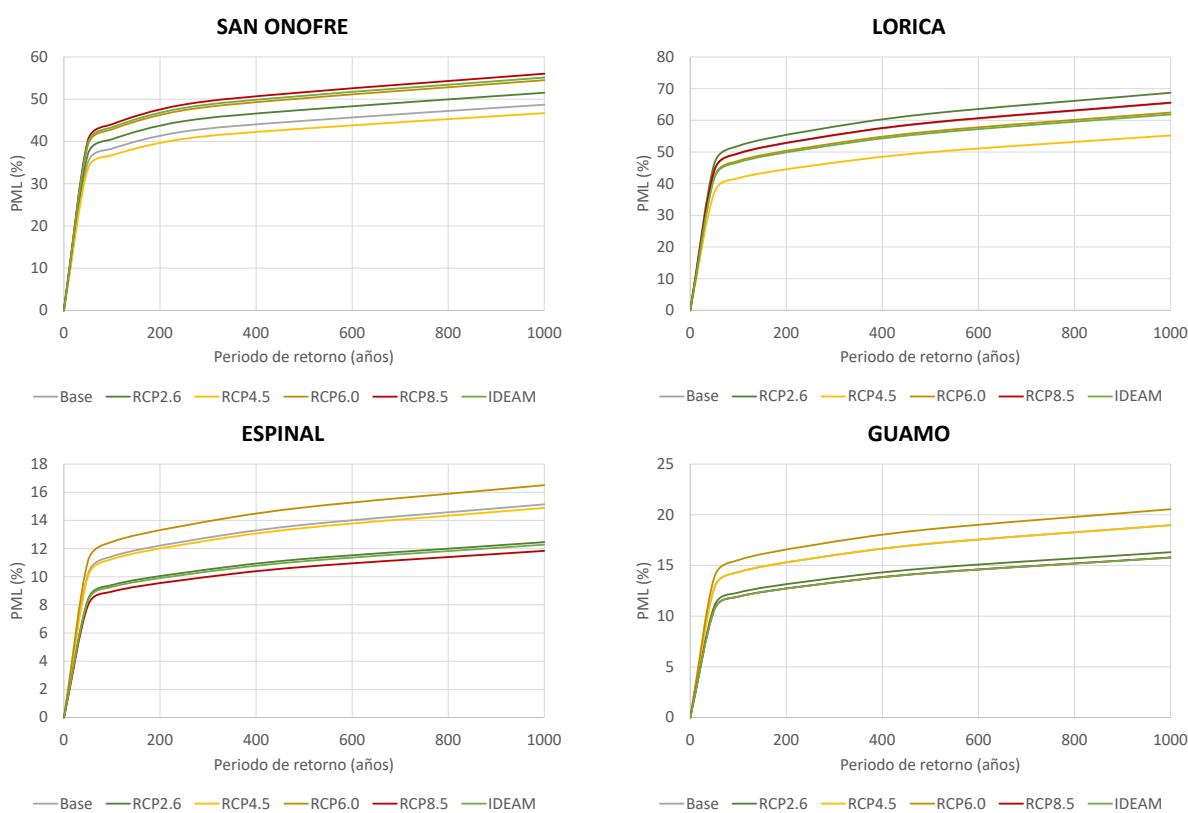


Figura 14. Curvas de PML relativa por sequía (en porcentaje) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

El Anexo 4 incluye los mapas de pérdida anual esperada a escala de unidad de tierra cultivada, para la totalidad de portafolios incluidos en la evaluación. Los archivos georreferenciados correspondientes se incluyen en el Anexo Digital.

6 RIESGO POR INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL

Si bien los incendios de cobertura vegetal ocurren en todas partes del territorio colombiano, estos se concentran en la frontera agrícola, como una presión que el ser humano ejerce sobre el bosque. Lo anterior tiene que ver con el hecho que la ocurrencia natural de incendios en Colombia, es decir, incendios forestales de ignición espontánea, es prácticamente imposible por las condiciones generalmente de muy alta humedad de la vegetación. Esto significa que la absoluta mayoría de incendios en el país son detonados por la mano del hombre, como parte de quemas agrícolas, o para ganar terreno al bosque natural con el fin de extender la tierra productiva. Esta evaluación se centra en los municipios de Palermo (Huila), Orocué (Casanare), San Vicente del Caguán (Caquetá) y Cumaribo (Vichada).

Dada la importancia que en este tema en particular tienen las áreas protegidas del territorio colombiano, las cuales no son necesariamente responsabilidad de los municipios, se incluyen en esta evaluación 86 áreas protegidas aledañas a los 4 municipios evaluados, con el fin de permitir una aplicación más amplia y una mayor participación de las entidades competentes en la protección del medio ambiente. El listado de áreas protegidas incluidas se presenta en el Anexo 5. La Figura 15 muestra un mapa de los municipios y las áreas protegidas que hacen parte de esta evaluación por incendios forestales.

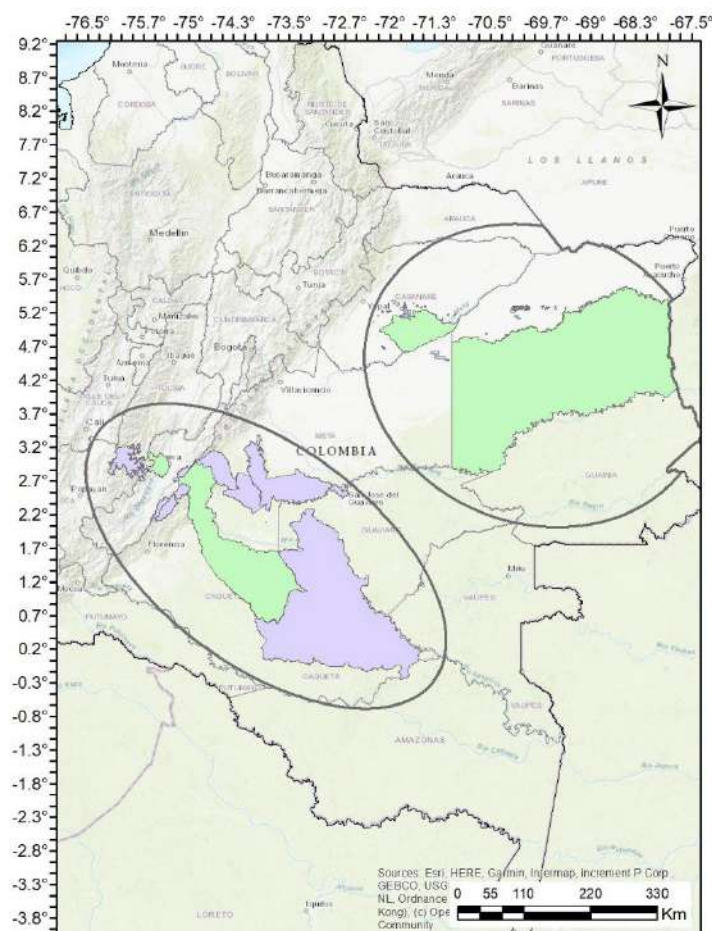


Figura 15. Mapa con los municipios (en verde) y áreas protegidas (en morado) incluidos.

6.1 Modelo de cálculo

La Figura 16 presenta un esquema resumido con los principales componentes del modelo probabilista de riesgo por incendios forestales, implementado en los municipios mencionados. Las métricas de riesgo resultantes son las definidas en la sección 1.3.

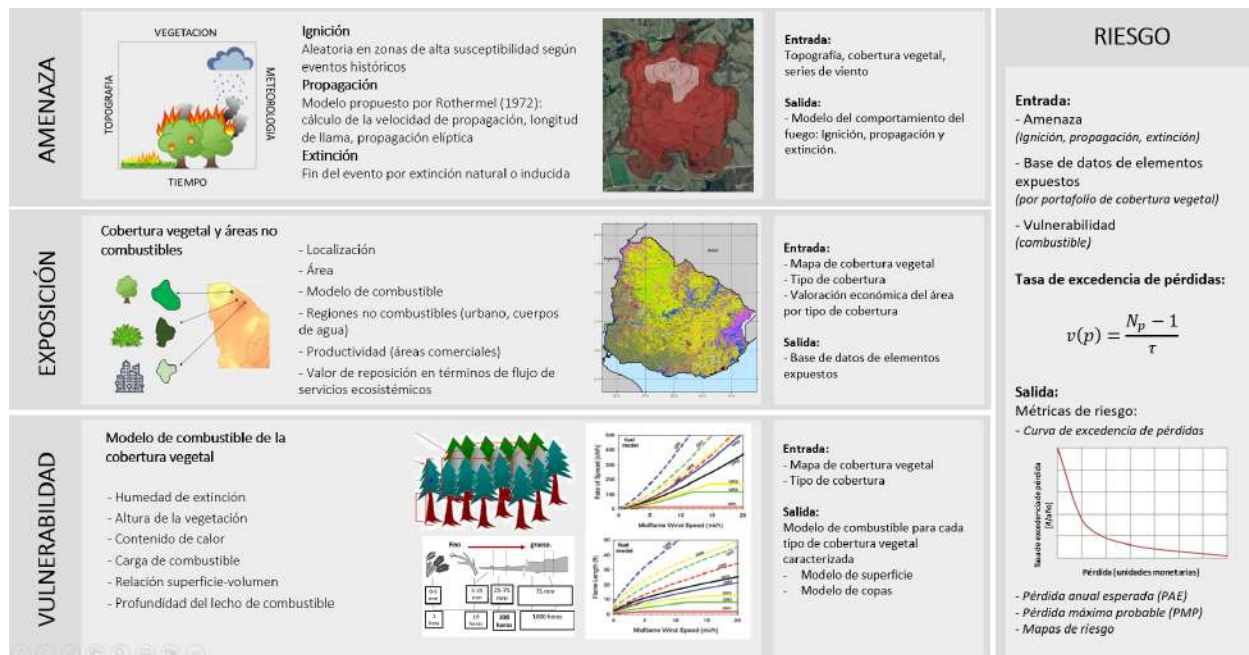


Figura 16. Esquema de componentes del modelo de riesgo por incendios forestales implementado.

Todo incendio forestal tiene un inicio, un desarrollo y un final. Las condiciones de inicio se describen en el modelo de ignición, en el cual se simula la ocurrencia de focos de fuego dentro del territorio de estudio. El desarrollo del incendio se simula por medio de un modelo de propagación, en el cual se determina la manera como la vegetación se consume a medida que pasa el tiempo, bajo la influencia de condiciones climáticas de humedad, temperatura y viento. Por último, la finalización del incendio se establece por medio de un modelo de extinción, que puede ser de extinción natural o inducida, y con el cual se busca representar las condiciones bajo las cuales la reacción en cadena asociada a la combustión no puede continuar más.

La vegetación quemada es susceptible a acarrear el fuego en función de su contenido de combustible. El modelo de combustible da cuenta de una serie de características, como: i) la carga combustible, que mide la cantidad de combustible por unidad de área; ii) la relación entre área superficial y volumen, que es una relación de forma y que modifica el tiempo que le toma al fuego secar y consumir los elementos del estrato por el cual se propaga; iii) la profundidad del lecho, que está asociada a la cantidad de combustible y a la altura que pueden alcanzar las llamas; iv) la humedad de extinción de la vegetación, muy importante a la hora de modelar el proceso de extinción, natural o inducida; y v) el contenido de calor, que determina en parte la facilidad con la cual la reacción puede propagarse a la vegetación circundante. La pérdida se determina a partir del flujo anual de servicios ecosistémicos prestado por la vegetación quemada, que deja entonces de percibirse por parte de la sociedad.

6.2 Resultados de la evaluación

La Tabla 6 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 4 municipios, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 17 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático en cada municipio. La Figura 18 muestra las curvas de PML de cada municipio.

Tabla 6. Pérdidas Anuales Esperadas por incendios forestales

Municipio	Valor expuesto	Clima base		RCP 2.6		RCP 4.5	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
San Vicente del Cagúan	\$ 53,183,615	\$ 154,416	2.9	\$ 223,371	4.2	\$ 212,734	4.0
Palermo	\$ 1,576,243	\$ 2,999	1.9	\$ 4,408	2.8	\$ 4,571	2.9
Orocué	\$ 1,972,901	\$ 9,544	4.8	\$ 12,025	6.1	\$ 20,490	10.4
Cumaribo	\$ 115,224,020	\$ 407,677	3.5	\$ 556,479	4.8	\$ 506,742	4.4

Municipio	Valor expuesto	RCP 6.0		RCP 8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
San Vicente del Cagúan	\$ 53,183,615	\$ 203,829	3.8	\$ 463,248	8.7	\$ 202,098	3.8
Palermo	\$ 1,576,243	\$ 5,044	3.2	\$ 5,848	3.7	\$ 4,209	2.7
Orocué	\$ 1,972,901	\$ 19,469	9.9	\$ 28,631	14.5	\$ 2,072	1.1
Cumaribo	\$ 115,224,020	\$ 880,582	7.6	\$ 910,270	7.9	\$ 460,896	4.0

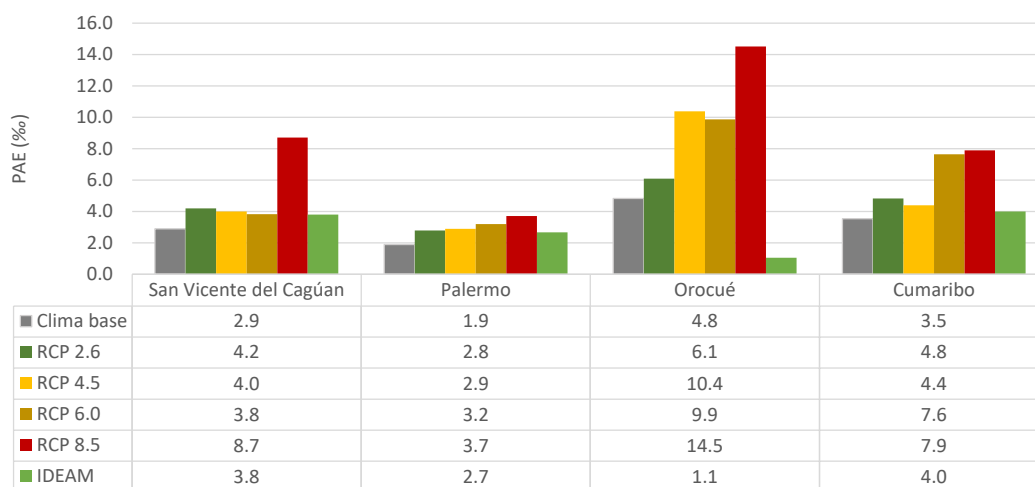


Figura 17. Pérdida anual esperada relativa por incendios forestales (al millar) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

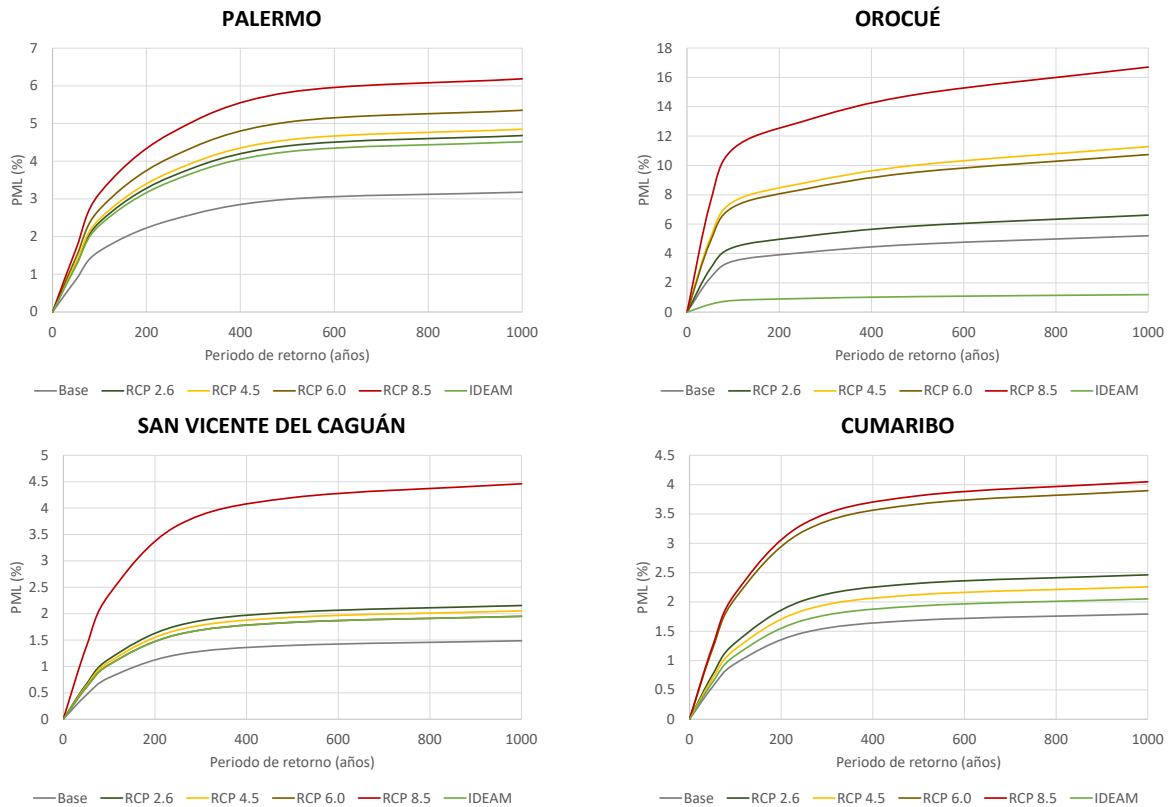


Figura 18. Curvas de PML relativa por incendios forestales (en porcentaje) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

En este caso, y dado que la evaluación se realiza a una escala detallada, es posible construir mapas de áreas quemadas para la totalidad de los eventos simulados. Estos mapas se incluyen en el Anexo 5. Así mismo, los archivos georreferenciados correspondientes se incluyen en el Anexo Digital.

7 REFERENCIAS

Bernal, G., Rincon, D., Escovar, M.A. & Cardona, O. D. (2018). Drought Pro: Computer program for probabilistic drought risk assessment of crops and livestock systems.

Bloemendaal, N., Haigh, I. D., de Moel, H., Muis, S., Haarsma, R., & Aerts, J. C. J. H. (2020). Generation of a global synthetic tropical cyclone hazard dataset using STORM. *Scientific Data*, 7(1), 1-12. [40]. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0381-2>, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0381-2>

Cardona, O.D., Bernal, G., Pabón, J.D., M. A., Marulanda, M. C., Carreño, M. L., González, D., Villegas, C., Marulanda, P., Grajales, S., Rincón, D., Molina, J.F. (2020). Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia – Fase 1. Expertise France. INGENIAR Risk Intelligence Ltda. Bogotá.

Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, 2010: The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 363-376. doi:10.1175/2009BAMS2755.1

Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., Raes, D. FAO Irrigation and Drainage Paper 66, 2012