

# GUÍA PARA EL ANÁLISIS DETALLADO DE RIESGO CLIMÁTICO

Tomo 3: Casos Piloto





# Guía para el Análisis Detallado de Riesgo Climático

Renny Lopez, CAF - Vicepresidente de Riesgos.  
José Montoya, CAF - Jefe Unidad de Gestión de Riesgos Ambientales y Sociales

**Editor:**  
CAF

**Equipo de trabajo:**

- Edgar Salas, CAF.
- Sandra C. Mendoza, CAF.
- Tatiana Kucharsky, Consultora CAF.

**Autores:**  
Consultora: consorcio Tecnalia - IH Cantabria:

- Jorge Paz
- Manuel del Jesus
- Elena Turienzo
- Salvador Navas
- Lexuri Yurrebaso
- José Antonio Martínez
- Nerea Tarrago
- Javier Díez
- Nieves Peña

**Imágenes de las publicaciones:**  
CAF y Pixabay

Este documento ha sido producido con la ayuda financiera de la Unión Europea y CAF. Las opiniones expresadas en este documento no pueden considerarse de ninguna manera como un reflejo de la opinión oficial de dichas instituciones.  
Diciembre, 2019.

# Contenido

1. Piloto 1: Energía hidroeléctrica	10
1.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático	11
1.2 Identificación de amenazas y valoración de la exposición	12
1.2.1 Distribución inicial de las principales variables que rigen el ciclo hidrológico	12
1.2.2 Generación de escenarios climáticos y escenarios de usos del suelo para la cuenca estudiada	14
1.2.3 Simulación y calibración de un modelo hidrológico	20
1.2.4 Generación de escenarios hidrológicos futuros	23
1.3 Análisis de la vulnerabilidad	24
1.3.1 Estimación del comportamiento de los embalses	24
1.3.2 Estimación del desgaste de los elementos mecánicos	25
1.3.3 Estimación de la producción energética	27
1.4 Evaluación del riesgo	31
1.4.1 Simulación del impacto económico del cambio climático	31
1.5 Selección y análisis de las potenciales medidas de adaptación	35
1.5.1 Manejo de la incertidumbre	35
1.5.2 Selección de las potenciales medidas a estudiar	36
1.5.3 Análisis costo beneficio	37
1.5.4 Ruta de adaptación a largo plazo propuesta	40
1.5.5 Limitaciones de los modelos y mecánicas empleadas	41
1.6 Conclusiones	41
2. Piloto 2: Vial/carreteras	43
2.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático	45
2.2 Descripción general de la metodología	46
2.2.1 Recopilación de la información climática actual	46
2.2.2 Generación de las curvas IDF	47
2.2.3 Recopilación de la información de cambio climático	47
2.2.4 Actualización de las curvas IDF por el cambio climático	51
2.2.5 Metodología alternativa	52
2.3 Exposición	57
2.4 Vulnerabilidad	57
2.5 Riesgo	58
2.6 Evaluación de medidas	59
2.7 Conclusiones	59
3. Piloto 3: Protección ciudades/inundación fluvial	61
3.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático	63
3.2 Descripción general de la metodología	63
3.2.1 Evaluación del riesgo por inundación fluvial	63
3.2.1.1 Caracterización hidrográfica del área de estudio	63
3.2.1.2 Recopilación de la información climática e hidrológica actual	64
3.2.1.3 Generación de las curvas IDF	65
3.2.1.4 Recopilación de datos de cambio climático	66
3.2.1.5 Actualización de las curvas IDF en los periodos horizonte futuros y para los escenarios de cambio climático seleccionados	67
3.2.1.6 Estimación de los caudales en el presente y a futuro	67
3.2.1.7 Estimación de calados y velocidades asociados a los caudales generados en el paso anterior	69
3.2.1.8 Exposición	70
3.2.1.9 Vulnerabilidad	72
3.2.1.10 Riesgo	77
3.2.1.11 Evaluación de medidas	77
3.2.2 Evaluación del riesgo de sequía urbana	78
3.2.2.1 Análisis general del sistema de abastecimiento de agua del área metropolitana del núcleo urbano de estudio	78
3.2.2.2 Análisis de recursos disponibles y demandas hídras	80
3.2.2.3 Análisis de demandas y del balance hídrico	82
3.2.2.4 Exposición	85
3.2.2.5 Vulnerabilidad	85
3.2.2.6 Riesgo	85
3.2.2.7 Alternativas	86
3.2.3 Conclusiones	88

4. Piloto 4: Energía eólica	91
4.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático	94
4.2 Descripción general de la metodología	95
4.2.1 Descripción de los datos utilizados	95
4.2.2 Extrapolación del viento en altura	96
4.2.3 Cálculo de los parámetros de la distribución de probabilidad	96
4.2.4 Aplicación de la delta relativa	97
4.2.5 Cálculo de la energía generada en escenarios futuros	100
4.3 Análisis de la vulnerabilidad	102
4.4 Evaluación del riesgo	102
4.5 Evaluación de medidas de adaptación	102
4.6 Conclusiones	103
4.7 Resultados adicionales	103
5. Referencias	107

## Figuras

Figura 1	Esquema global del conjunto de aprovechamientos objeto de estudio	11
Figura 2	Distribución de pluviómetros utilizados para construir el clima base en la cuenca del río Paute en Ecuador	12
Figura 3	Ejemplo de mapas medios de precipitación (izquierda) y temperatura (derecha) generados mediante interpolación de la información puntual en la cuenca del río Paute (Ecuador)	14
Figura 4	Ejemplo de serie observada (en verde) y reconstruida (en rojo) para un pluviómetro	14
Figura 5	Ejemplo de mapas de cambios porcentuales de la precipitación media por cada subcuenca para la cuenca del río Paute en Ecuador	15
Figura 6	Resultados de proyecciones de caudal sólido bajo un escenario de cambio climático obtenidos del modelo y agregados por subcuenca	16
Figura 7	Tasa de cambio en superficie de usos de suelo a año horizonte 2070	19
Figura 8	Distribución de aforos en la cuenca del río Paute (Ecuador)	20
Figura 9	Ejemplo de información sobre el área de estudio en la cuenca del río Paute (Ecuador)	21
Figura 10	Ejemplo de distribución espacial de usos del suelo sobre la cuenca del río Paute (Ecuador)	21
Figura 11	Ejemplo de información macroclimática. Medias de precipitación y vientos a diferentes alturas para Enero y Julio	22
Figura 12	Ejemplo de serie de caudales observados (azul) y simulados (rojo) mediante el modelo hidrológico SWAT para un aforo dado	22
Figura 13	Resultados de proyecciones de caudal bajo un escenario de cambio climático obtenidos del modelo y agregados por subcuenca	23
Figura 14	Esquema de presas, conexiones y centrales del sistema hidroeléctrico del Paute (Ecuador) modelado mediante el software HEC-ResSim	24
Figura 15	Producción hidroeléctrica mensual para una central evaluada a partir de las simulaciones realizadas con HEC-ResSim	25
Figura 16	Curva de rendimiento típica para diferentes tipos de turbinas	28
Figura 17	Generación mensual de energía (GWh) en los diferentes escenarios estimada en el aprovechamiento Alazán empleando datos del downscaling estadístico (izquierda) y dinámico (derecha)	28
Figura 18	Síntesis de las estimaciones de generación eléctrica (GWh/año) en los diferentes escenarios para el aprovechamiento Alazán en base a los datos del downscaling estadístico (izquierda) y dinámico (derecha)	29
Figura 19	Previsión de evolución de la producción hidroeléctrica del proyecto Mazar Dudas según las proyecciones climáticas generadas en base al downscaling estadístico	29
Figura 20	Cambio de la producción energética de las centrales del complejo Paute Integral respecto al año base (MWh/año)	30
Figura 21	Previsión de evolución de la producción hidroeléctrica de uno de los aprovechamientos del complejo Paute Integral según las proyecciones climáticas generadas en base al downscaling estadístico	30
Figura 22	Cambio en el componente variable de las centrales del complejo Paute Integral respecto al año base (promedio de cada periodo, en miles de USD/año)	31
Figura 23	Impacto económico sobre el Sistema Nacional Interconectado de Ecuador para el complejo Paute Integral, considerando un escenario "promedio" de precipitación (miles USD/año). Downscaling dinámico (arriba) y estadístico (abajo)	32
Figura 24	Cascada de incertidumbres que analiza el proyecto	35
Figura 25	Modelos matemáticos empleados para valorar el efecto de cada medida	37
Figura 26	Relaciones entre las tareas de simulación matemática y el análisis costo beneficio	38
Figura 27	Representación esquemática de las principales decisiones y medidas para la adaptación	40
Figura 28	Localización del caso de estudio	44
Figura 29	Ejemplo de hietogramas sintéticos generados en el proyecto	47

Figura 30	Series temporales de precipitación del periodo histórico y de los periodos futuros extraídas de los modelos climáticos	48
Figura 31	Acceso al portal de datos NCCS	48
Figura 32	Vista del portal de datos NCCS	49
Figura 33	Distribuciones de la precipitación obtenidas del modelo	49
Figura 34	Hietogramas sintéticos del tipo I para el periodo de retorno de 10 años	52
Figura 35	Hietogramas sintéticos del tipo I para el periodo de retorno de 100 años	52
Figura 36	Ejemplo del método delta de corrección de sesgo aplicado a la estación de Turco	53
Figura 37	Ejemplo del método directo de corrección de sesgo aplicado a la estación de Turco	54
Figura 38	Ejemplo del método de mapeo de cuantiles de corrección de sesgo aplicado a la estación de Turco	55
Figura 39	Hietogramas sintéticos del tipo I para el periodo de retorno de 10 años	56
Figura 40	Hietogramas sintéticos del tipo I para el periodo de retorno de 100 años	56
Figura 41	Localización del caso de estudio	62
Figura 42	Cuencas de la zona de estudio	64
Figura 43	Localización de la estación pluviométrica de Minca	64
Figura 44	Localización de las estaciones hidrométricas Bocat Santa Marta y Minca	65
Figura 45	Relaciones IDF de la estación de Minca	65
Figura 46	Cambio en la precipitación media anual para el periodo 2040-2059 respecto a 1986-2005 para el escenario RCP4.5	66
Figura 47	Hidrogramas de diseño para un evento de 100 años de periodo de retorno	68
Figura 48	Caudales máximos en las subcuencas para diferentes periodos de retorno	68
Figura 49	Resultados de Calado (m) para T20. Vista general (escala 1:50000 en el original)	69
Figura 50	Resultados de Velocidades (m/s) para T20. Vista general (escala 1:50000 en el original)	70
Figura 51	Superficie edificada expuesta a eventos de inundación de periodo de retorno de 10 años. Vista general (escala 1:50000 en el original)	71
Figura 52	Comparativa de la población expuesta para diferentes periodos de retorno en la situación actual y en el escenario tendencial	72
Figura 53	Ejemplo de edificaciones con calidad constructiva A	72
Figura 54	Ejemplo de edificaciones con calidad constructiva B	73
Figura 55	Ejemplo de edificaciones con calidad constructiva C	73
Figura 56	Ejemplo de edificaciones con calidad constructiva D	73
Figura 57	Funciones de daño para calcular los riesgos de inundación	74
Figura 58	Funciones de daño para infraestructuras críticas de tipo A y B	75
Figura 59	Funciones de daño para infraestructuras críticas de tipo C y D	76
Figura 60	Zonas en las que se divide el sistema de acueducto de la ciudad de Santa Marta	79
Figura 61	Principales cuencas en la zona de Santa Marta	80
Figura 62	Evolución de las necesidades de agua bruta en función de las hipótesis de evolución de las demandas	84
Figura 63	Resumen de precios unitarios resultantes según alternativa y escenario	86
Figura 64	Valoración total del impacto no monetario de las alternativas analizadas (1: impacto despreciable; 5: impacto muy alto)	87
Figura 65	Localización del caso de estudio	93
Figura 66	Esquema del contexto para la evaluación de riesgos climáticos de un proyecto eólico	94
Figura 67	Frecuencia de velocidad de vientos en la zona de estudio	96
Figura 68	Distribución probabilidad Weibull Minimum de los datos de velocidad de viento de CMIP5 históricos (1985-2005) y de futuro (2036-2055) en el escenario de cambio climático RCP4.5	98
Figura 69	Distribución de probabilidad de Weibull Minimum de los datos de velocidad de viento de ERA5 (1986-2005) y los datos de ERA5 tras aplicar la delta relativa con los datos CMIP5 históricos (1986-2005) y RCP4.5 (2036-2055)	98
Figura 70	Distribución probabilidad Weibull Minimum de los datos de velocidad de viento de CMIP5 históricos (1985-2005) y de futuro (2036-2055) en el escenario de cambio climático RCP8.5	99
Figura 71:	Gráfica de la distribución de probabilidad de Weibull Minimum de los datos de velocidad de viento de ERA5 (1986-2005) y los datos de ERA5 tras aplicar la delta relativa con los datos CMIP5 históricos (1986-2005) y RCP8.5 (2036-2055)	99
Figura 72	Curva de potencia del modelo de turbina GW 70/1500	100
Figura 73	Curva de potencia del modelo de turbina GW 77/1500	100

## Tablas

Tabla 1	Correspondencia entre las categorías de usos del suelo de la cartografía del SUIA y las empleadas en el modelo SWAT	17
Tabla 2	Cambios en los usos del suelo del conjunto de la cuenca en el periodo 1990-2000	18
Tabla 3	Cambios en los usos del suelo del conjunto de la cuenca en el periodo 1990-2000 agrupando categorías	18
Tabla 4	Parámetros iniciales (año base) considerados para el estudio del desgaste en cada central del complejo Paute Integral	25

Tabla 5	Porcentaje de cambios en la carga de sedimento con respecto al periodo de referencia (%) y su desviación estándar (%) para los periodos y captaciones del estudio	26
Tabla 6	Desgaste en cada central del complejo Paute Integral estimado para cada horizonte temporal, según variación de sólidos en suspensión	26
Tabla 7	Datos técnicos de las centrales hidroeléctricas del estudio de caso	27
Tabla 8	Impacto económico del desgaste en cada central del complejo Paute Integral, estimado para cada horizonte temporal, según variación de sólidos en suspensión	33
Tabla 9	Impacto económico estimado del cambio climático debido a la variación de caudales y de la concentración de sólidos en suspensión según el downscaling dinámico (miles USD/año)	34
Tabla 10	Impacto económico estimado del cambio climático debido a la variación de caudales y de las concentraciones de sólidos en suspensión según el downscaling estadístico (miles USD/año)	34
Tabla 11	Análisis económico de las diferentes medidas y escenarios para todas las centrales considerando una tasa de descuento del 12% y las hipótesis generales	39
Tabla 12	Valores de máxima lluvia diaria (en mm) para distintos periodos de retorno, en distintos periodos horizonte y escenarios	50
Tabla 13	Factores multiplicadores para transformar la precipitación máxima diaria de distintos periodos de retornos en su proyección bajo cambio climático	51
Tabla 14	Valores de la máxima precipitación en 24 horas, en mm, asociada a distintos periodos de retorno en la estación de Turco	51
Tabla 15	Factores multiplicadores para transformar la precipitación máxima diaria de distintos periodos de retornos en su proyección bajo cambio climático	55
Tabla 16	Valores de la máxima precipitación en 24 horas, en mm, asociada a distintos periodos de retorno en la estación de Turco	56
Tabla 17	Nombre, localización y altitud de la estación pluviométrica utilizada en el análisis	64
Tabla 18	Nombre, localización y altitud de las estaciones de aforo utilizadas en el análisis	65
Tabla 19	Resultados del análisis de cambio climático del régimen extremal de precipitación	67
Tabla 20	Valor económico de las edificaciones	71
Tabla 21	Funciones de daño en función de la calidad constructiva de las edificaciones (228)	74
Tabla 22	Funciones de daño para las diferentes categorías de infraestructuras críticas	75
Tabla 23	Estimación de aportaciones totales y disponibles en los ríos cercanos (Sierra Nevada) en situación de diseño. Clima actual	81
Tabla 24	Estimación de aportaciones totales y disponibles en los ríos cercanos (Sierra Nevada) en situación de diseño. Clima futuro (2050)	81
Tabla 25	Estimación del número de viviendas	82
Tabla 26	Dotaciones medias de abastecimiento por vivienda en litros por vivienda y día (l/viv-día, en función de la hipótesis de evolución y el año horizonte	83
Tabla 27	Pérdidas medias en la red, en función de la hipótesis de evolución y el año horizonte	83
Tabla 28	Superficie industrial estimada en hectáreas (ha)	83
Tabla 29	Dotaciones industriales por hipótesis de demanda, en litros por segundo y hectárea (l/s-ha)	84
Tabla 30	Necesidades totales de agua bruta en situación de diseño, en función de la hipótesis de demanda y el año horizonte (m <sup>3</sup> /s)	84
Tabla 31	Estimación del déficit hídrico en Santa Marta, en función de la hipótesis de demandas y el año horizonte	85
Tabla 32	Ejemplo resumen de alternativas disponibles según la evolución de las demandas de la ciudad de Santa Marta	86
Tabla 33	Ejemplo de valoración de las alternativas según los diferentes criterios considerados en la ciudad de Santa Marta (1: impacto despreciable; 5: impacto muy alto)	87
Tabla 34	Nomenclatura de los parámetros de distribución de Weibul Minimum	97
Tabla 35	Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento de ERA5 (1986-2005) y el modelo de turbina GW 70/1500	101
Tabla 36	Energía eólica generada en un año (kWh)	102
Tabla 37	Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento en el escenario RCP4.5 (2036-2055) y el modelo de turbina GW 70/1500	103
Tabla 38	Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento en el escenario RCP8.5 (2036-2055) y el modelo de turbina GW 70/1500	103
Tabla 39	Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento de ERA5 (1986-2005) y el modelo de turbina GW 77/1500	104
Tabla 40	Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento en el escenario RCP4.5 (2036-2055) y el modelo de turbina GW 77/1500	104
Tabla 41	Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento en el escenario RCP8.5 (2036-2055) y el modelo de turbina GW 77/1500	105

<b>Listado de acrónimos</b>	
<b>BBDD</b>	Base de datos, es decir, conjunto de datos almacenados sistemáticamente.
<b>CAPEX</b>	Acrónimo de los términos ingleses “Capital expenditure”, hace referencia a las inversiones en bienes de capital y el valor de las mismas (p. ej. el valor de los equipos que forman parte de un proyecto de infraestructura).
<b>CBA</b>	Cost-Benefit Analysis o análisis coste-beneficio o costo -beneficio. También se emplean las siglas ACB.
<b>CC</b>	Cambio climático.
<b>CEA</b>	Coste-Effectiveness Analysis o Análisis de coste-efectividad o costo-efectividad. También se emplean las siglas ACE.
<b>CMIP5</b>	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, o Fase 5 del Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados, el principal marco internacional para el desarrollo de modelos de circulación general (GCMs) acoplados océano-atmósfera.
<b>CMIP6</b>	Fase 6 del proyecto CMIP.
<b>DRR</b>	Disaster risk reduction o Reducción del riesgo de desastres.
<b>PTAR</b>	Planta de Tratamientos de Aguas Residuales.
<b>GCM</b>	General Circulation Model o Modelo de circulación general.
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (entidad del Gobierno de Colombia dependiente del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).
<b>IPCC</b>	Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
<b>MCA</b>	Multi-criteria analysis o análisis multicriterio.
<b>OPEX</b>	Acrónimo inglés de “Operational expenditures” que hace referencia a un costo permanente para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema. Ha de entenderse como gasto de funcionamiento, gastos operativos, o gastos operacionales.
<b>RCM</b>	Modelo Climático Regional, que se diferencia de los GCM en que analiza una región concreta del planeta.
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathway o Ruta de concentración representativa.
<b>GIS</b>	Sistema de información geográfica. También se emplean las siglas SIG.
<b>SNI</b>	Sistema Nacional de Información de Ecuador.
<b>SUIA</b>	Sistema Único de Información Ambiental de Ecuador.
<b>SSP</b>	Shared Socioeconomic Pathway o Ruta compartida socioeconómica.
<b>TCN</b>	Tercera Comunicación Nacional.
<b>UE</b>	Unión Europea.

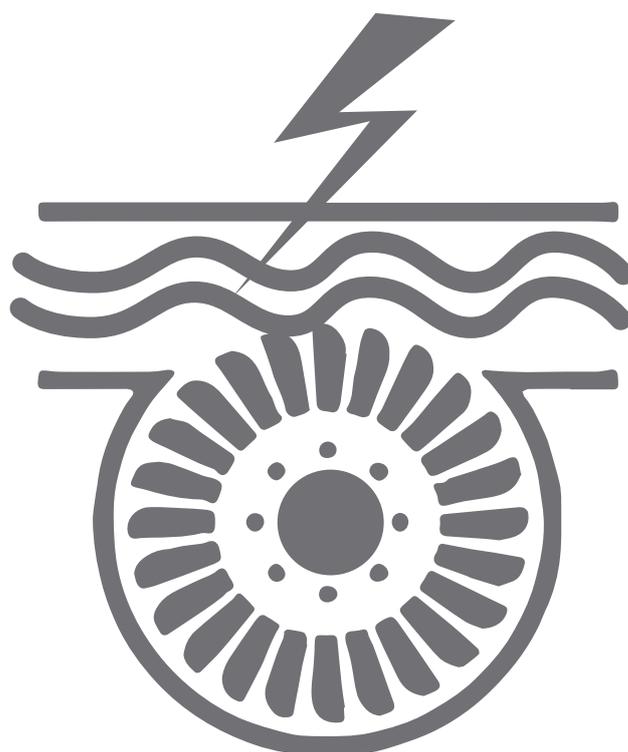


# 3 > TOMO 3: CASOS PILOTO

Piloto 1: Energía hidroeléctrica	10
Piloto 2: Vial/carreteras	43
Piloto 3: Protección ciudades/inundación fluvial	61
Piloto 4: Energía eólica	94
5. Referencias	107

# 1 > Piloto 1: Energía hidroeléctrica

1.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático	11
1.2 Identificación de amenazas y valoración de la exposición	12
1.3 Análisis de la vulnerabilidad	24
1.4 Evaluación del riesgo	31
1.5 Selección y análisis de las potenciales medidas de adaptación	35
1.6 Conclusiones	41



El presente apartado expone un ejemplo concreto del análisis del riesgo climático de un conjunto de proyectos de generación hidroeléctrica. Su objetivo no es exponer de manera detallada los resultados obtenidos, sino mostrar un ejemplo de aplicación de las técnicas y planteamientos descritos ampliamente en la descripción metodológica del Tomo 1. Es por ello que se referencia a dicho Tomo para ver información más detallada sobre el proceso metodológico.

La información contenida en este piloto se basa en el proyecto “Análisis de la vulnerabilidad del proyecto hidroeléctrico Mazar Dudas y del Complejo Paute Integral ante los efectos del cambio climático”. Se trata de un estudio realizado para CAF por Tecnalía, IHCantabria, y la Corporación para la Investigación Energética. En él se analizaron las centrales y cuencas aportantes de los sistemas hidroeléctricos Mazar Dudas y Paute Integral, localizadas en las Provincias de Azuay, Morona Santiago y Cañar de Ecuador. Asimismo, el proyecto abarcaba la identificación y delineación de las medidas de adaptación al cambio climático necesarias para dichas centrales.

Este proyecto fue desarrollado gracias a la colaboración de un amplio grupo de instituciones ecuatorianas (Ministerio del Ambiente del Ecuador, INAMHI, Celec EP, ARCONEL, CENACE, Universidad de Cuenca, etc.) que aportaron los datos precisos para su ejecución, así como asistencia y apoyo técnico e institucional para diseñar las metodologías e hipótesis para la evaluación del impacto del cambio climático sobre el sistema estudiado.

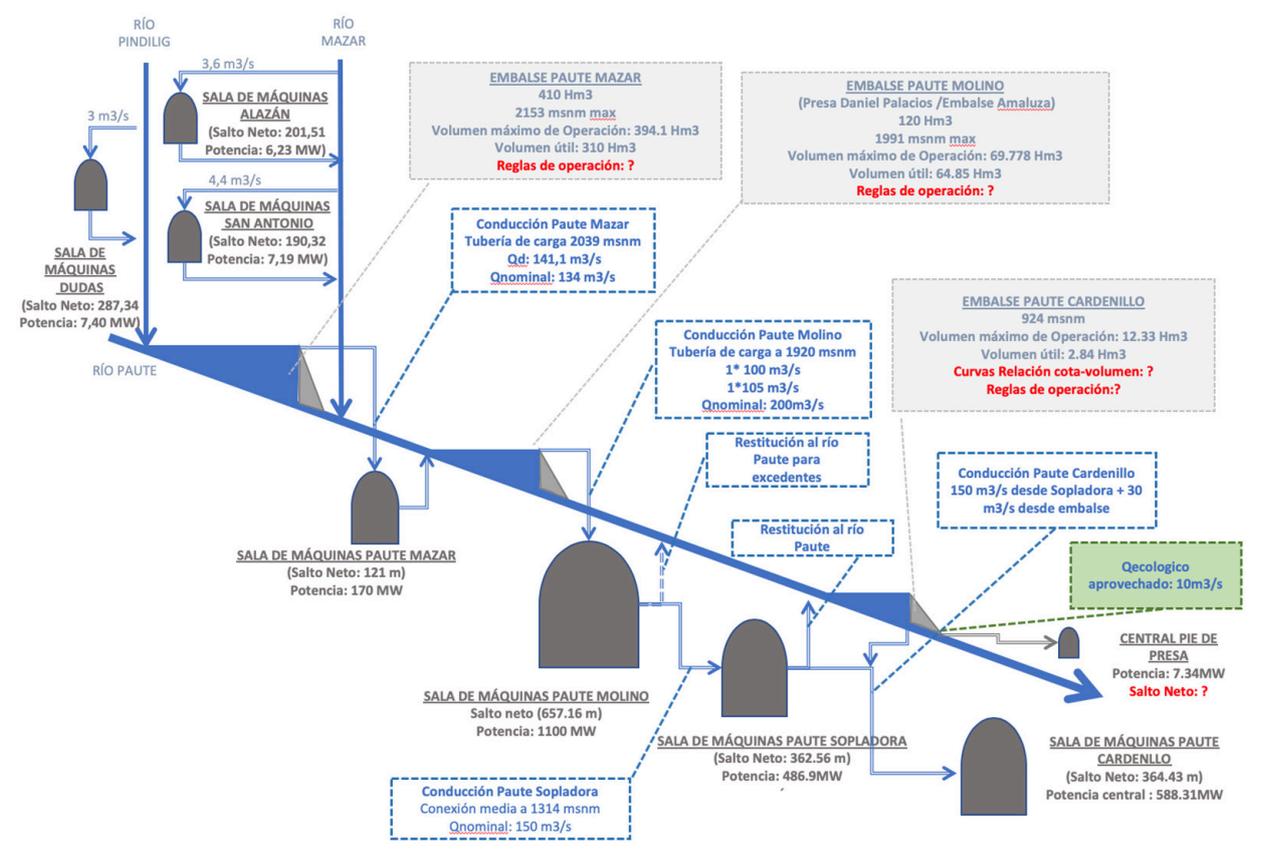
A la hora de exponer este caso se analizan diferentes opciones metodológicas para hacer frente a diferentes limitaciones que pudieran presentarse, evaluando las ventajas e inconvenientes de cada uno de los planteamientos por los que es posible optar a la hora de realizar el análisis.

## 1.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático

El primer paso para evaluar el riesgo climático a que se ve expuesta una central hidroeléctrica o alguno de sus elementos, es recopilar toda la información disponible sobre el área de estudio. La cuenca es un elemento clave al determinar la relación entre la evolución de las variables climáticas (precipitación, temperatura, etc.) y los caudales líquidos y sólidos, que serán las variables que determine el potencial hidroeléctrico.

Cabe destacar la gran complejidad del sistema estudiado. El proyecto Mazar Dudas cuenta con tres aprovechamientos de filo de agua en los ríos Mazar y Pindilig, mientras que el Complejo Paute Integral cuenta con cuatro salas de máquinas asociadas a un sistema de embalses en cascada que, por su elevada potencia, constituyen una pieza clave del sistema energético ecuatoriano (ver Figura 1).

➤ **Figura 1:** Esquema global del conjunto de aprovechamientos objeto de estudio



➤ **Fuente:** elaboración propia

## 1.2 Identificación de amenazas y valoración de la exposición

Tal y como se describía en la metodología, entre los parámetros climáticos a tener en cuenta a la hora de evaluar el impacto del cambio climático en proyectos hidroeléctricos, cabe destacar:

- la variación de los **caudales líquidos** como la variable con un impacto más directo en la operación de la gran mayoría de proyectos.
- los **caudales sólidos**, importantes en ciertas ocasiones como embalses con potenciales problemas de colmatación y turbinas con un elevado ritmo de desgaste, ...
- los **caudales intensos** (asociados a fuertes lluvias) o **extremos (que se registran cada varios cientos o miles de años)**, que pueden ser importantes en proyectos destinados al control de inundaciones.

El caudal líquido es la agregación en el espacio y en el tiempo de la escorrentía superficial y el flujo subterráneo, que en última instancia vienen generados en primera instancia por la **precipitación**, que constituye por tanto la variable generadora de los flujos hidrológicos de los que se alimenta la explotación hidroeléctrica. La precipitación también tiene importancia en sí misma por ser la variable que induce una parte importante de las pérdidas de suelo por erosión, y que por tanto modula la cantidad de sedimento que alcanza los embalses (caudal sólido), sedimento que a su vez limita la capacidad de embalsado y la vida útil de las turbinas, afectando, por tanto, a la operativa de las centrales hidroeléctricas. Precipitación y caudales son, por tanto, el principal foco de análisis.

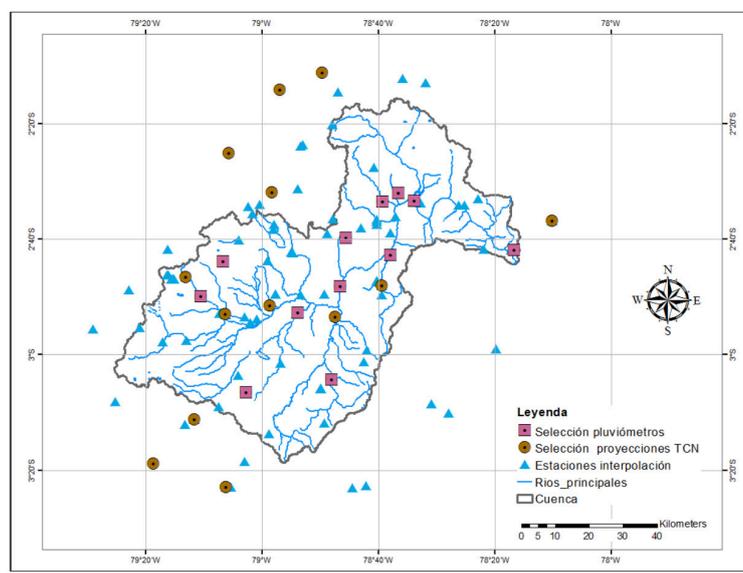
Sin embargo, es muy importante también considerar la **temperatura**, debido al control que ejerce sobre la evapotranspiración, flujo que transporta agua del suelo a la atmósfera y que condiciona el reparto de la lluvia entre infiltración y escorrentía, afectando a la velocidad de respuesta de la cuenca y por tanto a la cantidad de agua aprovechable.

En este marco, para poder llegar a **estimar la evolución de los caudales**, se deberá abordar una simulación hidrológica que considere los escenarios climáticos futuros, comenzando para ello por **caracterizar el clima del escenario base** (precipitación y temperatura) con los datos más recientes posibles y **construir y calibrar un modelo hidrológico**. Estos pasos son los que se describen en los apartados siguientes.

### 1.2.1 Distribución inicial de las principales variables que rigen el ciclo hidrológico

Cómo se indicaba, el clima del escenario base se define, principalmente, utilizando las **observaciones de temperatura, precipitación y caudal a nivel nacional y local**. A nivel nacional, siempre que sea posible, ha de trabajarse con información oficial, proveniente de las agencias o instituciones meteorológicas nacionales del país al que pertenece el área de estudio que, en algunos casos, está controlada por algún Ministerio. A nivel local, la información para la cuenca o la central se obtiene a través de las operadoras de las centrales o los organismos públicos de cuenca. Aunque generalmente tiene una cobertura temporal más reducida que la de ámbito nacional, se trata de una información de mejor resolución espacial y temporal y puede permitir encontrar relaciones entre distintos puntos de la cuenca y aplicar estas relaciones a la información de ámbito nacional para obtener estimaciones en localizaciones donde no se dispone de información.

La Figura 2 muestra, a modo de ejemplo, la información pluviométrica de la que se dispuso para el caso de estudio que se presenta.



➤ **Figura 2:**  
Distribución de pluviómetros utilizados para construir el clima base en la cuenca del río Paute en Ecuador

**Fuente:**  
elaboración propia

Existen otras bases de datos **globales** que proporcionan información de diversas variables climáticas (ver detalle en la metodología del sector) que se basan en información histórica de observaciones, información de satélite o datos de reanálisis. En el apartado “Clima actual” del Tomo 1 se describen las características de esta información y se recomiendan diferentes fuentes.

Tras su recopilación, la **información debe ser tratada y procesada** de manera apropiada para dotarlas de calidad suficiente para caracterizar el clima del área de estudio y que pueda utilizarse para alimentar el modelo hidrológico. Para ello, se analizan los valores medios, las desviaciones estándar, el porcentaje de huecos de las series y los valores anómalos, lo que permite reconstruir la serie para garantizar su calidad.

La información pluviométrica y termométrica puede caracterizarse de la misma manera, aunque es algo más sencilla de tratar la segunda por no presentar intermitencia (es continua, a diferencia de la precipitación que puede estar presente o no) y presentar variaciones más suaves que la precipitación, lo que hace que la interpolación espacial tenga generalmente una precisión mayor. Aunque estos procesos se describen con más detalle en el apartado “Análisis de la variabilidad climática y el cambio climático” del Tomo 1, a continuación, se resume la información esencial para la caracterización de la información, en particular, de la pluviométrica:

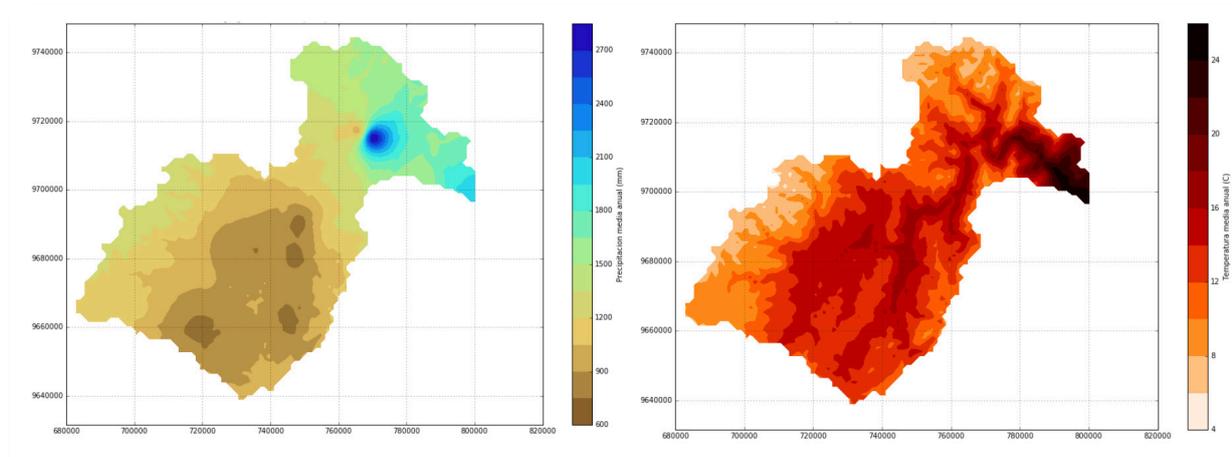
- Para el análisis de valores medios y desviaciones estándar conviene graficarlas sobre un mapa de la cuenca para intentar detectar valores anómalos, es decir, valores muy superiores, o muy inferiores, a todos sus vecinos. Cuando aparezcan valores con estas características es necesario analizar con detalle si puede existir algún fenómeno físico que esté controlando este comportamiento o si, por el contrario, podemos estar ante una información defectuosa.
- Respecto al porcentaje de huecos, no son aceptables porcentajes por encima del 30%, ya que la serie podría no estar capturando adecuadamente los estadísticos de la precipitación y se introducirían errores sistemáticos en la caracterización climática. En otros casos, aunque la presencia de huecos no fuera relevante, puede ser necesario completarla para obtener una serie continua o generar mapas espaciales de la variable. En ambos casos se procede de forma similar, utilizando técnicas como el Kriging o la interpolación por distancia inversas, para rellenar los huecos en las series.
- Por tratarse de una variable que presenta intermitencia, la interpolación de la precipitación se lleva a cabo en dos pasos: en el primero se interpola una variable binaria para determinar si llueve en el momento, o punto, de interpolación o no (valor 1 o 0, respectivamente). En un segundo paso, se procede a interpolar la intensidad de lluvia en caso de que llueva.

Si se requiere la generar un mapa espacial de precipitación, se puede utilizar información adicional para mejorar la precisión de la interpolación y de la generación espacial de precipitación. El proceso más general puede constar de dos fases:

- En una primera fase se buscan relaciones de regresión entre las observaciones de precipitación y otras variables del área de estudio que la puedan explicar, como por ejemplo la elevación, la orientación de las laderas, la cobertura vegetal, los mapas de precipitación obtenidos del satélite o de un modelo de reanálisis, etc. Esta relación de regresión va a permitir explicar parte de la variabilidad de la precipitación en base a variables que están medidas para toda el área de estudio y por lo tanto va a proporcionar una información de calidad para caracterizar la precipitación en toda el área de estudio.
- La segunda fase consiste en interpolar el residuo (diferencia entre el valor real observado y el predicho por el modelo de regresión) a toda el área de estudio, de nuevo mediante técnicas de Kriging o interpolación mediante distancias inversas. El mapa interpolado en esta segunda fase puede sumarse al generado mediante la relación de regresión de la primera fase para reconstruir el mapa de precipitación para toda la cuenca. No hay que olvidar que, también en este caso, la generación ha de llevarse a cabo en dos pasos: primero se genera un mapa binario que indique dónde llueve y dónde no, y posteriormente se genera el mapa de intensidades de lluvia.

El resultado de estos tratamientos podría tener la forma que se observa en la Figura 3.

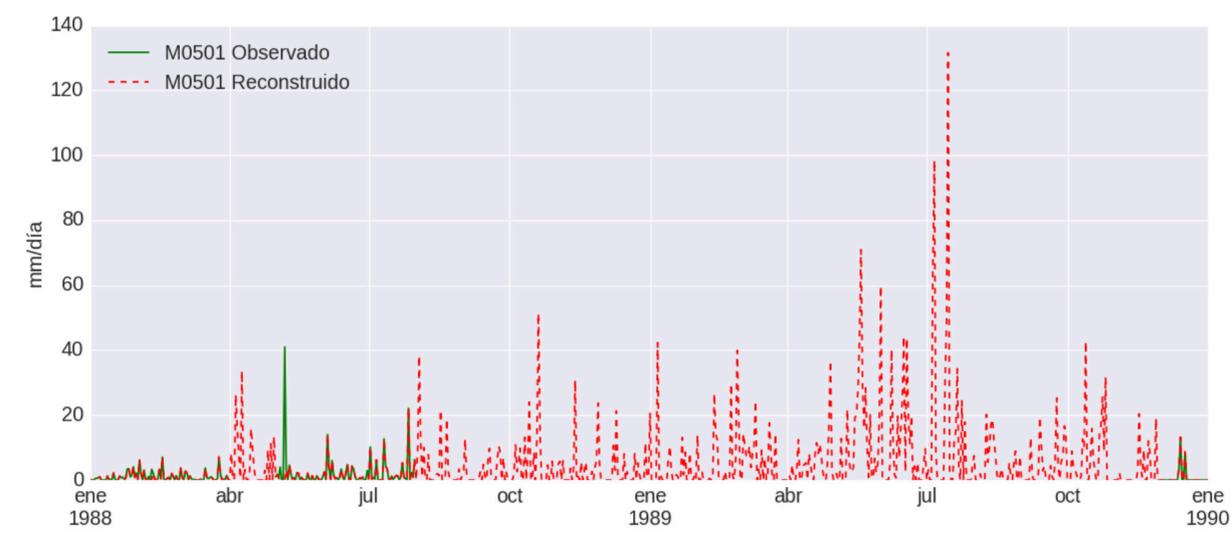
**Figura 3:** Ejemplo de mapas medios de precipitación (izquierda) y temperatura (derecha) generados mediante interpolación de la información puntual en la cuenca del río Paute (Ecuador)



**Fuente:** elaboración propia

- Por último, en el análisis de valores anómalos se analizan aquellos valores que se sitúen más allá de tres desviaciones estándar de la media, por constituir posibles valores anómalos.

**Figura 4:** Ejemplo de serie observada (en verde) y reconstruida (en rojo) para un pluviómetro



**Nota:** La información se reconstruye utilizando datos de reanálisis.

**Fuente:** elaboración propia

## 1.2.2 Generación de escenarios climáticos y escenarios de usos del suelo para la cuenca estudiada

El siguiente paso para la evaluación del riesgo derivado del cambio climático es necesario actualizar las dinámicas climáticas, principalmente la temperatura y precipitación, y utilizarlas para informar al modelo y derivar los cambios en el caudal, que son la variable que controla la producción hidroeléctrica.

El primer paso consiste, por tanto, en recopilar la información de **proyecciones de precipitación y temperatura de los modelos** climáticos. Como sucede con casi la totalidad de variables, las primeras bases de datos a consultar son las oficiales. Las Terceras Comunicaciones Nacionales son la referencia para cualquier estudio de riesgo climático ya que estas proyecciones se generan realizando las correcciones necesarias y aplicando los métodos de reducción de escala que permiten utilizar las salidas de forma sencilla en el análisis de riesgo.

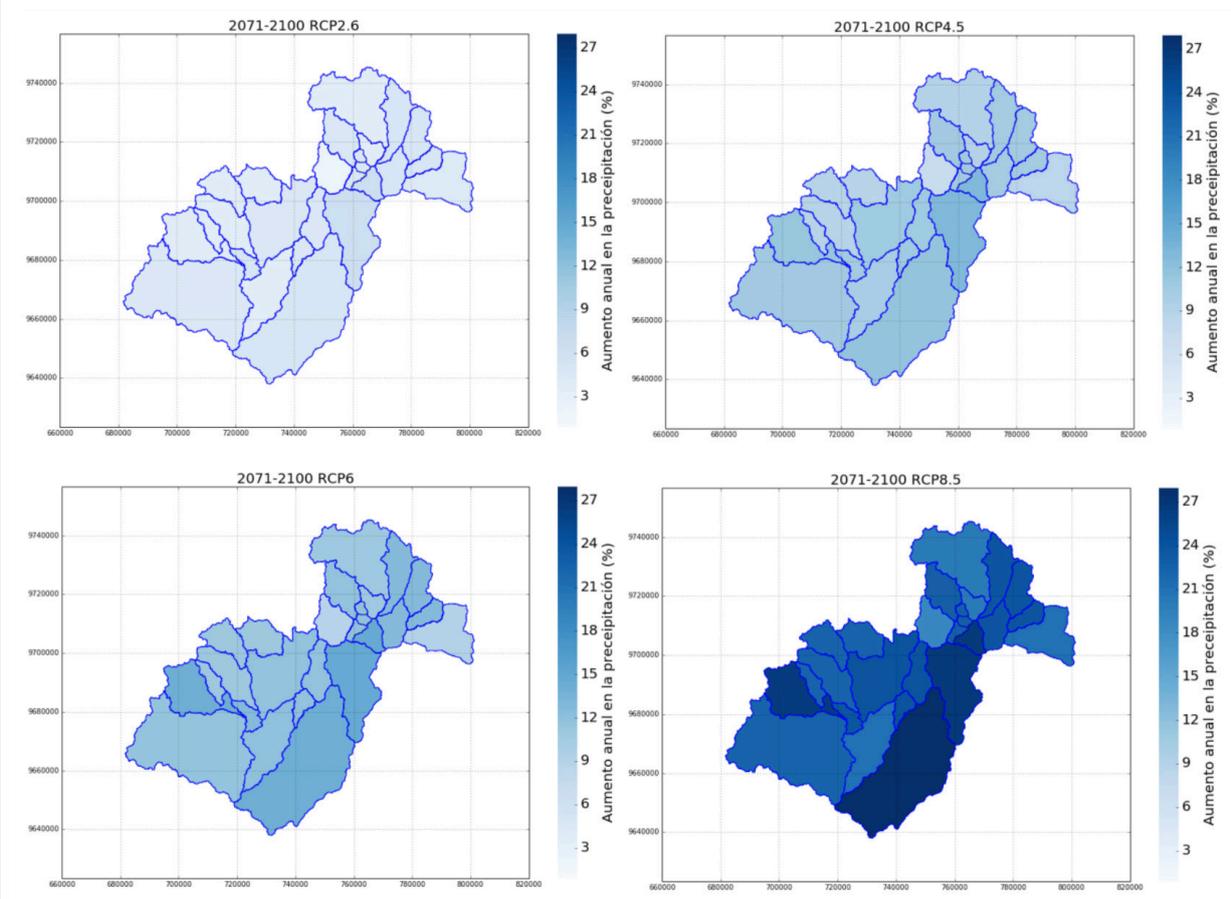
En el caso particular que se está analizando, para la generación de escenarios climáticos se consideraron registros históricos de las estaciones hidrometeorológicas de la cuenca y proyecciones climáticas a largo plazo aportadas por la *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Ecuador*. Estas analizan:

- El periodo actual y tres horizontes temporales futuros: 2011-2040 (corto plazo), 2041-2070 (medio plazo) y 2071-2100 (largo plazo).
- Cuatro sendas de emisión de gases de efecto invernadero o Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés): RCP2,6; RCP4,5; RCP6 y RCP8,5.
- Los resultados generados en base a dos metodologías de reducción de escala o “downscaling”:
  - Escenarios generados considerando la metodología de *downscaling* estadístico para los horizontes temporales 2011-2040, 2041-2070 y 2070-2100 y bajo cuatro RCPs: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5.
  - Escenarios generados considerando la metodología de *downscaling* dinámico para los horizontes temporales 2011-2040 y 2041-2070 y bajo dos RCP: RCP4.5 y RCP8.5.

En el caso de no disponer de información de estas Terceras Comunicaciones Nacionales se recurrirá a otras fuentes, como por ejemplo la base de datos NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP (50)) o la del proyecto CORDEX. Estas bases de datos proporcionan la información de salida de distintos modelos climáticos, que puede utilizarse para derivar las proyecciones de temperatura y precipitación bajo diversos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero y para todo el siglo XXI. Es importante resaltar que la información de estos modelos no debe nunca ser utilizada directamente para alimentar un modelo hidrológico, dado lo grosero de su resolución que origina errores sistemáticos que han de ser corregidos previamente a su utilización (ver técnicas en el apartado “Análisis de la variabilidad climática y el cambio climático” del Tomo 1).

Para el caso piloto concreto que se presenta, la siguiente figura muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para cada uno de los RCPs en el horizonte a largo plazo. Se observa cómo los escenarios climáticos coinciden en el previsible incremento de la pluviometría en la cuenca a medio y largo plazo. En todos los casos, se prevé un incremento generalizado de las precipitaciones en la cuenca estudiada.

➤ **Figura 5:** Ejemplo de mapas de cambios porcentuales de la precipitación media por cada subcuenca para la cuenca del río Paute en Ecuador

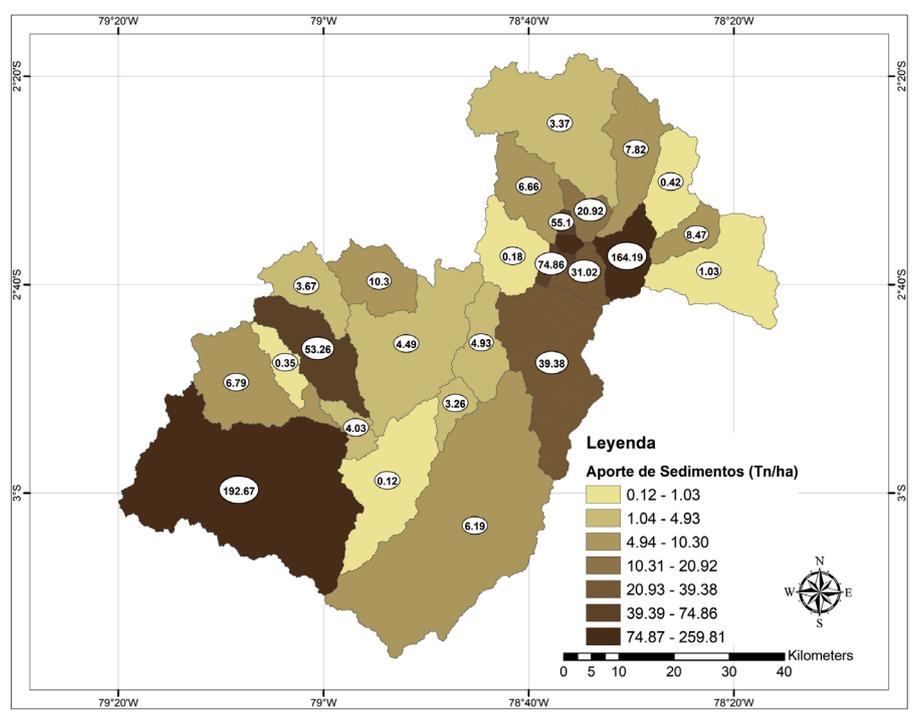


Estos cambios se aplican a la climatología del periodo base para construir las dinámicas climáticas futuras.

➤ **Fuente:** elaboración propia

También se podrán introducir al modelo las proyecciones de otros parámetros, como por ejemplo las de **generación de sedimentos o pérdida de suelo** basadas en las proyecciones de precipitación y el cambio de los usos del suelo, lo que permiten evaluar la aportación de sólidos al embalse (Figura 6).

➤ **Figura 6:** Resultados de proyecciones de caudal sólido bajo un escenario de cambio climático obtenidos del modelo y agregados por subcuenca



➤ **Fuente:** elaboración propia

A la hora de determinar la evolución de los caudales sólidos no tener en consideración exclusivamente las previsibles tendencias climáticas en el futuro, sino que es preciso considerar también aquellas tendencias socioeconómicas que tengan un impacto importante en el sistema estudiado.

La cuenca tiene muchos aspectos que, en líneas generales, permanecerán inalterados a lo largo del tiempo (morfología general, etc.) pero sus **usos del suelo** se verán alterados, fundamentalmente, por la presión antrópica existente en la misma, como consecuencia de los cambios que tienen lugar en las relaciones lluvia-caudal. Los escenarios de usos del suelo se establecen en función de las tendencias de cambio actualmente detectadas, proyectándolas temporalmente en base a la información cartográfica que haya disponible. Esto modificará los parámetros de entrada correspondientes en el modelo.

Para el ejemplo concreto que se está presentando, se manejó la información facilitada por el Sistema Unificado de Información Ambiental (SUIA) del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE), en concreto, las capas de cobertura y uso de la tierra de 1990, 2000, 2008 y 2014. A la hora de seleccionar esta fuente frente a otras alternativas, se valoró positivamente:

- Que proporciona una cobertura casi total de la cuenca, aunque con ciertos vacíos de información en zonas próximas al borde de la misma.
- Que cuenta con diferentes horizontes temporales, por lo que permite evaluar la evolución de los usos del suelo por comparación entre las diferentes capas.
- Que es la misma fuente de información que se ha empleado en el modelado hidrológico de la situación actual, generando mayor coherencia en el análisis y evitando conversiones entre clasificaciones diferentes.

A partir de esta información, se obtuvo la previsible evolución de los usos del suelo (siguiendo la metodología expuesta en el apartado "Hidroenergía" del Tomo 1):

- Se comenzó estableciendo una correspondencia entre las categorías empleadas en la cartografía del SUIA, y las diferentes tipologías que se emplean en el modelo SWAT. Esta correspondencia es necesaria para reclasificar todas las capas de cobertura y uso de la tierra de SUIA. En la tabla siguiente se muestran las correspondencias empleadas para esta reclasificación.

**Tabla 1:** Correspondencia entre las categorías de usos del suelo de la cartografía del SUIA y las empleadas en el modelo SWAT

Tipo de uso de suelo de SUIA, 2014, Nivel-II	Descripción operativa (SUIA)	Código SWAT	Tipo de uso de suelo (SWAT)
<b>MOSAICO AGROPECUARIO</b>	Son agrupaciones de especies cultivadas que se encuentran mezcladas entre sí y que no pueden ser individualizados; y excepcionalmente pueden estar asociadas con vegetación natural.	<b>AGRL</b>	Agrícola genérico
<b>CULTIVO ANUAL</b>	Comprende aquellas tierras dedicadas a cultivos agrícolas, cuyo ciclo vegetativo es estacional, pudiendo ser cosechados una o más veces al año.	<b>AGRR</b>	Agrícola en hileras, cereal, otros
<b>CULTIVO PERMANENTE</b>	Comprenden aquellas tierras dedicadas a cultivos agrícolas cuyo ciclo vegetativo es mayor a tres años, y ofrece durante este periodo varias cosechas.		
<b>CULTIVO SEMI PERMANENTE</b>	Comprenden aquellas tierras dedicadas a cultivos agrícolas cuyo ciclo vegetativo dura entre uno y tres años.		
<b>BOSQUE NATIVO</b>	Comunidad vegetal que se caracteriza por la dominancia de árboles de diferentes especies nativas, edades y portes variados, con uno o más estratos.	<b>FRSE</b>	Bosque perenne
<b>PLANTACION FORESTAL</b>	Masa arbórea establecida antrópicamente con una o más especies forestales.	<b>FRST</b>	Bosque mixto
<b>PASTIZAL</b>	Vegetaciones herbáceas dominadas por especies de gramíneas y leguminosas introducidas, utilizadas con fines pecuarios, que para su establecimiento y conservación, requieren de labores de cultivo y manejo.	<b>PAST</b>	Pastizal
<b>VEGETACION ARBUSTIVA</b>	Áreas con un componente substancial de especies leñosas nativas no arbóreas. Incluye áreas degradadas en transición a una cobertura densa del dosel.	<b>RNGB</b>	Monte bajo, arbustos
<b>VEGETACION HERBACEA</b>	Áreas constituidas por especies herbáceas nativas con un crecimiento espontáneo, que no reciben cuidados especiales, utilizados con fines de pastoreo esporádico, vida silvestre o protección.		
<b>AREA SIN COBERTURA VEGETAL</b>	Áreas generalmente desprovistas de vegetación que, por sus limitaciones edáficas, climáticas, topográficas o antrópicas, no son aprovechadas para uso agropecuario o forestal, sin embargo pueden tener otros usos.	<b>URBN</b>	Urbano
<b>INFRAESTRUCTURA</b>	Obra civil de transporte, comunicación, agroindustrial y social.		
<b>AREA POBLADA</b>	Áreas principalmente ocupadas por viviendas y edificios destinados a colectividades o servicios públicos.		
<b>NATURAL</b>	Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento.	<b>WATR</b>	Agua
<b>ARTIFICIAL</b>	Superficie y volumen asociado de agua estática o en movimiento asociadas con las actividades antrópicas y el manejo del recurso hídrico.		
<b>GLACIAR</b>	Nieve y hielo localizados en las cumbres de las elevaciones andinas.		
<b>PARAMO</b>	Vegetación tropical altoandina caracterizada por especies dominantes no arbóreas que incluyen fragmentos de bosque nativo propios de la zona.	<b>WPAS</b>	Pastos de alta de montaña y de invierno
-	Corresponde a áreas que no han podido ser mapeadas.	Sin Información	

Fuente: elaboración propia

- Mediante la intersección de la información de años consecutivos, se realizó el cálculo de las **superficies que han experimentado cambios** en los usos del suelo a nivel de cantón para toda el área delimitada por la cuenca de estudio.

En el estudio realizado para el Paute, la cartografía del SUIA del MAE proporcionaba información de 1990, 2000, 2008 y 2014. Comparando entre sí estas capas (1990-2000, 2000-2008, 2008-2014) se pudo analizar la evolución en el uso de la tierra para tres periodos de 8 o 10 años para el total de la cuenca y para cada uno de los cantones.

La tabla siguiente presenta, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el conjunto de la cuenca en uno de estos periodos. Cada fila se corresponde con un uso del suelo original en la capa del primer año del periodo y cada celda indica la superficie que mantiene esta categoría de uso en el mapa del año con el que se compara. En este ejemplo, la fila superior incluye toda la superficie que en el mapa de 1990 está clasificada dentro de la cuenca como "Agrícola genérico" (AGRL). En la primera columna de esta fila se indica la superficie que en el mapa del año 2000 mantiene esta categoría. En las siguientes celdas de esta fila se indican las superficies que en el año 2000 están clasificadas como "agrícola en hileras, cereal, otros" (AGRR), "bosque perenne" (FRSE), "bosque mixto" (FRST), etc.

➤ **Tabla 2:** Cambios en los usos del suelo del conjunto de la cuenca en el periodo 1990-2000

		2000								
		AGRL	AGRR	FRSE	FRST	PAST	RNGB	URBN	WATR	WPAS
1990	AGRL	876871125	5012100	38664073	32850808	248260401	177436283	12285552	3640500	3319080
	AGRR	7660800	6047100	24300	159300	167400	2299500	0	5400	0
	FRSE	54691581	9000	1056490305	5689315	40714574	95332670	2960100	1672200	61835154
	FRST	15963300	128700	3212555	34887021	6054300	22459028	270900	147600	448223
	PAST	6261520	89100	12518682	3277800	250342704	28385441	1152555	623050	2762104
	RNGB	64479274	670500	27881322	13022984	19977431	330691290	558000	687418	6597053
	URBN	1221300	0	580500	67500	190800	379800	25605000	320400	38856
	WATR	1204652	0	548752	70200	691200	496355	168300	11751699	1166820
	WPAS	12455406	0	67228102	5439464	7912016	50378112	2905345	2580754	1569679755

Para cada fila, se presenta en color rojo el valor más elevado, y en una escala hasta el verde los valores inferiores. Unidades: m<sup>2</sup>.

➤ **Fuente:** elaboración propia

- A continuación, se realizó un **análisis de las superficies** que han experimentado cambios. A pesar de lo complejo de las tablas generadas, son una herramienta valiosa para detectar tendencias. Para simplificar el análisis, se agrupó la información generada en categorías más amplias, pasando de las 9 categorías originales de SWAT a cinco grupos (urbano, agrícola/ganadero, forestal, agua y páramo), quedando la Tabla 3 como sigue:

➤ **Tabla 3:** Cambios en los usos del suelo del conjunto de la cuenca en el periodo 1990-2000 agrupando categorías

		2000					% del suelo original que modifica su uso
		Urbano	Agrícola /ganadero	Forestal	Agua	Páramo	
1990	Urbano	26	1	1	0	0	10%
	Agrícola /ganadero	13	1401	296	4	6	19%
	Forestal	4	203	1590	3	69	15%
	Agua	0	2	1	12	1	27%
	Páramo	3	20	123	3	1570	9%

Unidades: km<sup>2</sup>.

➤ **Fuente:** elaboración propia

- El siguiente paso consiste en **analizar la relación entre el crecimiento poblacional y las tendencias de cambio de uso** detectadas, para lo que se emplean datos de población a nivel cantonal para los periodos del estudio.

En el caso piloto que se está exponiendo, solo se pudo establecer los cambios poblacionales por cantón en los periodos 1990-2000 y 2000-2008, empleando para ello la “Retroproyección Cantonal por Sexo” de los periodos 1990-2001 y 2001-2010, ambas descargadas del *Sistema Nacional de Información* (<http://sni.gob.ec/proyecciones-y-estudios-demograficos>). Con esta información, se realizaron varias comparativas que mostraron la relación entre la intensidad de la pérdida de superficies de páramo y forestal y el crecimiento poblacional.

- Con los resultados obtenidos, se pasa a **generar las tasas de cambio de usos del suelo** empleando como parámetro la variación poblacional. En el presente caso de estudio se empleó información facilitada por el SNI en su página web:

Para el primer horizonte temporal: *Proyección cantonal por sexo para el periodo 2010-2020* (SENPLADES 2013).

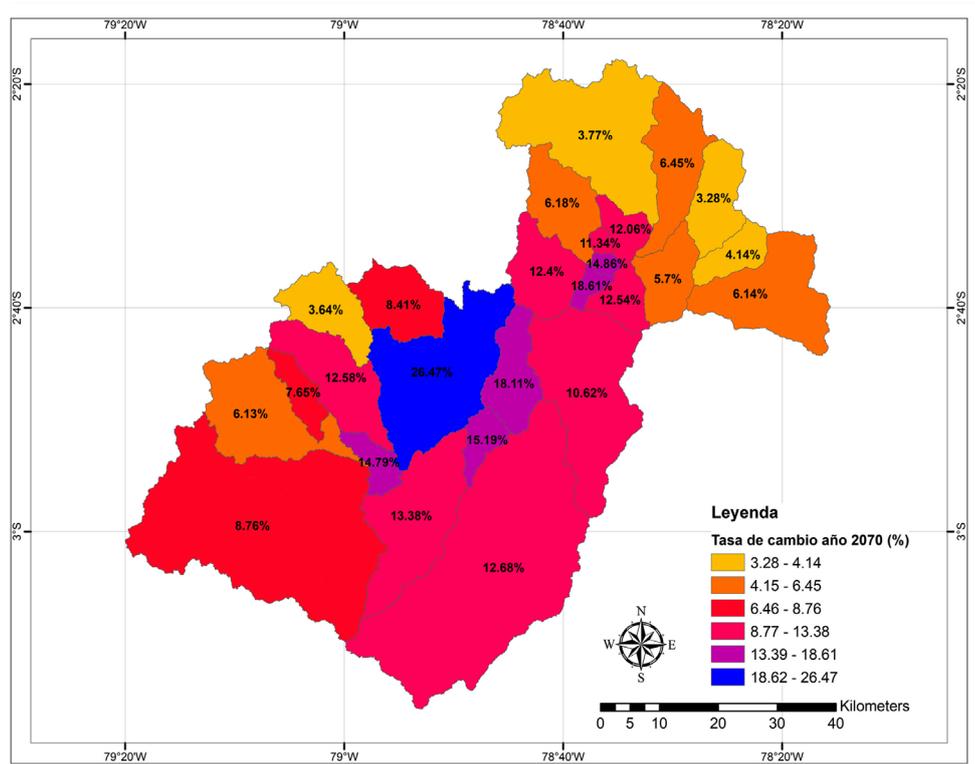
Para los horizontes 2030 a 2050: *Proyecciones a Nivel de Provincias por Grupos de Edad 2010-2050* (INEC 2013). Se modificó la tasa de crecimiento cantonal del periodo 2010-2020 en función de la evolución del crecimiento de los periodos 2020-2030, 2030-2040 y 2040-2050, generándose series de población cantonales para estos periodos.

Para el periodo 2050-2100: *Proyecciones de las series provinciales hasta el año 2100 generadas a partir de las tendencias provinciales del periodo 2010-2050*. En este caso, las proyecciones cantonales se generaron en función de la tendencia calculada para la provincia a la que pertenecen.

Mediante la comparación entre la evolución de la población durante el periodo 1990-2014 y las estimaciones de cambio para los periodos futuros es posible obtener unos factores de corrección que se aplican a las tasas de cambio inicialmente calculadas para el periodo 1990-2014 y generar matrices de cambio de usos del suelo para todos los cantones y periodos estudiados.

- Con la información generada se obtuvo una serie de **mapas de usos del suelo para cada uno de los escenarios futuros**. En este caso particular, se partió del ráster de uso de suelo en el año 2014 para obtener los diferentes ráster de usos de suelo a tiempo futuro.
- Para finalizar, se **analiza la superficie de cambio** de cada una de las subcuencas obteniéndose, para los diferentes horizontes temporales, mapas como el mostrado en la siguiente figura a modo de ejemplo.

➤ **Figura 7:** Tasa de cambio en superficie de usos de suelo a año horizonte 2070



➤ Fuente: elaboración propia

En aquellos casos en los que no se disponga de información que permita valorar las tendencias pasadas de cambios de usos del suelo como base para determinar los usos futuros es posible optar por los siguientes pasos:

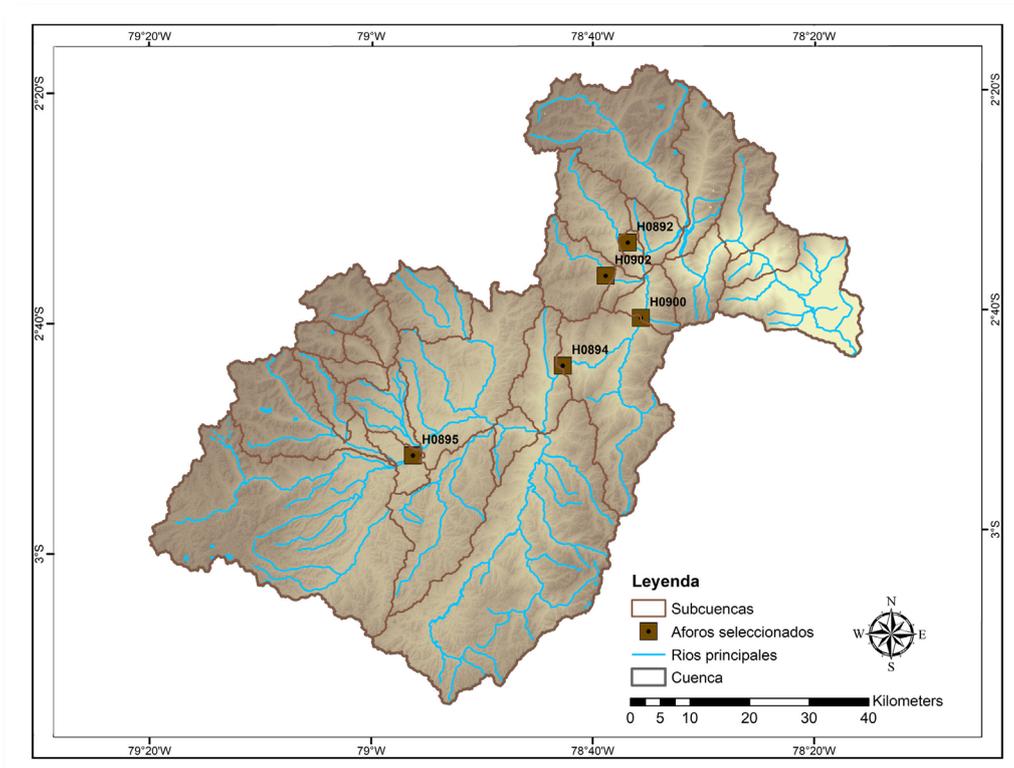
- Emplear escenarios de cambio del uso del suelo como los aportados por las Rutas Socioeconómicas Compartidas o SSP (65) . El principal problema de este planteamiento es que generalmente se aporta esta información a nivel del conjunto de la región y se han de adaptar a la cuenca concreta estudiada.
- Emplear información acerca de deforestación, crecimiento urbano, etc. de otras fuentes. Por ejemplo, el mecanismo REDD+ ha generado horizontes y tasas de deforestación históricas y previstas para los próximos años. La información sobre crecimiento urbano es aportada muchas veces de manera dispersa por diferentes estudios. Esta información no va a permitir establecer tasas de cambio para todos los usos del suelo, pero se ha de tener en cuenta que si se capturan aquellas que tienen un mayor significado hidrológico (cambios de bosque a cultivo, de cultivo a urbano, etc.) es posible que sean suficientes para estimar tendencias generales, aunque no capturen aspectos secundarios (p.ej. aunque no nos permitan generar tendencias de cambio de un tipo de cultivo a otro).

### 1.2.3 Simulación y calibración de un modelo hidrológico

Las simulaciones hidrológicas, realizadas utilizando modelos hidrológicos, permiten interpretar las observaciones hidrológicas y proporcionar valores de los flujos hidrológicos distribuidos en el espacio.

La información hidrológica hace referencia a los flujos de agua una vez que esta ha alcanzado el suelo que, a diferencia de las variables climáticas, suelen medirse en un número reducido de localizaciones, puesto que su medición es más compleja (ver Figura 8). Además, tan solo suele contarse con medidas de caudal y no de otras variables hidrológicas muy útiles como la humedad del suelo o la evapotranspiración. El modelado hidrológico podría verse, por tanto, como una interpolación de los flujos hidrológicos basada en procesos, que permite reconstruir la estructura espacio-temporal de los flujos hidrológicos en base a unas medidas reducidas.

➤ **Figura 8:** Distribución de aforos en la cuenca del río Paute (Ecuador)



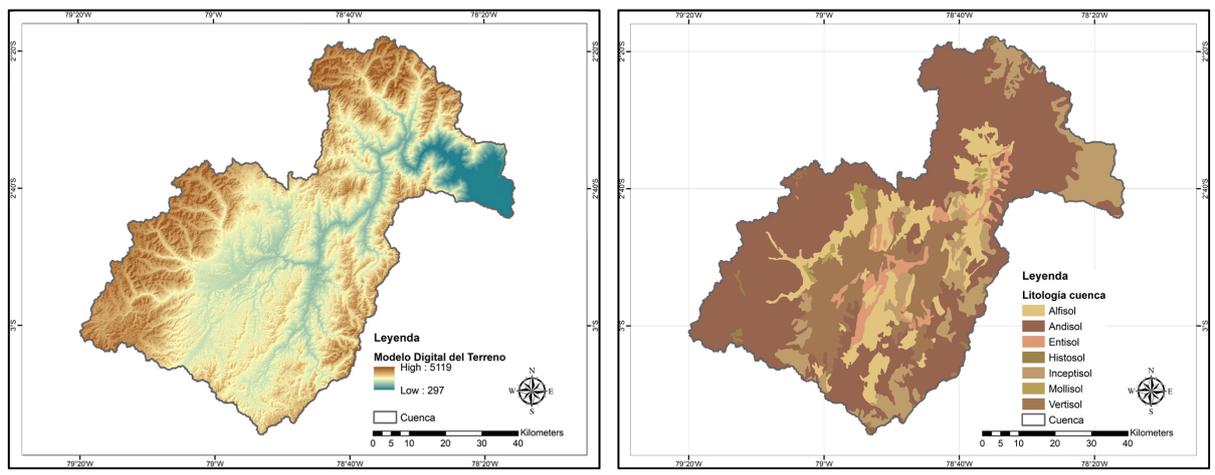
➤ **Fuente:** elaboración propia

Dado que los caudales observados en un punto vienen condicionados por los procesos y características de todos los puntos de su cuenca vertiente y por todos los eventos ocurridos dentro de una ventana de tiempo de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, es de suma importancia recopilar la información de mejor calidad posible, más actual y de mejor resolución espacial, respecto a las características de la cuenca, tal y como se verá a continuación.

Los modelos hidrológicos cuentan con unos parámetros de **calibración** que han de ajustarse a cada cuenca. El modelo se configura combinando la información de las **variables climáticas** (precipitación, temperatura, etc.) con mapas de características del paisaje que muestran diferentes **datos de la cuenca** (tipos de suelo, orografía, etc.). Con ello se buscan los valores de los parámetros que minimizan el error que comete el modelo en la **predicción de los caudales observados**.

Se genera así una cartografía detallada que debe comprender, como mínimo, los mapas de distribución espacial de tipos de suelo, los mapas de distribución de usos de suelo y los mapas de distribución de cobertura vegetal. Las figuras Figura 9 y Figura 10 muestran ejemplos de este tipo de información para el caso de estudio.

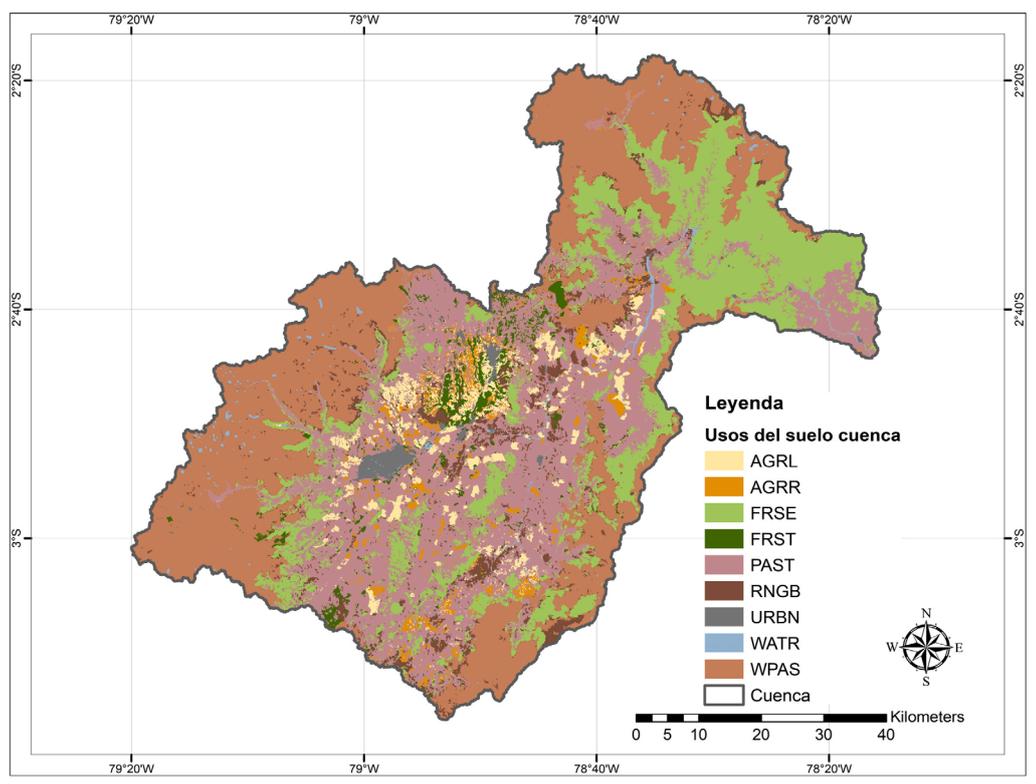
➤ **Figura 9:** Ejemplo de información sobre el área de estudio en la cuenca del río Paute (Ecuador)



**Nota:** La figura de la izquierda muestra el mapa digital de elevaciones y la de la derecha la distribución espacial de tipos de suelo.

➤ **Fuente:** elaboración propia

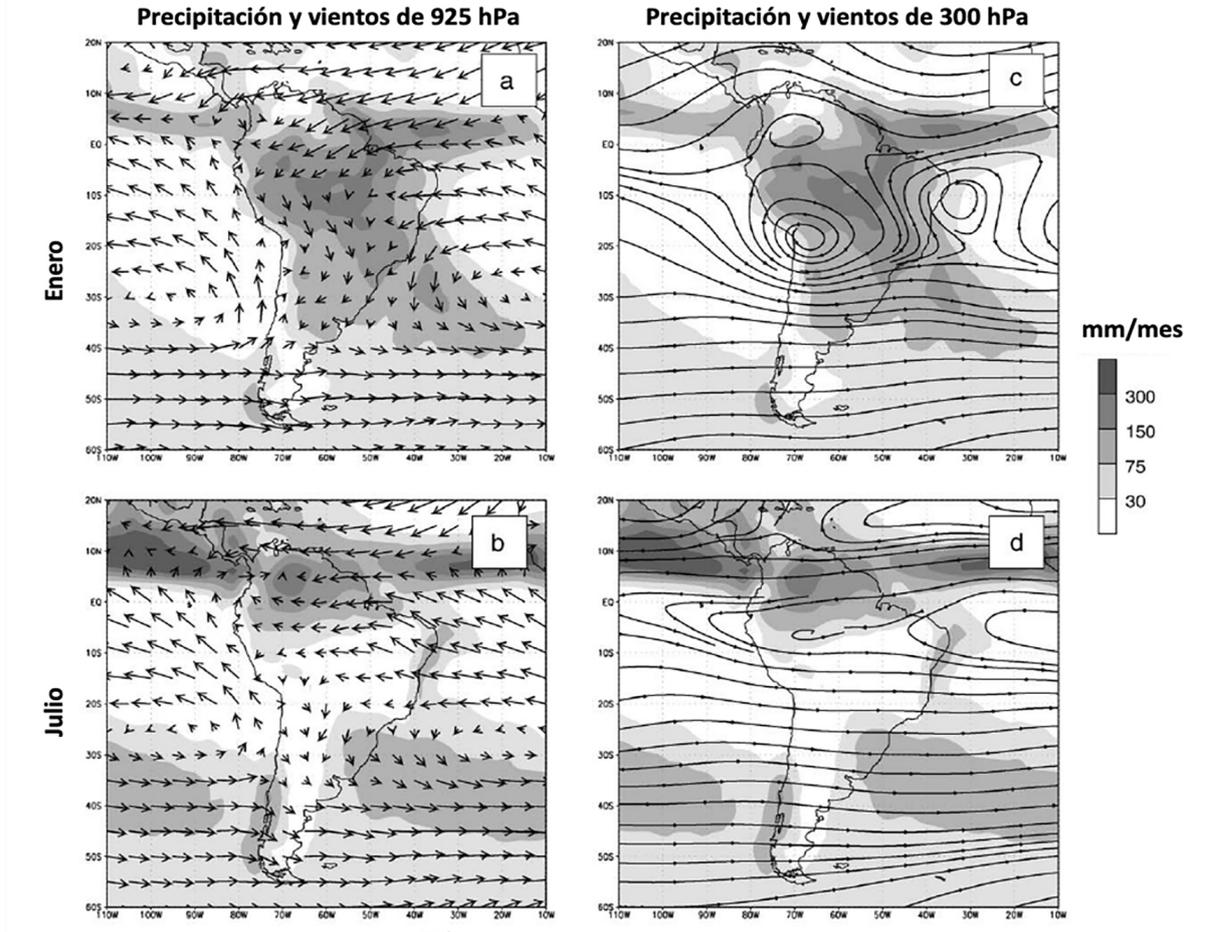
➤ **Figura 10:** Ejemplo de distribución espacial de usos del suelo sobre la cuenca del río Paute (Ecuador)



➤ **Fuente:** elaboración propia

De cara a perfeccionar el modelo, en este análisis inicial de las características de la cuenca es también importante recopilar información relativa a las **características macroclimáticas de la zona de estudio**, ligadas a grandes patrones atmosféricos que controlan el clima de la zona de estudio. La Figura 11 muestra un ejemplo concreto de este tipo de información. Los cambios y fluctuaciones de estos patrones suelen estar muy estudiados en la literatura científica por lo que es posible evaluar de forma sencilla los efectos que tenga sobre el riesgo climático la modificación de estos patrones en el corto, medio y largo plazo.

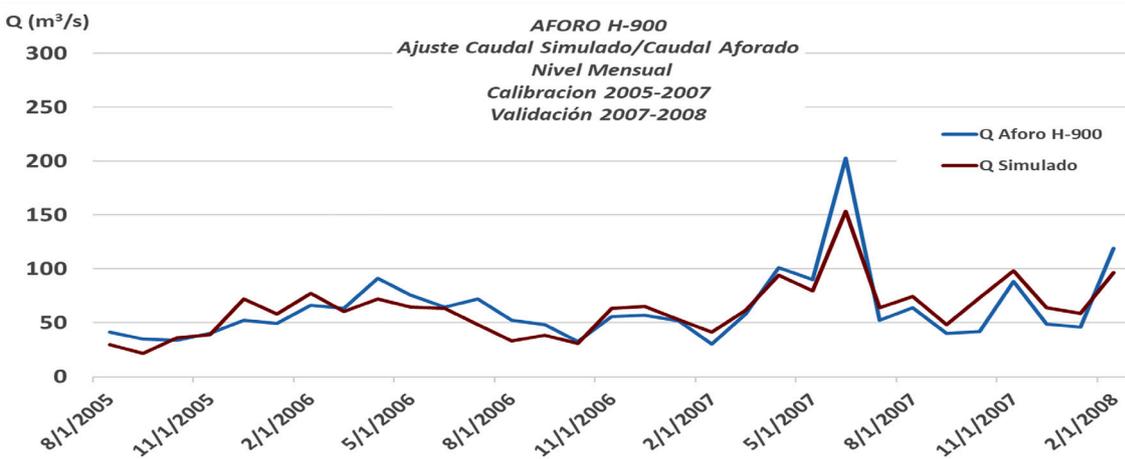
➤ **Figura 11:** Ejemplo de información macroclimática. Medias de precipitación y vientos a diferentes alturas para Enero y Julio



➤ **Fuente:** "Present-day South American Climate" (Garreaud et al., 2008. (212) )

Una vez obtenidas las series de caudal observado, estas han de someterse a un **análisis de calidad** (equivalente al comentado anteriormente para las series de precipitación y temperatura) antes de utilizarse para la calibración del modelo hidrológico. La Figura 11 muestra un ejemplo de serie de caudales observados y los simulados mediante un modelo hidrológico SWAT para un aforo dado.

➤ **Figura 12:** Ejemplo de serie de caudales observados (azul) y simulados (rojo) mediante el modelo hidrológico SWAT para un aforo dado



➤ **Fuente:** elaboración propia

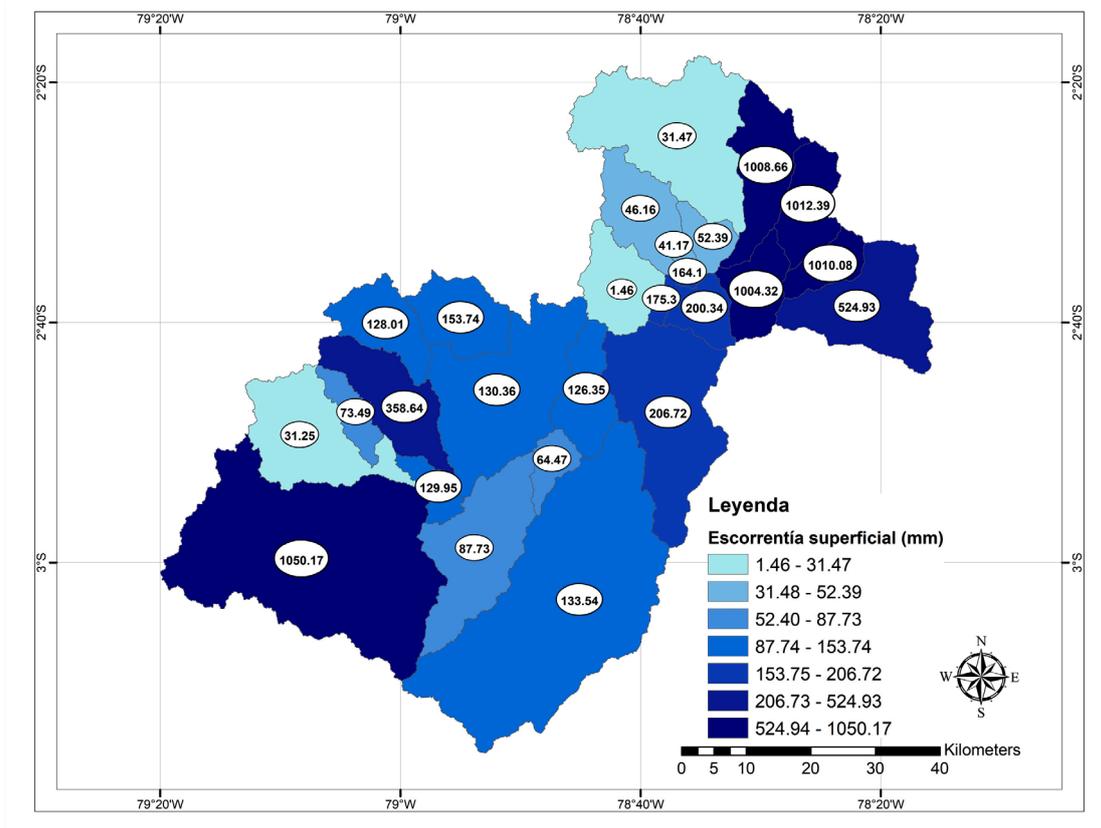
Una vez calibrado, el modelo hidrológico es capaz de aproximar las respuestas de la cuenca a diversos cambios en las variables climáticas y en la distribución de usos del suelo o la cobertura vegetal. Es por tanto un sustituto de la cuenca sobre el que podemos realizar experimentos para determinar la posible respuesta de la cuenca. Como se ha comentado anteriormente, cuanto más fielmente reproduzca los procesos físicos subyacentes, mejor será la respuesta del modelo ante cambios en las dinámicas no observados en la serie histórica, aunque la capacidad siempre será limitada por constituir una simplificación de la realidad. En cualquier caso, el modelo hidrológico es una pieza clave en la evaluación del riesgo climático y una gran parte del esfuerzo se dedica siempre a obtener la mejor calibración posible.

### 1.2.4 Generación de escenarios hidrológicos futuros

Una vez calibrado el modelo hidrológico, se dispone de un modelo que relaciona las variables atmosféricas con los caudales. Es posible, en ese momento, sustituir en el modelo los valores originales de precipitación, temperatura, etc. por los obtenidos para los escenarios futuros (en el apartado 1.2.2 Generación de escenarios climáticos para la cuenca estudiada), obteniendo los escenarios futuros de caudales (Figura 13). Estas proyecciones podrán requerir de información a futuro no solo climática, sino también de usos del suelo cuando sea necesario.

Dependiendo de la calidad de la calibración del modelo, estas series pueden tomarse directamente como equivalentes de observaciones, o se les pueden aplicar técnicas de corrección de sesgo para actualizarlos. En cualquier caso, estas nuevas series constituyen la información que se compara con la del escenario base para determinar los efectos de las dinámicas climáticas en el riesgo de la infraestructura hidroeléctrica estudiada.

➤ **Figura 13:** Resultados de proyecciones de caudal bajo un escenario de cambio climático obtenidos del modelo y agregados por subcuenca



➤ **Fuente:** elaboración propia

## 1.3 Análisis de la vulnerabilidad

Para analizar la vulnerabilidad frente al cambio climático de los proyectos hidroeléctricos es interesante considerar que el sistema expuesto a este fenómeno no incluye exclusivamente la infraestructura del proyecto en sí, sino que también incluye a su cuenca aportante y al conjunto del Sistema Energético del país donde se ubique el proyecto. De este modo, se incluye en el proyecto del análisis de los siguientes elementos expuestos al cambio climático.

- Embalses, que se asume que se verán colmados a mayor ritmo en caso de que fuertes precipitaciones arrastren una mayor cantidad de sedimentos hasta los mismos.
- Las salas de máquinas.

En el análisis de estos elementos se considera que paralelamente se dan tendencias importantes que influyen de manera decisiva en la sensibilidad que el conjunto del sistema estudiado:

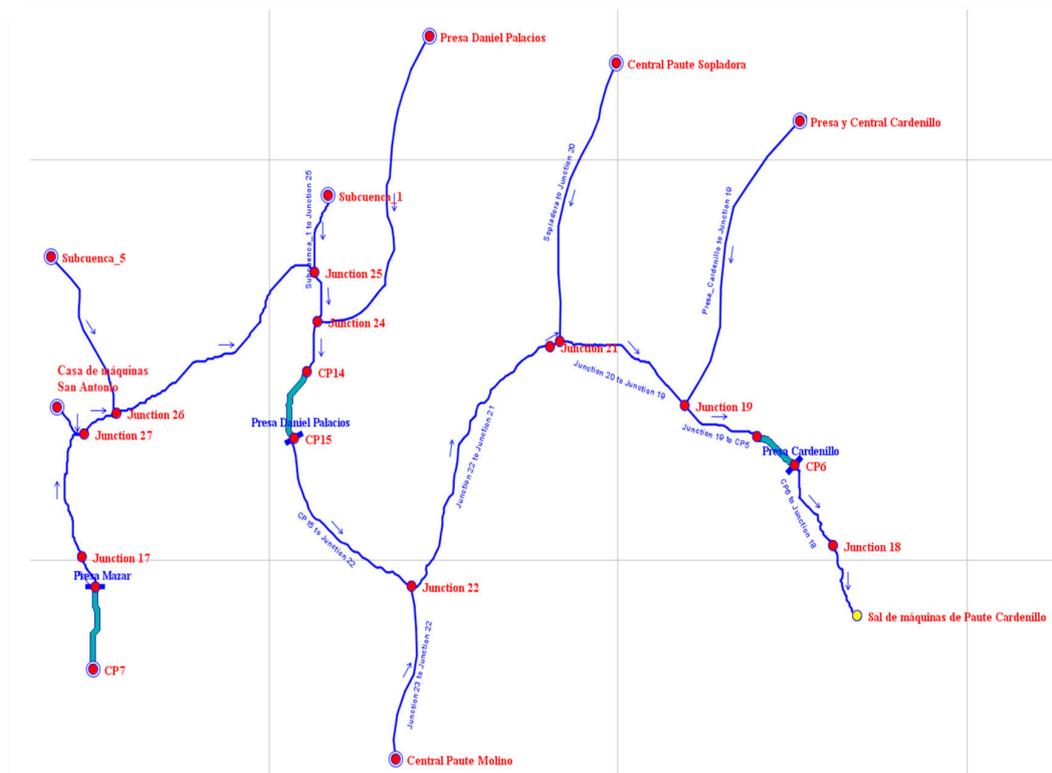
- En la cuenca aportante se verán alterados los usos del suelo a lo largo del tiempo y por tanto su respuesta hidrológica.
- El conjunto del sistema energético está evolucionando con un crecimiento de la demanda y la entrada en operación de nuevas centrales, principalmente hidroeléctricas.

Ambas tendencias influyen en la vulnerabilidad del sistema global, pero para evitar que el trabajo se vuelva inabordable, se decidió considerar que tanto la cuenca como el conjunto del sistema no estaban expuestos al cambio climático. En el primer caso, en la cuenca, el cambio climático está forzando un desplazamiento en altura de los pisos ecológicos, pero esta tendencia se ha obviado frente a la presión antrópica, que es la que gobierna las cuencas. Igualmente, en el conjunto del sistema energético, el cambio climático incrementará la demanda estival, afectará a la generación renovable, etc. pero, de nuevo se ha optado por considerar que estos impactos serán despreciables en relación con las inversiones globales en nuevas plantas, eficiencia energética, etc.

### 1.3.1 Estimación del comportamiento de los embalses

En las centrales con embalse, es conveniente considerar como se gestionará el mismo en los escenarios futuros, considerando las dinámicas estacionales que podrían verse alteradas para evaluar adecuadamente la variación de su producción: sus entradas y sus salidas, ofertas y demandas, para evaluar las garantías existentes y los momentos en que los embalses puedan encontrarse en situaciones de déficit o de vertido. Todas estas modificaciones pueden provocar reducciones en la producción hidroeléctrica, incluso con incrementos en el caudal, puesto que la reducción en la capacidad reguladora de los embalses puede provocar que gran parte de la aportación hídrica se desperdicie por falta de volumen de embalse útil.

El modelado de embalses en el caso que se presenta se realizó mediante HEC-ResSim. La Figura 14 muestra el esquema de presas, conexiones y centrales modelado.

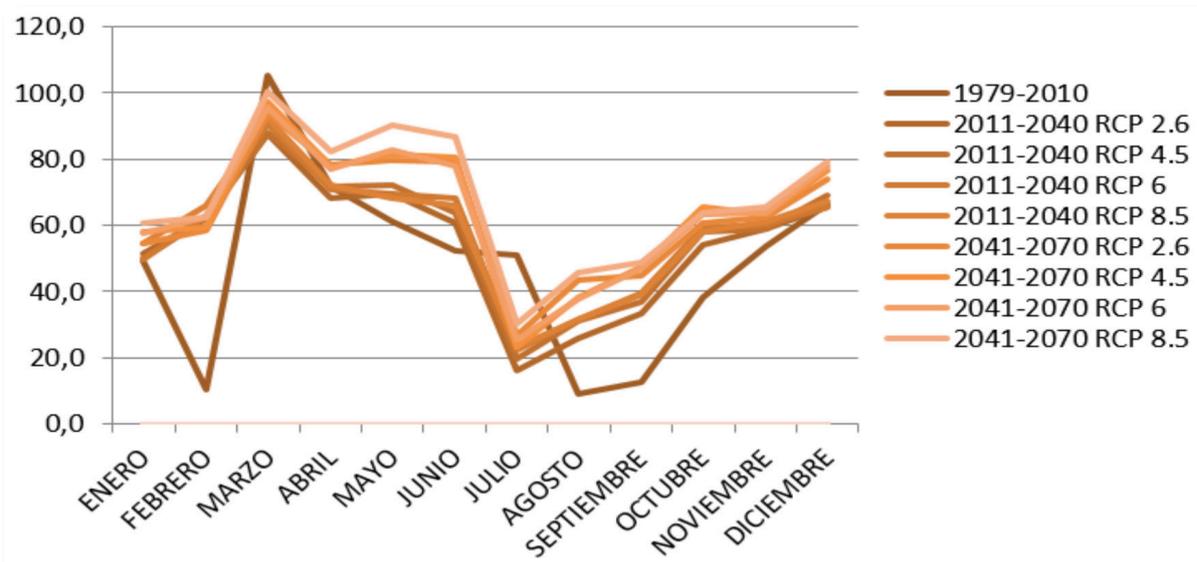


**Figura 14:** Esquema de presas, conexiones y centrales del sistema hidroeléctrico del Paute (Ecuador) modelado mediante el software HEC-ResSim

**Fuente:** elaboración propia

La utilización de estos modelos de gestión permite generar series temporales de producción hidroeléctrica a futuro. La Figura 15 muestra las producciones hidroeléctricas esperables para distintos horizontes futuros y distintos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero. En dicha figura puede observarse que, si bien existe cierta dispersión en las proyecciones de producción, estas presentan una variabilidad inferior a la que normalmente presentan las proyecciones de caudal, precisamente debido al efecto laminador de los embalses.

➤ **Figura 15:** Producción hidroeléctrica mensual para una central evaluada a partir de las simulaciones realizadas con HEC-ResSim



➤ **Fuente:** elaboración propia

### 1.3.2 Estimación del desgaste de los elementos mecánicos

Tal y como se exponía en la metodología general, la variación prevista para las próximas décadas en la concentración de sólidos en suspensión de los ríos podrá tener un efecto determinante en los ritmos de desgaste y, por ende, en los ciclos de mantenimiento (*overhaul*) de los componentes expuestos de las centrales (turbinas, inyectores, conducciones, válvulas, etc.), afectando principalmente a las turbinas (componente más sometido a desgaste y con un mayor costo de mantenimiento). Se hará necesaria, entonces, la rehabilitación de la turbina con una periodicidad menor, lo que podrá tener un impacto económico a futuro en los diferentes escenarios climáticos y horizontes temporales definidos en el proyecto.

En el caso de estudio concreto del complejo Paute Integral, los **parámetros asociados al año base** y a la concentración de sólidos suspendidos actuales se muestran en la tabla siguiente para las diferentes centrales del proyecto:

➤ **Tabla 4:** Parámetros iniciales (año base) considerados para el estudio del desgaste en cada central del complejo Paute Integral

Centrales	Sopladora	Molino	Mazar	Cardenillo
<b>Nº turbinas instaladas</b>	3 (Francis)	10 (Pelton)	2 (Francis)	6 (Pelton)
<b>Potencia instalada (MW)</b>	486,9	1 100	170	595,7
<b>Valor equipamiento electromecánico (Miles de USD)</b>	333 701	753 894	116 511	408 234
<b>Periodo de mantenimiento mayor (<i>overhaul</i>) (Años)</b>	10	14,6	10	14,6
<b>Costo económico del <i>overhaul</i> (Miles de USD)</b>	16 685	37 695	5 826	20 412
<b>Ratio de desgaste anual (%/año)</b>	10	6.8	10	6.8
<b>Costo de <i>overhaul</i> anualizado (Miles de USD/año)</b>	1 669	2 582	583	1 398

➤ **Fuente:** elaboración propia

A partir de ahí, se estimaron las **variaciones en la carga de sedimentos** para los distintos escenarios climáticos y horizontes temporales definidos en el proyecto (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) que considera no solo de la variación de la concentración de sólidos en suspensión sino también las variaciones del caudal proporcionado a la central (ver Tabla 5).

**Tabla 5:** Porcentaje de cambios en la carga de sedimento con respecto al periodo de referencia (%) y su desviación estándar (%) para los periodos y captaciones del estudio

	2011-2040	2041-2070	2071-2100
<b>Downscaling Dinámico</b>			
Sopladora	↑23,81±1,26	↑38,66±8,09	
Molino	↑24,83±1,22	↑40,31±8,72	
Mazar	↑34,96±6,14	↓100,00±0,00	
Cardenillo	↓1,64±1,00	↑10,16±6,42	
<b>Downscaling Estadístico</b>			
Sopladora	↓10,89±37,48	↑12,29±5,03	↓5,39±10,14
Molino	↓11,29±37,84	↑12,37±5,48	↓5,30±10,90
Mazar	↑18,08±5,44	↑13,36±4,77	↓100,00±0,00
Cardenillo	↓2,63±30,07	↓10,80±4,00	↓24,84±8,05

Fuente: elaboración propia

A partir de ahí, se estimaría el desgaste que se produciría en las turbinas como consecuencia de estas variaciones observadas en la concentración de sólidos en suspensión y su efecto en la vida útil. La tabla que se muestra a continuación resume, para las distintas centrales hidroeléctricas y los distintos horizontes temporales, los resultados obtenidos

**Tabla 6:** Desgaste en cada central del complejo Paute Integral estimado para cada horizonte temporal, según variación de sólidos en suspensión

Horizonte temporal	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
<b>Central</b>	<b>Sopladora</b>			<b>Molino</b>			<b>Mazar</b>			<b>Cardenillo</b>		
<b>Tipo de turbina</b>	Francis			Pelton			Francis			Pelton		
<b>Potencia instalada (MW)</b>	487			1 100			170			596		
<b>Costo overhaul (Miles de USD)</b>	16 685			37 695			5 826			20 412		
<b>Downscaling Dinámico</b>												
<b>Overhaul (Años)</b>	7	6		10	8		6	-		15	12	
<b>Ratio desgaste anual (% de la vida útil total)</b>	14	16		10	12		16	0 (*)		7	8	
<b>Downscaling Estadístico</b>												
<b>Overhaul (Años)</b>	12	8	11	18	12	16	8	8	-	15	18	24
<b>Ratio desgaste anual (% de la vida útil total)</b>	8	12	9	6	8	6	13	12	0 (*)	7	6	4

**Notas:** Valores establecidos en la tabla basados en la variación de % de sedimentos suspendidos y del caudal con respecto al periodo de referencia de año base (histórico).

(\*) El caudal turbinado para este periodo es cero. Esto indica que deja de operar la central, previsiblemente, por una colmatación del embalse. En ese caso, no se produciría desgaste de la turbina, con lo que no habría que sustituirla.

(\*\*) En este caso, los datos generados por la modelación hidrológica indican que no hay concentraciones de sedimento. Se asume por tanto que no hay variaciones en la frecuencia de overhaul respecto al escenario base.

Fuente: elaboración propia

### 1.3.3 Estimación de la producción energética

Como resultado de la modelización hidrológica, se dispone de los caudales hidrológicos en cada uno de los puntos de captación y embalses del proyecto, tanto en el escenario actual como en diferentes escenarios futuros, calculados teniendo en cuenta las previsible tendencias en los usos del suelo y la previsible evolución del clima. A partir de esta información y mediante modelos de impacto sencillos, es posible determinar las consecuencias de la modificación de los caudales sobre la producción hidroeléctrica.

Como ya se veía en la metodología del Tomo 1, estos modelos de impacto consideran la potencia de la turbina (W), el número de horas en que esta potencia se encuentra disponible, el caudal de agua disponible en las turbinas (m<sup>3</sup>/s) (obtenido del modelado hidrológico) y la altura neta del aprovechamiento (m). La energía eléctrica que finalmente es entregada a la red dependerá además de la eficiencia de cada uno de los elementos conectados en serie para generar y entregar la energía al sistema (generador, transformador, ...).

Para las **centrales de embalse**, el proceso conlleva simulaciones con un modelo, tal y como se detalla en el apartado 1.3.1. Cuando se trabaje con **centrales de fluyente**, este cálculo se realiza de forma directa a partir de los parámetros técnicos de la central y de las series de caudales diarios generadas a través de la modelación hidrológica en cada uno de los puntos donde se ubican las captaciones de la central, tanto en la situación actual como en los horizontes temporales futuros. En el caso de estudio que se describe en el presente apartado se contaba con tres aprovechamientos “de filo de agua”: Alazán, Dudas y San Antonio. La Tabla 7 da idea de la información requerida y que fue proporcionada por CELEC EP Hidroazogues (empresa desarrolladora del proyecto) y el Ministerio del Ambiente.

➤ **Tabla 7:** Datos técnicos de las centrales hidroeléctricas del estudio de caso

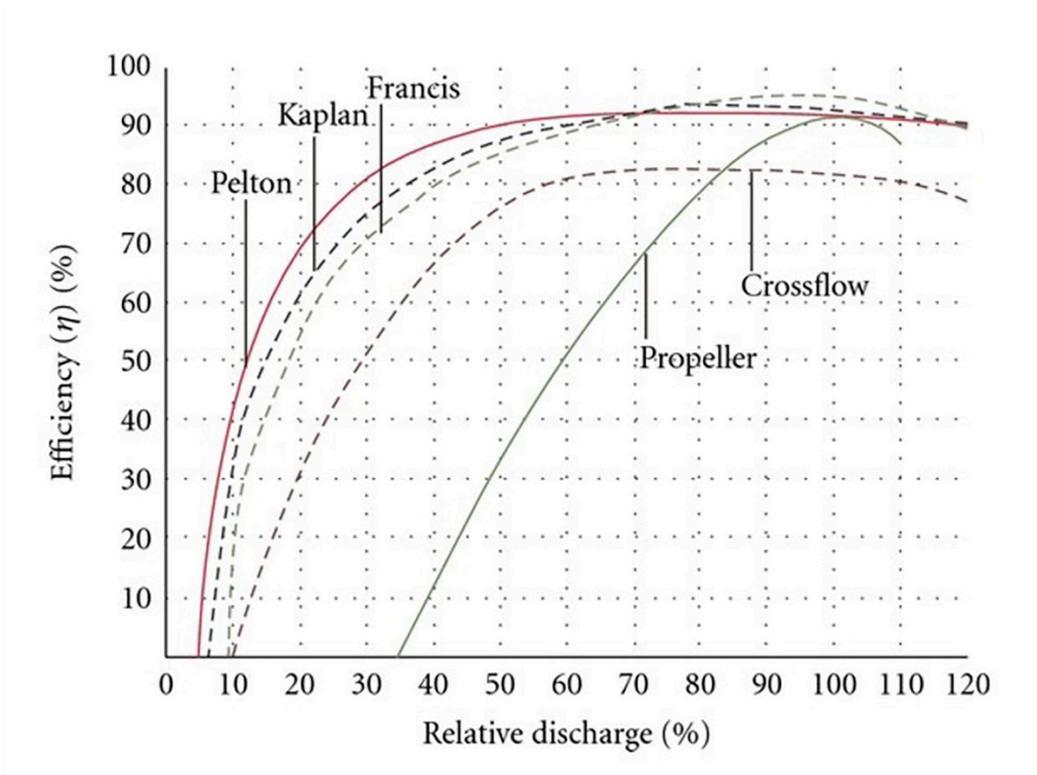
	Proyecto Hidroeléctrico Alazan	Proyecto Hidroeléctrico Dudas	Proyecto Hidroeléctrico San Antonio
Potencia nominal instalada (MW)	6,23	7,4	7,19
Número de unidades	1	1	1
Tipo de turbinas	Pelton	Pelton	Pelton
Caudal de diseño para potencia nominal (m <sup>3</sup> /s)	3,6	3	4,4
Caudal nominal de cada turbina (m <sup>3</sup> /s)	3,6	3	4,4
Caudal mínimo de operación turbina	0,54	0,45	0,66
Caudal ecológico	0,388	0,291	0,466
Caída neta máxima (m)	201,51	287,34	190,32
Eficiencia de las turbinas a plena apertura	89,44%	89,37%	89,35%
Curva de rendimiento de las turbinas	No disponible	No disponible	No disponible
Eficiencia de los generadores	96%	96%	96%
Eficiencia de la transformación	100%	100%	100%
Usos internos (kW)	100	100	100

➤ **Fuente:** elaboración propia

Como se observa en la Tabla 7, en el caso analizado no se disponía de la curva de rendimiento de las turbinas. En su lugar, se optó por emplear dos parámetros típicos para turbinas Pelton:

- Caudal mínimo de operación del 15% del caudal nominal.
- Una curva típica de rendimientos en función del porcentaje de caudal nominal disponible para operación para turbinas tipo Pelton, tal y como se muestra a continuación (213,214). La adaptación al caso particular consistió en el ajuste mediante líneas de tendencia con funciones polinómicas utilizando los caudales nominales de cada central y mediante el dato de rendimiento a plena apertura disponible de cada turbina.

Figura 16: Curva de rendimiento típica para diferentes tipos de turbinas

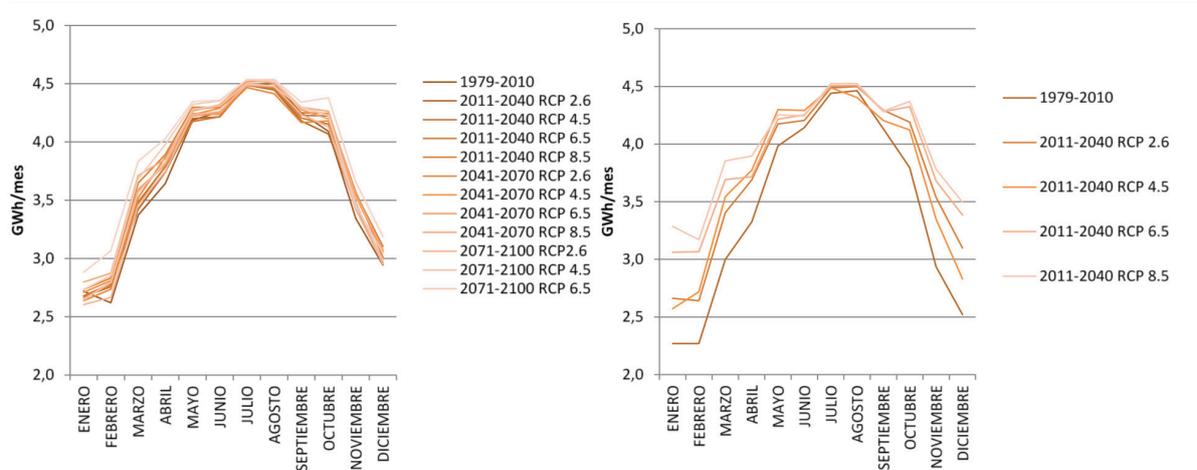


Fuente: Potential of Small-Scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa ((215))

Dado que el recurso hídrico no puede ser almacenado de un día para otro, se trabaja en este caso con caudales en intervalos diarios. Así, sobre la base de los caudales medios diarios y mensuales (teniendo en cuenta el caudal ecológico mínimo), se generan las curvas de duración de caudales. El **cálculo de la energía** generada se realiza entonces multiplicando la potencia de la turbina (P) por el tiempo en que las máquinas están disponibles (desconectando el tiempo dedicado a operaciones programadas y desconexiones forzadas). A partir de esta información, la potencia (P) se puede obtener a través de la ecuación indicada en el apartado metodológico.

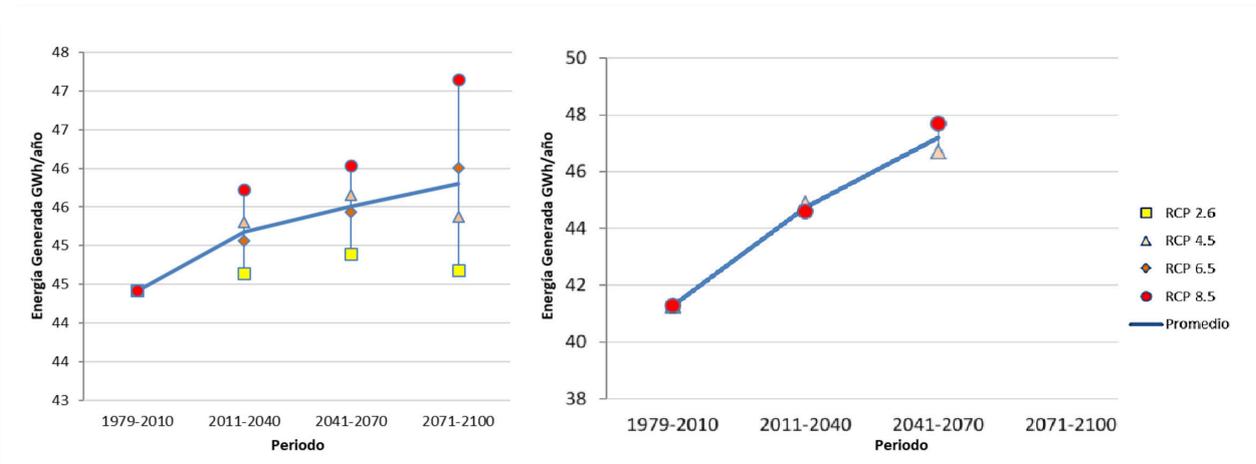
Un ejemplo del resultado obtenido de los cálculos realizados puede verse en las siguientes gráficas para el aprovechamiento de Alazán.

Figura 17: Generación mensual de energía (GWh) en los diferentes escenarios estimada en el aprovechamiento Alazán empleando datos del downscaling estadístico (izquierda) y dinámico (derecha)



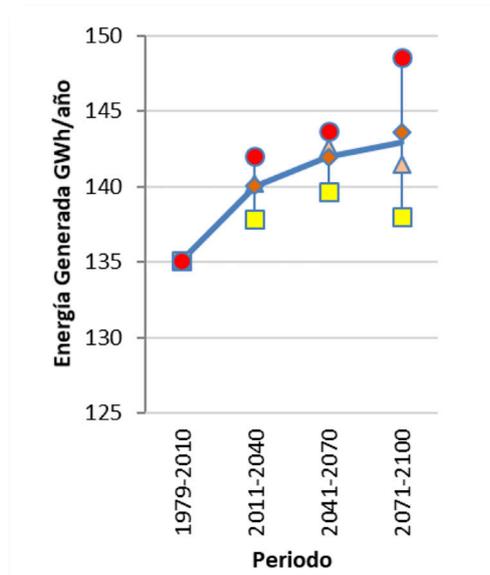
Fuente: elaboración propia

**Figura 18:** Síntesis de las estimaciones de generación eléctrica (GWh/año) en los diferentes escenarios para el aprovechamiento Alazán en base a los datos del *downscaling* estadístico (izquierda) y dinámico (derecha)



**Fuente:** elaboración propia

**Figura 19:** Previsión de evolución de la producción hidroeléctrica del proyecto Mazar Dudas según las proyecciones climáticas generadas en base al *downscaling* estadístico



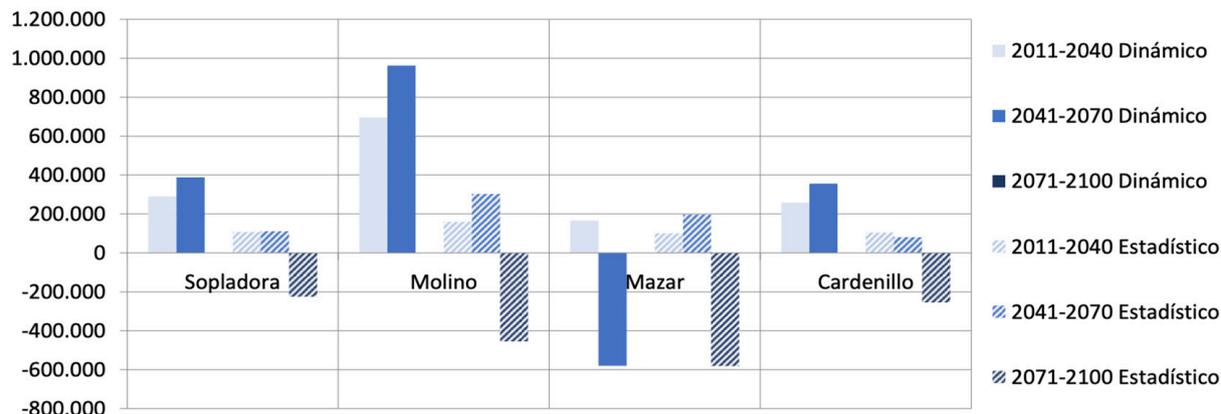
**Fuente:** elaboración propia

Se observó cómo, en este caso, se presentaban con carácter general unas previsiones de incremento de la generación como consecuencia del incremento de la pluviosidad en los escenarios de cambio climático. Los resultados generados con diversos RCP diferían escasamente entre sí para los periodos a corto y medio plazo, sin embargo, para el horizonte a largo plazo (fin de siglo) los resultados presentaban una mayor dispersión. Por otro lado, los resultados obtenidos indican que el incremento de la capacidad de generación en el futuro acontecerá, principalmente, en los meses de caudales secos (octubre a abril), siendo menos notable en los meses húmedos (entre junio y agosto).

Estas predicciones fueron contrastadas con las realizadas por CELEC EP Hidroazogues, observándose que ambas coincidían.

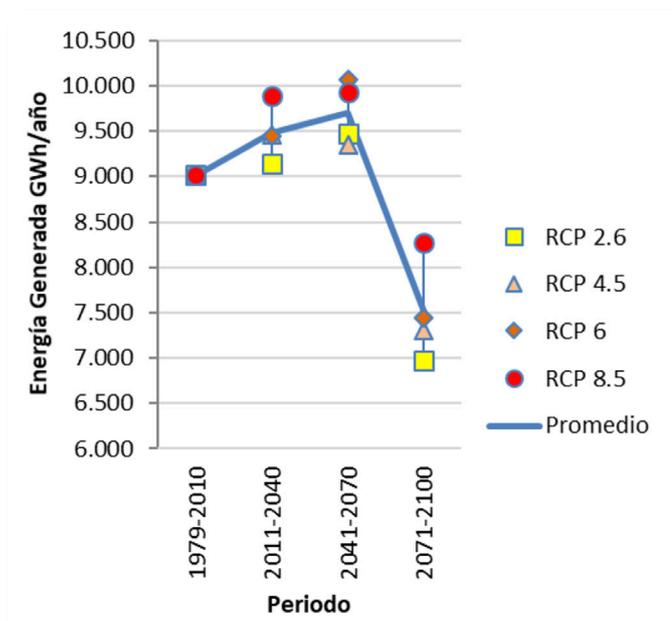
Para las centrales del complejo Paute Integral (centrales con embalse), se obtuvieron los resultados mostrados en las gráficas siguientes, donde se representan para cada central y cada uno de los periodos analizados el promedio de los valores anuales obtenidos en cada escenario.

**Figura 20:** Cambio de la producción energética de las centrales del complejo Paute Integral respecto al año base (MWh/año)



**Fuente:** elaboración propia

**Figura 21:** Previsión de evolución de la producción hidroeléctrica de uno de los aprovechamientos del complejo Paute Integral según las proyecciones climáticas generadas en base al *downscaling* estadístico



**Fuente:** elaboración propia

Con esta información en la mano, es posible reconsiderar los diseños y adaptarlos para obtener el mejor desempeño posible en el futuro.

## 1.4 Evaluación del riesgo

Una vez estimada la variación de las condiciones climáticas en función de diferentes escenarios climáticos, su impacto en los caudales y sedimentos y los efectos asociados en términos de producción de energía, el siguiente paso en el análisis de la central hidroeléctrica es poner en valor los riesgos detectados. Tal y como recogía la metodología del Tomo 1, el riesgo es considerado como función de la probabilidad (relacionado con la amenaza) y las consecuencias (relacionado con la exposición y vulnerabilidad). Las consecuencias de la materialización del cambio climático sobre el proyecto se observarán sobre su rendimiento financiero y, en el caso de que el proyecto cuente también con el objetivo de reducir las inundaciones aguas abajo, las consecuencias de estas inundaciones.

### 1.4.1 Simulación del impacto económico del cambio climático

La forma de poner en valor los riesgos detectados es “traducir” todos estos resultados en términos económicos (sintetizado en el LCOE) de cara a ser capaces de sumar todos los efectos y analizar el impacto económico global en cada uno de los aprovechamientos que integran el proyecto hidroeléctrico que se está analizando.

#### Evaluación de las consecuencias del CC sobre la producción (OPEX)

Siguiendo la metodología descrita en el Tomo 1, a la hora de evaluar el impacto económico causado por la variación en la energía generada, se estudia desde dos enfoques diferenciados:

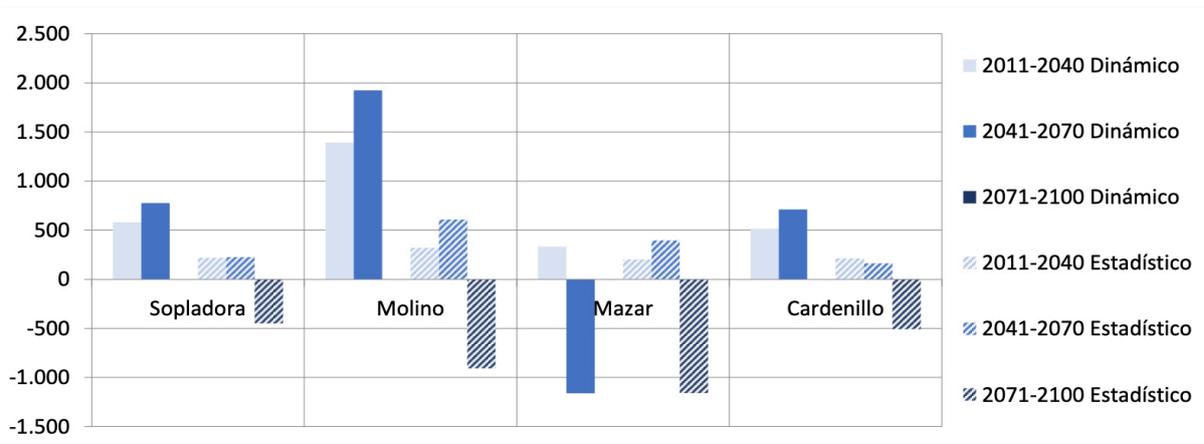
- El proyecto hidroeléctrico.
- El conjunto del Sistema Energético del país.

#### Impacto sobre el propio proyecto hidroeléctrico

En Ecuador, el componente fijo es un término aprobado por ARCONEL y asignado a cada proyecto hidroeléctrico en función de aspectos como financiamiento, mantenimientos mayores, administración central, calidad, gestión socio-ambiental, desarrollo territorial, operación y mantenimiento, etc. En el caso de estudio de Paute Integral se trabajó con los valores aprobados para el periodo 2011-2017, asumiendo que éstos se mantienen constantes a futuro, sin tener en cuenta influencias inflacionistas o deflacionistas. Se asumió, por tanto, que no refleja cambios debidos al clima.

Las variaciones vendrán dadas, por tanto, por el componente variable del precio de venta de la energía, directamente relacionado con las variaciones de producción de la central. El término variable lo fija el Operador Nacional de Electricidad de Ecuador (CENACE) en base a aspectos como el costo de los combustibles, lubricantes, transporte de combustible, etc. para cada tipo de central. En el momento de realizar el estudio se situaba en 2 USD/MWh para centrales hidroeléctricas. A modo de ejemplo, la gráfica siguiente muestra el efecto sobre las centrales del complejo Paute Integral.

**Figura 22:** Cambio en el componente variable de las centrales del complejo Paute Integral respecto al año base (promedio de cada periodo, en miles de USD/año)



**Fuente:** elaboración propia

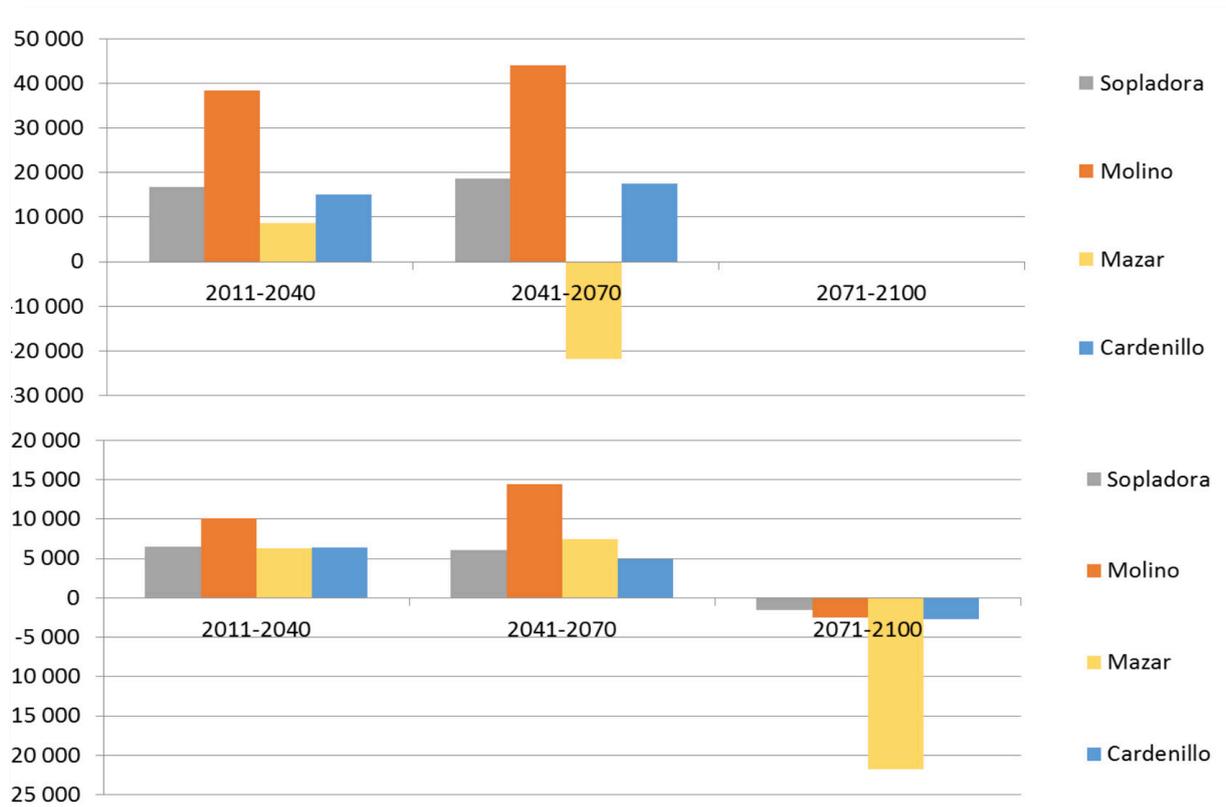
### Impacto sobre el conjunto del Sistema Energético del país

En el caso de estudio para el Paute, se manejó información del “Plan Maestro de Electrificación 2016-2025” facilitada por ARCONEL, que permite analizar con precisión el escenario presente y el horizonte futuro a corto plazo (2011-2040). Sin embargo, no fue posible disponer de información suficiente para realizar un análisis preciso de los horizontes 2041-2070 y 2071-2100. Ante esta situación, como una primera aproximación, se asignaron valores constantes para los costos marginales mensuales proyectados a futuro (enero, febrero, marzo, ...), determinados como resultante del valor promedio de los valores mensuales establecidos dentro del periodo 2016-2025. Esta hipótesis se planteó por suponer que, si bien es cierto que el sistema energético ecuatoriano está actualmente en una profunda transformación, el equilibrio entre sus diferentes componentes (demanda, parque de generación, etc.) se mantendrá estable a partir del año 2025. La evolución de la demanda vendrá acompañada por una evolución en consonancia de las unidades de generación, nuevas líneas de transmisión, etc., manteniendo relaciones parecidas.

Se recopilaron datos de costo marginal de acuerdo a tres posibles escenarios o “etapas” que recogen la variabilidad interanual de las precipitaciones (año “húmedo”, año “seco” y año “promedio”) y los diferentes horizontes temporales, sin embargo, finalmente, se realizó el estudio detallado solo con los datos para el año “promedio”.

A continuación, se muestra un ejemplo del resultado obtenido para un año promedio en los diferentes escenarios analizados.

➤ **Figura 23:** Impacto económico sobre el Sistema Nacional Interconectado de Ecuador para el complejo Paute Integral, considerando un escenario “promedio” de precipitación (miles USD/año). *Downscaling* dinámico (arriba) y estadístico (abajo)



➤ **Fuente:** elaboración propia

Se observa cómo, a lo largo del primer periodo analizado (2011-2040), todas las centrales reflejan un incremento respecto al año base de la energía hidroeléctrica prevista, evitando así la generación correspondiente por parte de las centrales termoeléctricas y generando un ahorro importante para el Sistema. El comportamiento a medio plazo es menos claro, presentando diferencias según el tipo de análisis realizado. A largo plazo, se observa una reducción de la energía hidroeléctrica prevista para todas las centrales del complejo Paute Integral que deberá de ser compensada por plantas termoeléctricas, lo que redundará en un impacto económico para el Sistema<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Se ha de tener precauciones al interpretar esta información dado que no se conoce cuál será el impacto del cambio climático sobre el resto de centrales y, por tanto, al realizar estas operaciones se ha asumido que no se verán afectadas por el cambio climático. De este modo, los resultados se consideran con carácter orientativo y deben de ser revisados a medida que se disponga de mayor información del previsible impacto del cambio climático en las diferentes centrales que integran el Sistema Nacional Interconectado.

### Evaluación de las consecuencias del CC sobre la operación y mantenimiento (OPEX)

A partir del análisis del desgaste que se produciría en las turbinas como consecuencia de las variaciones observadas en la concentración de sólidos en suspensión (descrito en el paso anterior) y su efecto en la vida útil de las turbinas, es posible evaluar el impacto económico que esto podría tener sobre el proyecto. La tabla que se muestra a continuación resume, para las distintas centrales hidroeléctricas y los distintos horizontes temporales, los resultados obtenidos

**Tabla 8:** Impacto económico del desgaste en cada central del complejo Paute Integral, estimado para cada horizonte temporal, según variación de sólidos en suspensión

Horizonte temporal	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
<b>Central</b>	<b>Sopladora</b>			<b>Molino</b>			<b>Mazar</b>			<b>Cardenillo</b>		
Tipo de turbina	Francis			Pelton			Francis			Pelton		
Potencia instalada (MW)	487			1 100			170			596		
Costo overhaul (Miles de USD)	16 685			37 695			5 826			20 412		
<b>Downscaling Dinámico</b>												
Overhaul (Años)	7	6		10	8		6	-		15	12	
Ratio desgaste anual (% de la vida útil total)	14	16		10	12		16	0 (*)		7	8	
Costo de overhaul anualizado (Miles de USD)	2 384	2 781		3 769	4 712		971	0		1 361	1 701	
Variación del costo de overhaul anualizado, respecto al año base (Miles de USD)	715	1 112		1 188	2 130		388	-583		-37	303	
<b>Downscaling Estadístico</b>												
Overhaul (Años)	12	8	11	18	12	16	8	8	-	15	18	24
Ratio desgaste anual (% de la vida útil total)	8	12	9	6	8	6	13	12	0 (*)	7	6	4
Costo de overhaul anualizado (Miles de USD)	1 390	2 086	1 517	2 094	3 141	2 356	728	728	0	1 361	1 134	850
Variación del costo de overhaul anualizado, respecto al año base (Miles de USD)	-278	417	-152	-488	559	-226	146	146	-583	-37	-264	-548

**Notas:** Valores establecidos en la tabla basados en la variación de % de sedimentos suspendidos y del caudal con respecto al periodo de referencia de año base (histórico).

(\*) El caudal turbinado para este periodo es cero. Esto indica que deja de operar la central, previsiblemente, por una colmatación del embalse. En ese caso, no se produciría desgaste de la turbina, con lo que no habría que sustituirla.

(\*\*) En este caso, los datos generados por la modelación hidrológica indican que no hay concentraciones de sedimento. Se asume por tanto que no hay variaciones en la frecuencia de overhaul respecto al escenario base.

### Impacto económico total

La siguiente tabla resume los resultados obtenidos en los apartados anteriores para las centrales del estudio.

➤ **Tabla 9:** Impacto económico estimado del cambio climático debido a la variación de caudales<sup>2</sup> y de la concentración de sólidos en suspensión<sup>3</sup> según el *downscaling* dinámico (miles USD/año)

	2011-2040			2041-2070			2071-2100		
	Impacto de la variación de los caudales		Impacto de la variación de los sedimentos en suspensión	Impacto de la variación de los caudales		Impacto de la variación de los sedimentos en suspensión	Impacto de la variación de los caudales		Impacto de la variación de los sedimentos en suspensión
	Sobre la C.H.	Sobre el SNI		Sobre la C.H.	Sobre el SNI		Sobre la C.H.	Sobre el SNI	
<b>Central Sopladora</b>	580	16 756	-715	777	18 630	-1 112			
<b>Central Molino</b>	1 391	38 462	-1 188	1 926	44 016	-2 130			
<b>Central Mazar</b>	332	8 706	-388	-1 161	-21 767	583			
<b>Central Cardenillo</b>	517	15 088	37	712	17 434	-303			
<b>Total Paute Integral + Mazar Dudas</b>	<b>2 845</b>	<b>79 717</b>	<b>-2 282</b>	<b>2 292</b>	<b>59 205</b>	<b>-3 011</b>			

➤ **Fuente:** elaboración propia

➤ **Tabla 10:** Impacto económico estimado del cambio climático debido a la variación de caudales y de las concentraciones de sólidos en suspensión según el *downscaling* estadístico (miles USD/año)

	2011-2040			2041-2070			2071-2100		
	Impacto de la variación de los caudales		Impacto de la variación de los sedimentos en suspensión	Impacto de la variación de los caudales		Impacto de la variación de los sedimentos en suspensión	Impacto de la variación de los caudales		Impacto de la variación de los sedimentos en suspensión
	Sobre la C.H.	Sobre el SNI		Sobre la C.H.	Sobre el SNI		Sobre la C.H.	Sobre el SNI	
<b>Central Sopladora</b>	217	6 529	278	225	6 060	-417	-449	-3 783	152
<b>Central Molino</b>	320	10 098	488	607	14 474	-559	-908	-7 163	226
<b>Central Mazar</b>	202	6 251	-146	394	7 470	-146	-1 161	-24 172	583
<b>Central Cardenillo</b>	210	6 381	37	163	4 916	264	-508	-4 995	548
<b>Total Paute Integral + Mazar Dudas</b>	<b>959</b>	<b>29 543</b>	<b>645</b>	<b>1 402</b>	<b>33 151</b>	<b>-851</b>	<b>3 011</b>	<b>-39 833</b>	<b>1 503</b>

**Nota:** Los valores positivos reflejan un incremento en los ingresos correspondientes o, lo que es lo mismo, una reducción de costos.

➤ **Fuente:** elaboración propia

<sup>2</sup> Que influyen en la frecuencia de mantenimiento.  
<sup>3</sup> Que influyen en la frecuencia de mantenimiento.

## 1.5 Selección y análisis de las potenciales medidas de adaptación

El objetivo del proyecto que se expone como caso piloto no es solo valorar el riesgo climático, sino también definir las medidas más adecuadas para controlar el mismo. El proceso seguido en este caso incluye el análisis costobeneficio de las diferentes opciones de adaptación y la definición de un plan de actuación o estrategia a largo plazo que se denomina “ruta de adaptación”. Este análisis se realiza empleando las herramientas de simulación expuestas en los apartados anteriores, pero modificando algunos parámetros de estas de modo que permitan reflejar el efecto de diferentes medidas. Por ejemplo, para evaluar el efecto un potencial incremento de potencia instalada en una central se podrían modificar los parámetros del modelo de cálculo energético, para evaluar medidas en la gestión de embalses se opera el modelo correspondiente bajo diferentes escenarios, etc.

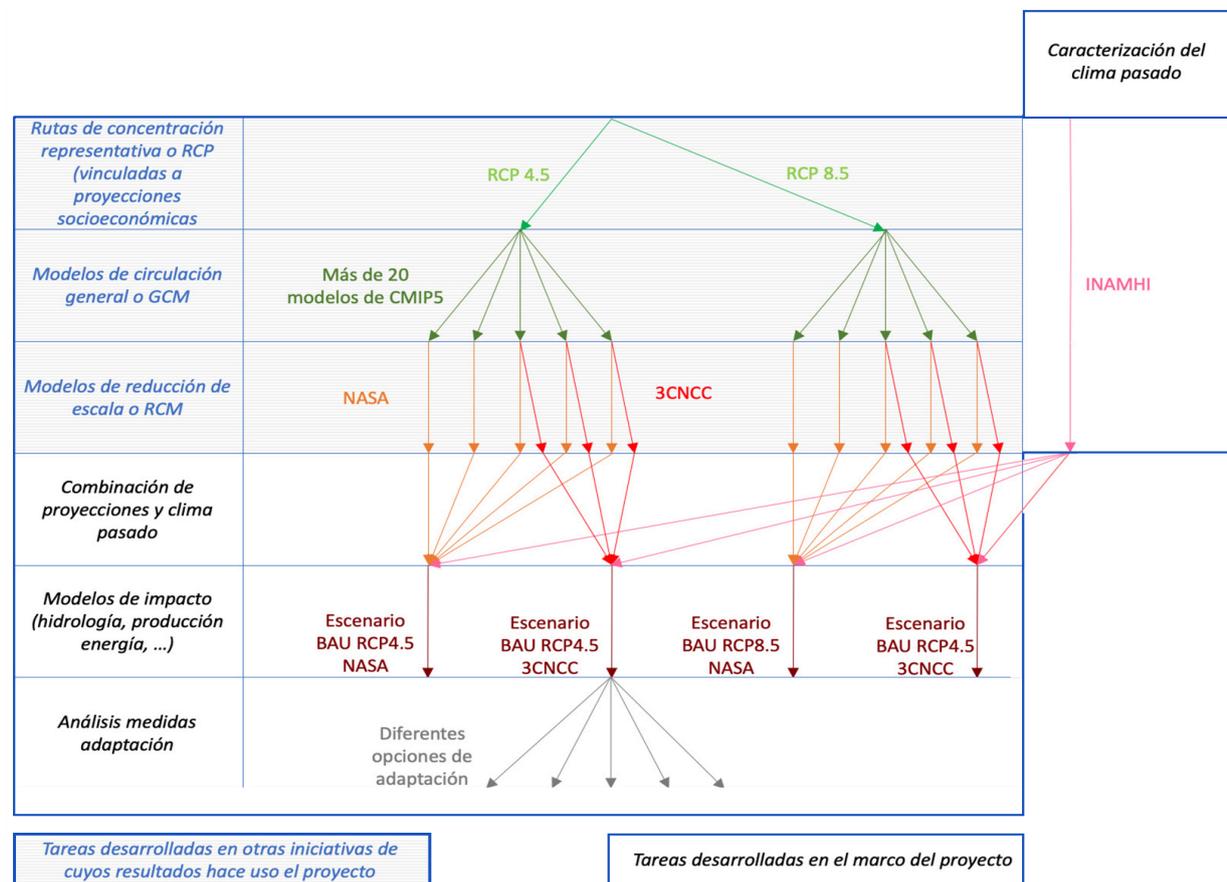
No obstante, antes de exponer la metodología empleada para la selección de las medidas, es preciso tener en cuenta como el proyecto se enfrenta a las diferentes incertidumbres existentes acerca de la posible evolución del clima y los impactos asociados, así como del efecto de las potenciales medidas aplicables para hacer frente a los riesgos climáticos.

### 1.5.1 Manejo de la incertidumbre

En las etapas anteriores se ha analizado como los datos generados en cada fase del proyecto son trasladados a etapas posteriores. Igualmente, el proyecto emplea datos climáticos que han sido generados en base a un complejo proceso. Los diferentes modelos empleados para calcular el riesgo climático en el marco del proyecto hacen uso de los datos de los “downscaling” o reducciones de escala aportados por NASA y la Tercera Comunicación Nacional de Ecuador [38] sobre cambio Climático. A su vez, estos datos consideran los resultados generados por un conjunto de modelos globales de circulación que han sido ejecutados bajo varias rutas de concentración representativa o RCP, que son análogos a diferentes sendas de emisiones, vinculadas directamente a la evolución socioeconómica global del planeta durante el siglo XXI en función de las políticas que lo gobiernen.

De este modo, el análisis de riesgos se basa generalmente en un planteamiento de tipo descendente o “top-down” que va incrementando las posibles opciones estudiadas a medida que los datos e hipótesis generados en una etapa “vieren” en una etapa posterior. Este planteamiento es conocido como análisis de la “cascada de incertidumbre” (17) y conduce a un incremento continuado del número de hipótesis o escenarios que es posible considerar a medida que el análisis de riesgos y opciones de adaptación avanza.

Figura 24: Cascada de incertidumbres que analiza el proyecto



Fuente: elaboración propia

El inconveniente de este planteamiento es que, al avanzar hacia las últimas etapas del proceso de análisis, si se estudian todas las posibles combinaciones de escenarios, hipótesis y opciones de adaptación, las simulaciones a realizar se pueden incrementar hasta un punto en el que requieran de una cantidad de recursos excesiva, como era el caso de este proyecto, en el que era imposible repetir todas las simulaciones matemáticas realizadas en etapas anteriores bajo diferentes hipótesis que reflejen las medidas que se deseaba estudiar. Además, abarcar el análisis de todas las posibles combinaciones de hipótesis conducen un rango de posibles opciones de adaptación que no siempre es gestionable o útil para tomar decisiones en el largo plazo (16). Muchas veces, es complejo que, al presentar un análisis detallado de las posibles combinaciones de escenarios climáticos, sociales, etc., algunos de los destinatarios del estudio no interpreten tal volumen de posibles resultados como un elevado desconocimiento de los posibles efectos del cambio climático en lugar de como un mayor conocimiento del rango de sus potenciales consecuencias.

Ante esta situación es conveniente replantearse el objetivo del análisis de las medidas de adaptación. En este caso no se trataba de definir con precisión cuales serían las áreas en las cuencas en las que es conveniente intervenir, o las medidas técnicas detalladas a desarrollar en la infraestructura. Se trataba principalmente de identificar aquellas medidas que muestran un mayor potencial de aplicación, siendo conscientes de que todas ellas requerirán en todo caso un estudio de mayor detalle para concretar sus características técnicas (p.ej. selección de las especies y técnicas más interesantes si se opta por reforestaciones, estudios de diseño detallados para las medidas de carácter técnico, etc.). Siendo clave la comparabilidad de las medidas entre sí y el análisis de su complementariedad, se optó por el siguiente planteamiento:

- Valorar en términos de costo-beneficio tanto medidas como combinaciones de medidas con una alcance o ambición limitada. Por ejemplo, no se buscó explorar cual es el efecto previsible de reforestar toda la cuenca alta, o la modificación radical de los diseños de las centrales. Se optó por realizar hipótesis lo más factibles posibles, ya que más que el efecto absoluto de diferentes medidas se busca valorar su relación entre inversión y efectos beneficiosos.
- Ya que las medidas a comparar son muy heterogéneas, se decidió considerar un análisis tanto de costos y beneficios directos como indirectos.
- Emplear para todos estos análisis un escenario con un grado de cambio de las variables climáticas medio, descartando los escenarios más optimistas y pesimistas.
- Obtener conclusiones en términos de indicadores comparables entre sí para todas las medidas y combinaciones de medidas. Es destacable en este sentido que medidas que individualmente arrojan unos indicadores, pueden ver reducido o incrementado su impacto al aplicarse conjuntamente (p.ej. el control de la erosión de los suelos retarda la necesidad de eliminar los sedimentos del fondo del embalse a través de dragados u otras técnicas).
- En base a las conclusiones obtenidas plantear una secuencia de intervención que permita explotar la complementariedad entre medidas y programar la misma en diferentes décadas del siglo XXI.
- Siempre es interesante considerar la vida útil del proyecto objeto de estudio. En este caso, como el horizonte temporal 2071-2100 se considera irrelevante para la operativa de las centrales estudiadas, que ya estarán amortizadas, se descartó analizar dicho periodo.

En otros casos donde el análisis de medidas tenga otras prioridades puede ser conveniente optar por planteamientos diferentes al aquí expuesto. Por ejemplo, en muchas ocasiones es muy interesante evaluar si las medidas presentan eficacia bajo un elevado rango de posibles escenarios climáticos. En ese caso, en lugar de orientar los esfuerzos a simular un elevado número de medidas y combinaciones de estas bajo un escenario climático concreto es mucho más interesante organizar los recursos disponibles para evaluar un número acotado de medidas bajo diferentes posibles evoluciones del clima. De ese modo es posible seleccionar medidas “robustas” ante la incertidumbre de los impactos del cambio climático.

### 1.5.2 Selección de las potenciales medidas a estudiar

En el proyecto expuesto, las medidas fueron seleccionadas a través de la celebración de talleres en los que participaron agentes públicos y privados de las cuencas aportantes. En los mismos se consultó a los participantes acerca de la viabilidad técnica, política y económica de una batería de potenciales medidas, así como de sus beneficios adicionales, barreras para la implementación, agentes con mayor capacidad para promover las mismas, etc. También se consideró muy importante analizar la trayectoria ya seguida en las cuencas con el desarrollo de medidas que contribuyen a la adaptación climática. En este caso, durante décadas se habían realizado reforestaciones, en algunos puntos existían obras específicas para controlar la formación de cárcavas, etc. El número de potenciales técnicas de adaptación a considerar fue muy elevado, incluyendo desde medidas tecnológicas en infraestructura y equipos, hasta políticas y medidas de gestión territorial, pasando por técnicas de gestión de los suelos. Si bien la identificación de medidas de adaptación se realizó con un carácter lo más abierto posible, como se expondrá a continuación, se ha de tener presente que la metodología de simulación de los impactos del cambio climático empleada condiciona en gran medida cuales de ellas es posible cuantificar cualitativamente.

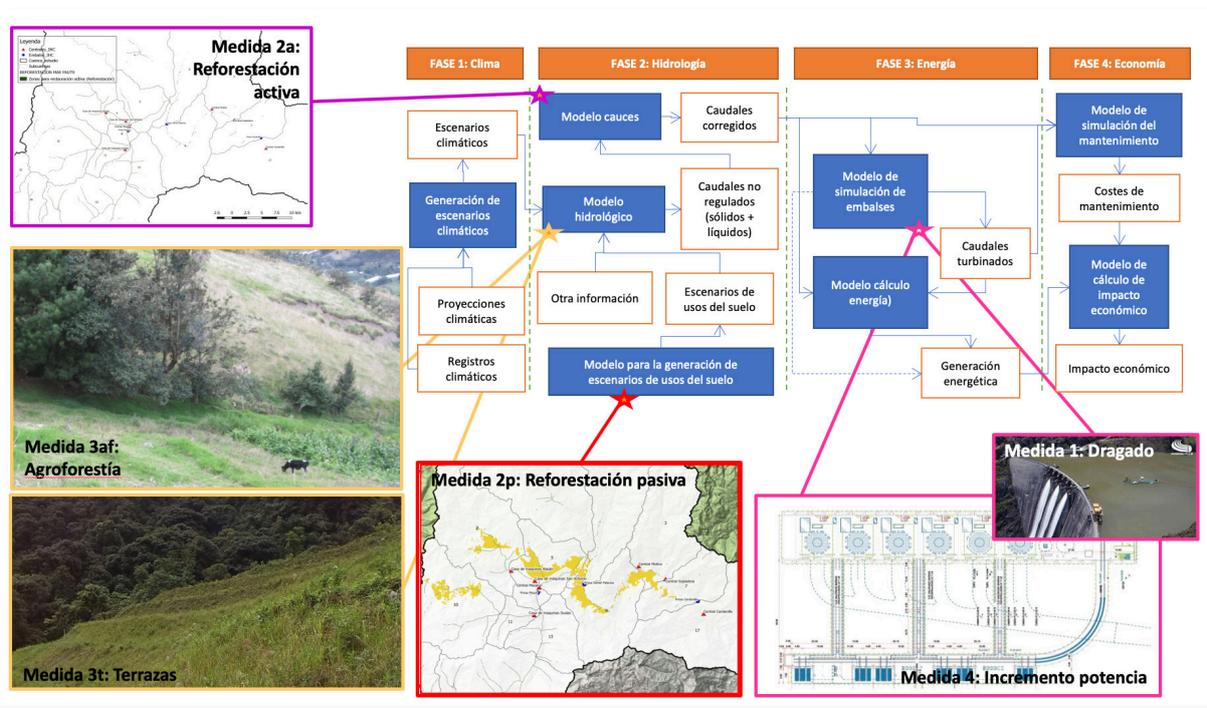
### 1.5.3 Análisis costo beneficio

Como se expone en el apartado de "Identificación y selección de opciones de adaptación" del Tomo 1, existen diferentes métodos de valoración de las opciones de adaptación, cada uno de los cuales cuenta con diferentes ventajas e inconvenientes. En el caso concreto aquí expuesto se empleó el análisis costo beneficio por su capacidad para comparar medidas de muy diferente tipo.

El análisis costo beneficio incluye, en todos los casos, la comparación de la situación con y sin medidas (escenario tendencial o BaU, que toma en consideración la evolución futura teniendo en cuenta que no hay cambios en las políticas, planes, normas, etc. actuales). Entre otros aspectos, este escenario BaU tiene en consideración las tendencias climáticas deducidas a partir de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (considerando el "downscaling" dinámico y el RCP 4.5), los escenarios de cambios de usos del suelo generados en el marco del proyecto en base a las tendencias detectadas en la cartografía aportada por SUJA, la evolución del sistema energético en base a los datos aportados por ARCONEL, que se desprenden del "Plan Maestro de electrificación 2016-2025", etc.

Para cuantificar el efecto de cada medida, se modificaron ciertos parámetros de los modelos matemáticos empleados para evaluar los riesgos climáticos en el escenario BaU. En la tabla siguiente se indica que modelos fueron empleados para analizar cada una de las medidas estudiadas.

➤ **Figura 25:** Modelos matemáticos empleados para valorar el efecto de cada medida

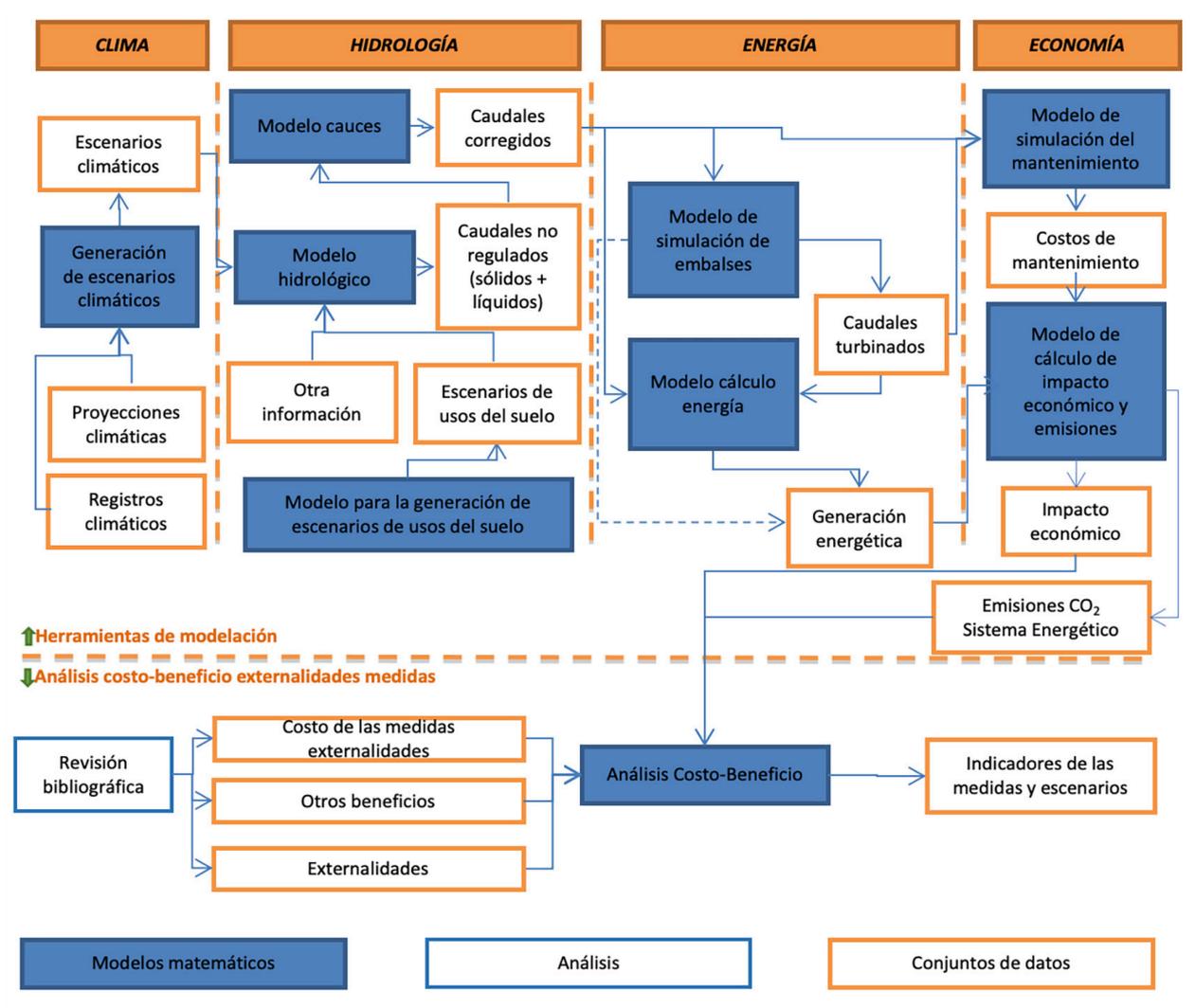


➤ **Fuente:** elaboración propia

Es preciso destacar que, si se introducen cambios en un determinado modelo, todas las etapas posteriores han de ser repetidas. Por ejemplo, en la imagen anterior se puede apreciar como para valorar los efectos de la reforestación pasiva se modificaron los escenarios de usos del suelo. Esto origina que se repitan los cálculos del modelo hidrológico, considerando estos nuevos escenarios de usos del suelo. A su vez, este modelo hidrológico genera un nuevo conjunto de datos de caudales, que ha de ser considerado en todas las etapas posteriores.

Esta maquinaria de simulación no captura todas las externalidades asociadas a las medidas. Por ejemplo, las medidas destinadas a una mejor gestión agrícola incrementan los ingresos de las comunidades campesinas, las medidas de gestión forestal aportan beneficios desde el punto de vista de la mejora de la diversidad, fijación de carbono, etc. Todos estos aspectos fueron valorados en base a bibliografía específica.

➤ **Figura 26:** Relaciones entre las tareas de simulación matemática y el análisis costo beneficio



➤ **Fuente:** elaboración propia

A continuación, se presentan la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Presente Neto (VPN) de las medidas analizadas tanto individualmente como en combinación con otras medidas.

➤ **Tabla 11:** Análisis económico de las diferentes medidas y escenarios para todas las centrales considerando una tasa de descuento del 12% y las hipótesis generales

MEDIDAS / ESCENARIOS		Costos USD* 1000	Beneficios				Beneficios-costo		
			Impacto en el sistema energético	Beneficios directos y externalidades (excluyendo CO <sub>2</sub> )	Fijación de carbono		VPN monetizable	VPN Total	TIR
					Moneti- zable	No monetizable			
			USD*1000				USD*1000		%
Medida 1 (dragado)		-23 279	32 784	0	1 106	12 723	10 612	23 335	--
Medida 2p (forest. pasiva)		-1 402	10 931	1 917	23 473	21 595	13 324	34 919	--
Medida 2ab (forest. activa 1)		-2 057	11 219	6 898	25 934	23 860	18 134	41 994	--
Medida 2aa (forest. activa 2)		-3 261	12 100	6 898	26 113	24 024	17 826	41 850	--
Medida 2pab (for. pas+act1)		-3 459	11 653	8 815	45 421	41 787	20 643	62 430	--
Medida 2paa (for. pas+act2)		-4 662	12 096	8 815	45 507	41 866	19 889	61 755	--
Medida 3 (gestión suelos)		-31 800	13 053	82 176	6 900	6 348	63 981	70 329	36%
Escenario 4+1		-30 422	54 199	0	19 324	17 778	25 323	43 102	483%
Escenario 1+2pab		-26 091	34 738	8 815	55 161	50 748	21 874	72 622	--
Escenario 1+2paa		-26 385	34 304	8 815	55 379	50 948	21 165	72 113	--
Escenario 1+2pab+4		-33 234	56 166	8 815	60 658	55 805	36 599	92 404	--
Escenario 1+2paa+4		-33 528	55 725	8 815	60 875	56 005	35 882	91 887	--
Escenario 2pab+3		-35 259	13 038	90 991	47 893	44 062	72 601	116 663	67%
Escenario 2paa+3		-36 462	13 832	90 991	47 924	44 090	72 195	116 285	65%
Escenario 1+2pab+3		-57 331	39 591	90 991	58 367	53 698	77 921	131 618	109%
Escenario 1+2paa+3		-58 061	41 848	90 991	58 154	53 501	79 430	132 931	110%
Escenario 1+2pba+3+4		-64 473	62 524	90 991	63 867	58 757	94 150	152 908	96%
Escenario 1+2paa+3+4		-65 204	63 375	90 991	63 674	58 580	94 256	152 836	94%

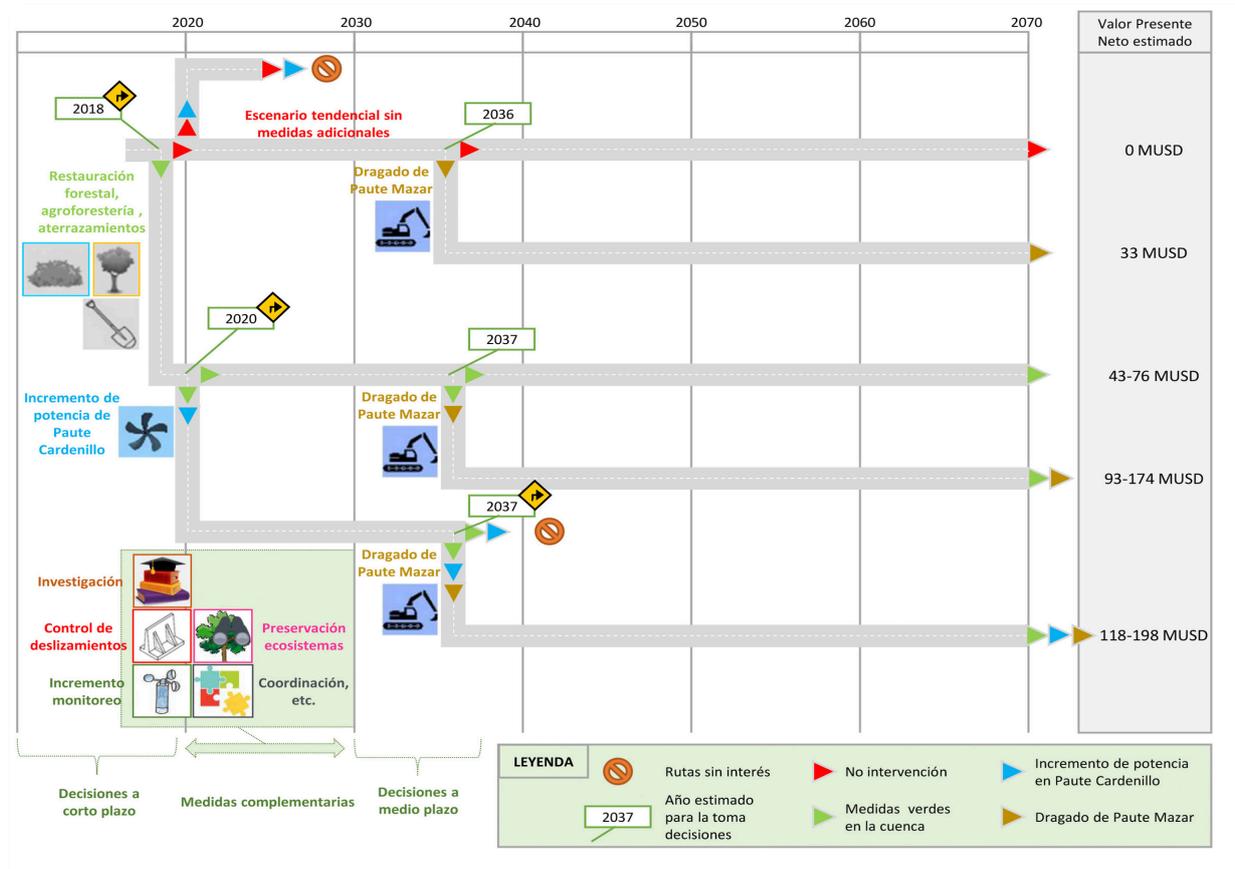
➤ **Fuente:** elaboración propia

Los valores arrojados por este análisis indican que tanto las medidas “verdes” planteadas (restauración forestal y sistemas de gestión sostenible de los suelos) como las medidas “duras” (optimización de Paute Cardenillo y dragados) son todas de interés. De manera individual o combinadas entre sí arrojan valores de VPN positivos y TIR elevadas. Al considerar las externalidades, algunas de las medidas y escenarios presentan desde un primer momento beneficios, por lo que en ocasiones no es posible calcular la TIR, lo cual viene a ser un indicador de que la medida es interesante desde un primer momento. Esta situación se da sobre todo en las medidas de restauración forestal, que aportan beneficios muy notables desde un primer momento sin que impliquen costos excesivamente elevados.

### 1.5.4 Ruta de adaptación a largo plazo propuesta

En base a los resultados obtenidos en el punto anterior fue posible proponer una ruta o estrategia de adaptación a largo plazo que es descrita a continuación.

➤ **Figura 27:** Representación esquemática de las principales decisiones y medidas para la adaptación



➤ **Fuente:** elaboración propia

Dicha estrategia tiene en consideración el conjunto de las centrales en estudio, pues todas ellas influyen en los resultados finales del SNI. Uno de los aspectos más claros del análisis costobeneficio es el interés de las **medidas verdes** analizadas (restauración forestal activa y pasiva, aterrazamientos y agroforestería). Estas medidas son rentables desde un planteamiento socioeconómico, y presentan la posibilidad de ser combinadas en el futuro con medidas grises como el dragado, que más que ser una medida incompatible, incrementaría los beneficios globales. Se trata por tanto de medidas de las que parece complejo arrepentirse en el futuro y es recomendable implementar cuanto antes. En el esquema adjunto se propone el año 2018 y es posible apreciar como las posibles rutas de adaptación con medidas verdes, destacadas con un triángulo de color verde (▶), generarán unos retornos superiores a las rutas sin medidas verdes en términos de valor presente neto o VPN. Optar por esta medida sin actuar con medidas de control de los sedimentos, ya sean verdes (restauración forestal, gestión sostenible de suelos, etc.) o grises (dragado), que se representa en la parte superior de la imagen, parece claramente no recomendable, por lo que no ha sido cuantificada en términos de costo-beneficio.

En cambio, sí se ha analizado desde un análisis costo-beneficio la combinación de esta medida con el **dragado** (y las medidas verdes cuyo lanzamiento, tal y como se comentaba anteriormente es recomendable de manera anterior). Las rutas que incluyen esta opción se representan en el esquema adjunto con una flecha de color morado (▶). La decisión más importante llegará en el entorno del año 2036, momento en el que se estima (bajo las hipótesis empleadas) que sería necesario iniciar los dragados para mantener operativa la central Paute Mazar. Si se interviene en la cuenca a través de medidas verdes con la intensidad prevista, el inicio de esta medida de dragado se podría ver retrasado aproximadamente un año, y el costo anual de las operaciones de dragado sensiblemente reducido. En el esquema se aprecia como las rutas adaptativas en las que se considera el dragado generan retornos y externalidades muy superiores a las rutas sin dragado, por lo que claramente es una opción recomendable. También se aprecia como podría ser complementaria de las medidas verdes y no estamos ante una dualidad acerca de intervenir en la cuenca o en los embalses, ya que la opción más interesante es complementar ambos enfoques.

Junto a estas cuatro grandes medidas que ha sido posible cuantificar gracias a los modelos disponibles, es preciso desarrollar una batería de **medidas complementarias**. Estas medidas se encuentran relacionadas con los estudios realizados, las hipótesis consideradas y los resultados obtenidos.

## 1.5.5 Limitaciones de los modelos y mecánicas empleadas

Si bien es interesante destacar las conclusiones del estudio, tampoco se ha de obviar en ningún momento las limitaciones de los modelos y mecánicas empleadas. Estas medidas complementarias inciden en limitar el impacto potencial de aquellos riesgos que no ha sido posible evaluar con la precisión adecuada, limitar las principales fuentes de incertidumbre y modular la respuesta frente al cambio climático en base a una mejor información disponible:

- En primer lugar se ha de tener presente que el análisis de la generación y transporte de sedimentos desarrollado en el marco del proyecto aborda los procesos continuos de erosión y transporte, pero no ha sido posible macrodeslizamientos y grandes remociones en masa, que podrían alterar todos los escenarios planteados en caso de que se produjeran. Es por eso que es preciso incluir en el paquete de medidas la implementación de un **programa de manejo de zonas inestables** del área de influencia del complejo hidroeléctrico Paute Integral.
- Igualmente, los escenarios de usos del suelo considerados, asumen una evolución tendencial de la antropización de la cuenca, con ligeros avances de la frontera urbana y agrícola. Para que este escenario realmente se corresponda con la realidad es preciso mantener las inversiones actuales en materia de **preservación de los ecosistemas** y áreas protegidas.
- Como se viene indicando, se ha estimado que en torno al año 2037 sería necesario iniciar las operaciones de dragado de Paute Mazar, pero el momento real en el que se lleve a una situación en la que esto sea ciertamente necesario dependerá de las medidas que se apliquen y de la evolución del clima durante las próximas décadas. Por ello, es evidente que es preciso **mejorar la red monitoreo hidrometeorológico**.
- Igualmente, en la cuenca existe una importante **actividad académica e investigadora** en los ámbitos relacionados con la gestión de cuencas, actividades que sería interesante potenciar para redefinir las medidas, ajustarlas, monitorizarlas, evaluar el efecto de las medidas ya implementadas, etc. El proyecto recoge una propuesta tentativa de las actividades a desarrollar en este sentido.
- Por último, una intervención global exitosa en la cuenca requiere de la mejora de la **coordinación de los diferentes agentes implicados**, una línea de trabajo que es preciso potenciar, y para lo cual también se proponen algunas medidas concretas.

## 1.6 Conclusiones

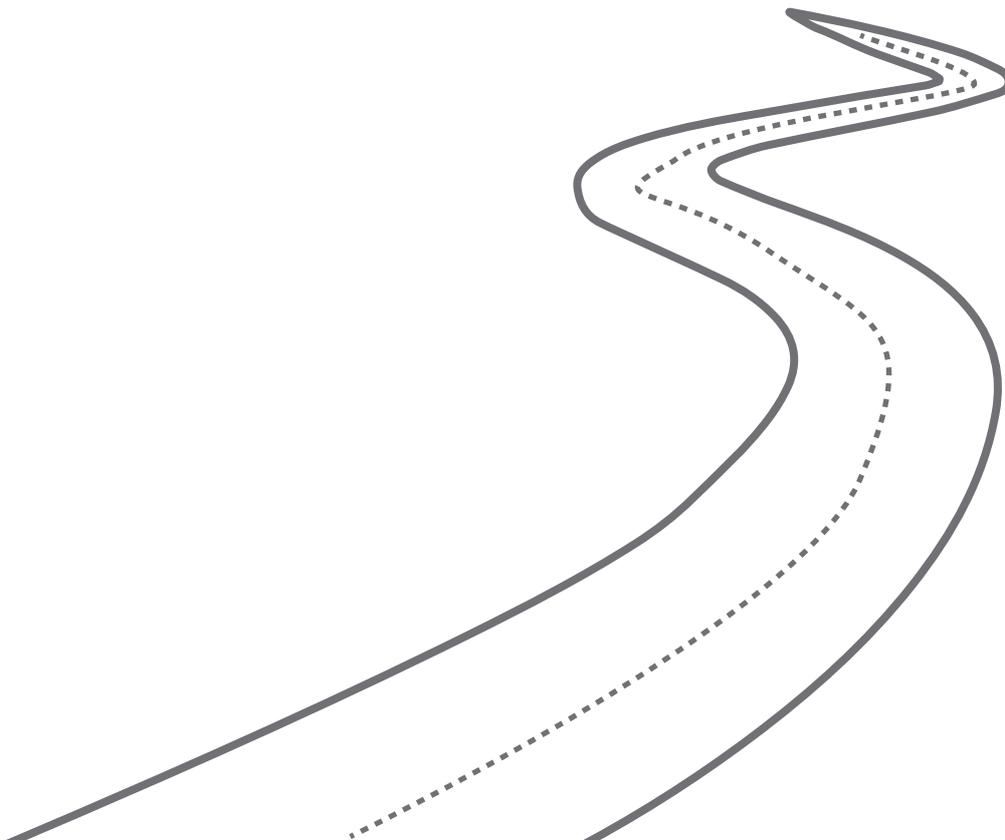
Es posible extraer, como conclusiones generales del caso de estudio presentado en los apartados anteriores, lo siguiente:

- Se ha observado un incremento de los caudales y recursos hídricos disponibles para la generación de energía hidroeléctrica (ver 1.2).
- No obstante, esta mayor precipitación también generará una serie de amenazas que es interesante controlar para poder aprovechar esta oportunidad. Dentro de las mismas destaca la mayor generación de sedimentos, que reducirá la vida útil de los embalses del complejo Paute Integral, al mismo tiempo que incrementará las necesidades de mantenimiento de los equipos sujetos a desgaste. Los resultados obtenidos apuntan a que este impacto puede ser notable, poniendo de relieve la importancia que tiene el control de los procesos erosivos de las cuencas para la viabilidad económica de las centrales.
- Paralelamente, los ingresos de se verán incrementados en todas las centrales al menos en los escenarios a corto y medio plazo, tal y como se observa en la Tabla 9 y Tabla 10.
- Igualmente, la mayor operación en dichos periodos de estas instalaciones renovables permitirá que Sistema Nacional Interconectado de Ecuador reduzca su dependencia de fuentes de energía fósiles más costosas, generando ahorros para el conjunto del sistema energético (ver Tabla 9 y Tabla 10).
- El análisis costo-beneficio realizado indica que existen medidas de adaptación en la cuenca rentables desde un planteamiento social, económico y ambiental. Uno de los efectos más destacables de las mismas es que ampliarían el tiempo de operación de los embalses amenazados por la colmatación.
- Por todo ello, es especialmente interesante implementar una política adaptativa en la cuenca del Paute, ya que a los beneficios generales que pueda presentar la intervención en cualquier otra cuenca, en este caso se suman beneficios económicos y sociales directos gracias a la presencia de las centrales hidroeléctricas que, por su potencia global, constituyen una pieza clave del sistema energético ecuatoriano.



## 2 > Piloto 2: Vial/carreteras

2.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático	45
2.2 Descripción general de la metodología	46
2.3 Exposición	57
2.4 Vulnerabilidad	57
2.5 Riesgo	58
2.6 Evaluación de medidas	59
2.7 Conclusiones	59



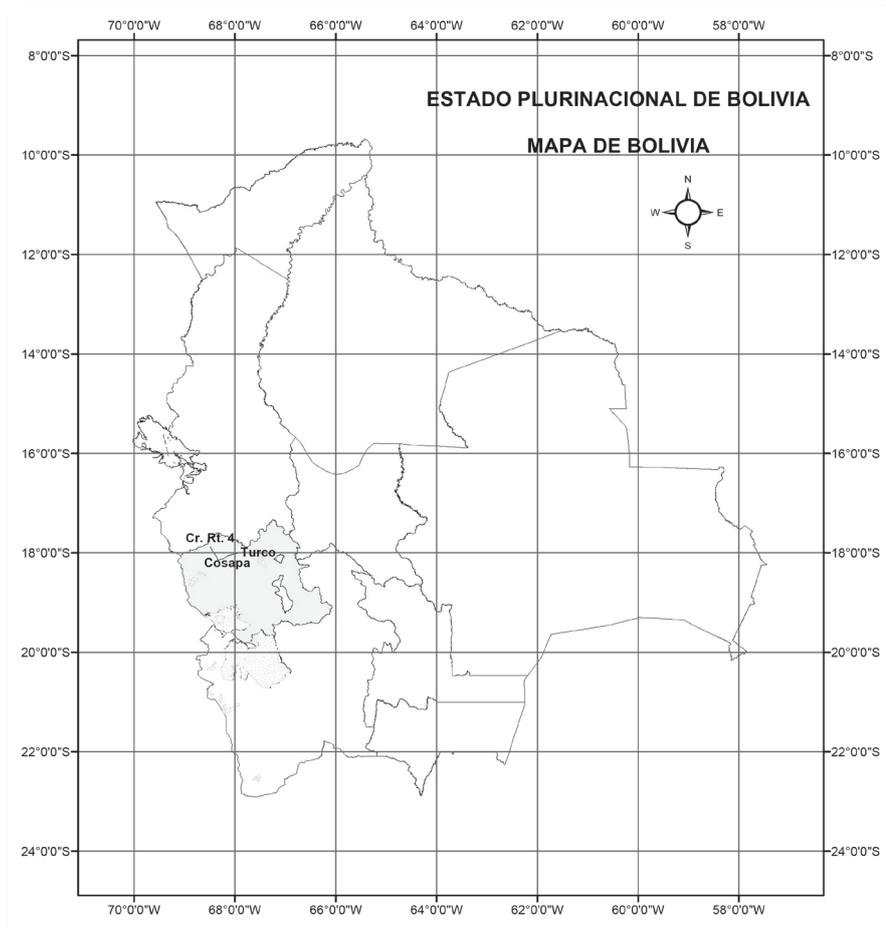
En esta sección se presenta el caso de estudio de riesgo climático para el sector vial. Este sector se caracteriza por el diseño y construcción de infraestructuras muy largas -de las decenas a los centenares de kilómetros- con un desarrollo transversal reducido, en lo que se refiere a la propia vía, pero con afecciones que pueden ser importantes -principalmente debido a desmontes y terraplenes-. También pueden ser importantes las infraestructuras de drenaje y de paso de accidentes orográficos -túneles y puentes- en cuyo diseño pueden tener una gran influencia las dinámicas climáticas.

Esta característica principal hace que los casos del sector vial puedan requerir un análisis climático complejo y variable, ya que su desarrollo a lo largo de kilómetros puede hacer que la infraestructura esté emplazada en diversos regímenes climáticos. Además, la presencia de infraestructuras singulares, como grandes puentes, puede forzar a necesitar realizar caracterizaciones hidrológicas complejas, que irían en paralelo a modelos lluvia escorrentía más simples utilizados para la definición de la infraestructura de drenaje.

En el sector vial, los riesgos climáticos están principalmente ligados a la cantidad de agua con la que puede tener que lidiar la infraestructura y con posibles fallas del terreno que produzcan deslizamientos y corrimientos de tierras. Respecto de los primeros, condicionan principalmente el diseño de las obras de drenaje, aunque también limitan las características de obras como los puentes. Es decir, que el problema puede venir por la forma óptima de evacuar el agua, o de cruzar el cauce cuando no existe posibilidad de modificación del mismo.

Respecto a los corrimientos de tierras, hay que decir que constituyen un riesgo importante según el tipo de suelo en que nos encontremos, y que suelen explicar gran parte de las pérdidas de funcionalidad de este tipo de infraestructuras. Sin embargo, los corrimientos de tierra suelen tener unas causas generadoras mucho más complejas que las puramente climáticas, y no es habitual realizar un análisis climático tan riguroso como el que sí puede realizar para la precipitación o la inundación.

Para el caso de estudio del sector vial se ha escogido el proyecto de mejora y pavimentación del tramo Turco - Cosapa Cr. Ruta F04. Este proyecto se enmarca en el Plan Nacional de Desarrollo Bolivia Digna, Soberana, Productiva y Democrática para Vivir Bien, y tiene el objetivo de facilitar la vinculación entre las capitales de Departamento de una forma cómoda y segura durante todas las épocas del año. Este proyecto conecta el puerto de Arica (Chile) con el resto del Estado Plurinacional de Bolivia, y a su vez con Brasil.



**Figura 28:** Localización del caso de estudio  
**Fuente:** elaboración propia

El tramo Turco - Cosapa - Cruce Ruta F4 comienza en la población de Turco (capital provincial) y se dirige hacia el oeste atravesando una zona de serranía para después continuar por una meseta, en donde atraviesa sectores con presencia de elementos arqueológicos, como por ejemplo la localidad de Pumiri. En el sector Agua Rica se encuentra una bifurcación: hacia el Oeste se encamina hacia Crucero y después Chachacomani; hacia el Norte alcanza el río Cosapa, luego la población del mismo nombre y finalmente vira al noroeste y alcanza la carretera Patacamaya Tambo Quemado (Ruta F04).

Actualmente la vía aprovecha la configuración topográfica, lo que le permite contar con curvas cómodas y bajas pendientes en general, a pesar de que en algunos tramos los radios de curvatura se vean reducidos y las pendientes aumentadas. El ancho oscila entre los 5 m y los 7 m, y la presencia de estructuras de drenaje es irregular; de hecho, ninguna cuneta presenta revestimiento, y tan solo se encuentran en zonas de desmonte. Los terraplenes existentes son de altura reducida (inferior a los 3m) a excepción del que conecta con el puente sobre el río Ckohuiri. La configuración topográfica, combinada con las obras de drenaje existentes, aseguran de forma efectiva la estabilidad de los taludes y desmontes de la carretera, presentándose problema únicamente en el cruce del río Cosapa.

Con este caso de estudio se desea exponer cómo es posible vincular el análisis climático, y, más concretamente, el estudio de proyecciones multi-decadales, con la generación de parámetros climáticos para el diseño de las vías o carreteras. No se expondrán en el mismo todas las posibles aplicaciones de la información generada (la actualización de la máxima lluvia diaria puede aplicarse a muchos cálculos posteriores, pero el procedimiento para generar dicho parámetro es único) ya que, por un lado, las mismas dependerán de las características del proyecto al que se apliquen los planteamientos aquí expuestos, y, por otro, la aplicación de la información generada es ampliamente dominada por los equipos implicados en el diseño de estas infraestructuras.

Además, este caso de estudio incide de nuevo en los impactos del cambio climático en cuanto a la variación de las precipitaciones y caudales, pero a diferencia de otros, en los que se prestaba una mayor atención a la disponibilidad de recurso hídrico y valores promedio, en este caso el análisis se enfoca hacia el estudio de los valores extremos y eventos como inundaciones o lluvias torrenciales.

También cabe destacar que este caso centra el análisis en el estudio del efecto del cambio climático, aplicando las tendencias generadas por modelos de circulación general a los datos de diseño generados por un caso real (el citado proyecto de mejora y pavimentación del tramo Turco-Cosapa). Para ello, el caso se basa en los datos aportados por la Administradora Boliviana de Carreteras, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH-UMSA).

En cuanto a las metodologías para la generación de estos parámetros empleando datos históricos, sería posible aplicar planteamientos alternativos a los expuestos. En otros casos de estudio se exponen con mayor nivel de detalle ejemplos de metodologías alternativas para la generación de estos parámetros que emplean las fuentes de información climática descritas en el apartado de “Análisis de la variabilidad climática y el cambio climático” del Tomo 1.

## 2.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático

En un proyecto de carreteras, el principal impacto del cambio climático viene a través de las dinámicas hidrológicas e hidráulicas, que van a afectar sobre todo a las estructuras de drenaje. De hecho, en el caso de estudio considerado, el análisis hidrológico se ha centrado en el estudio de cuatro componentes principales:

- La elección del periodo de retorno.
- La caracterización hidrográfica del área de estudio.
- La recopilación de datos meteorológicos para la determinación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).
- La estimación de los caudales de diseño.

El primer componente (elección del periodo de retorno) viene directamente determinado por la legislación vigente y el tipo de actuación concreta que se esté considerando y no se ve afectado por el cambio climático. El segundo componente (caracterización hidrográfica) tampoco se ve afectado por el cambio climático, ya que la determinación de las características de las cuencas vertientes viene condicionada por la topografía, que no es susceptible de verse modificada por efecto de cambios en el clima. El cuarto componente en sí, es decir, una vez eliminada su dependencia del tercer componente, tampoco se va a ver afectado por el cambio climático, puesto que la respuesta hidrológica de las cuencas vertientes responde únicamente a procesos físicos que tan solo se relacionan con el clima a través de cambios en la precipitación, y en menor medida de la temperatura, y estos cambios quedan incorporados en el tercer componente de la lista anterior.

Es por tanto el tercer componente, el de recopilación de datos meteorológicos y construcción de las curvas IDF el que absorbe los más importantes efectos del cambio climático y por tanto sobre el que centraremos la atención en este caso piloto. Es importante tener en cuenta, como se ha remarcado durante el desarrollo de la metodología que, para la correcta incorporación del cambio climático, es condición indispensable una correcta interpretación y caracterización del clima presente.

## 2.2 Descripción general de la metodología

La metodología general descrita en secciones anteriores de este documento puede adaptarse a este caso de estudio mediante un proceso de cuatro pasos:

- Recopilación de la información climática actual.
- Generación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.
- Recopilación de la información de cambio climático.
- Actualización de las curvas IDF en los periodos horizonte futuros y para los escenarios de cambio climático seleccionados.

### 2.2.1 Recopilación de la información climática actual

Tal y cómo se explica en el documento del resumen ejecutivo del proyecto, “se han identificado en la región cinco estaciones meteorológicas operadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Un análisis en detalle de las series de datos muestra que en todas estas estaciones existen interrupciones en sus registros teniendo únicamente como años completos los siguientes periodos:

- Estación Cosapa: 1976-1984, 1995-2000, 2008-2011.
- Estación Curahuara de Carangas: 1976-1981, 2011.
- Estación Oruro Aeropuerto: 1943-1956, 1959.
- Estación Sajama: 1979-1980, 1982-1984.
- Estación Turco: 1977-1982, 2005-2008.

Las únicas estaciones que se encuentran en la zona de estudio son las estaciones de Cosapa y Turco, por lo que el estudio se ha focalizado a la consideración de estas estaciones para los cálculos respectivos. Tomando en cuenta que la información de precipitaciones diarias (Pmax 24) es discontinua y con registros muy cortos, la aplicación de métodos convencionales para la determinación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) es limitado. Sin embargo, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), en coordinación con el Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH-UMSA), ha conducido recientemente una importante iniciativa para [la] determinación de Curvas IDF para el territorio boliviano en la perspectiva de proporcionar información validada para los proyectos de desarrollo.”

Para el caso del presente estudio, se cuenta con el trabajo titulado: “*Construcción de relaciones IDF para las estaciones pluviográficas del departamento de Oruro a partir del Método de las curvas tipo*” (no disponible en internet). Este estudio fue concluido el año 2011 y fue realizado por los siguientes autores: Lady Amanda Cruz Ali, Gabriela Sossa Ledezma y Edgar Titirico Ventura. Es en este sentido que se ha optado por utilizar los resultados obtenidos en este estudio por considerarse más actualizados y por contar con información que fue depurada y que aún no ha sido actualizada en las bases de datos del SENAMHI. De acuerdo a este estudio se analizaron 22 estaciones meteorológicas del departamento de Oruro con información pluviométrica contemplada entre 1941 hasta 2011 e información pluviográfica entre 1985 a 1998. Un aspecto relevante de este estudio es que se tomaron en cuenta 3245 bandas pluviográficas semanales.

Luego de un tratamiento minucioso de la información, se ha determinado según este estudio que, tanto su calidad como la continuidad de los registros es irregular. Habiéndose detectado que solo 30,61% del total de la información pluviométrica y 59,7% de la información pluviográfica es considerada como información buena. Se han generado las ecuaciones necesarias de Intensidad – Duración – Periodo de Retorno son las que fueron consideradas para el posterior cálculo de Caudales de Diseños de las obras de Drenaje.

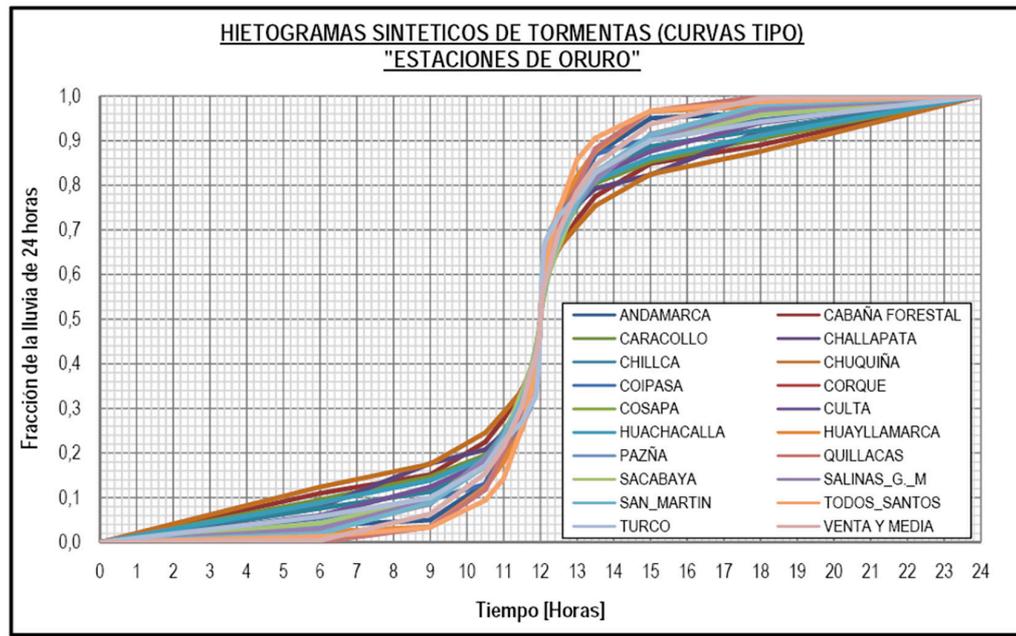
Es decir, en este caso, la información climática es escasa, y en el desarrollo del proyecto se hace uso de estudios previos, que utilizando información adicional permite reconstruir las curvas IDF utilizando información limitada. Específicamente, se hace uso de las curvas IDF tipo definidas por el *Soil Conservation Service (SCS)* de los EE.UU. de América (USDA, 2015 (216)). Estas curvas tipo sirven para parametrizar la distribución temporal de precipitación en tormentas en distintos climas y hacerla depender de valores fácilmente calculables, en este caso, la precipitación máxima acumulada en 24 horas.

Por tanto, habrá que recopilar aquella información climática que permita calcular, para el periodo histórico de referencia, la precipitación máxima acumulada en 24 horas, ya que este es el parámetro de referencia que permite construir las curvas IDF, y por tanto, este es el parámetro que habrá que actualizar y determinar su nuevo valor bajo los distintos escenarios de cambio climático en los distintos periodos horizonte.

## 2.2.2 Generación de las curvas IDF

Como se adelantó en la sección anterior, la limitada disponibilidad de información de precipitación en el área de estudio condicionó la elección de una metodología para la generación de las curvas IDF del proyecto. En lugar de construirlas a partir del análisis de las series temporales históricas de precipitación, se decidió utilizar un estudio previo donde se hacía uso de las curvas tipo del *Soil Conservation Service*. Esta aproximación permite reducir la complejidad del análisis de extremos a distintas agregaciones temporales y trabajar a partir de estadísticos diarios (o 24 horarios), que son más sencillos de calcular aún con pocos datos, y son mucho más robustos frente a las incertidumbres presentes en las medidas.

Figura 29: Ejemplo de hietogramas sintéticos generados en el proyecto



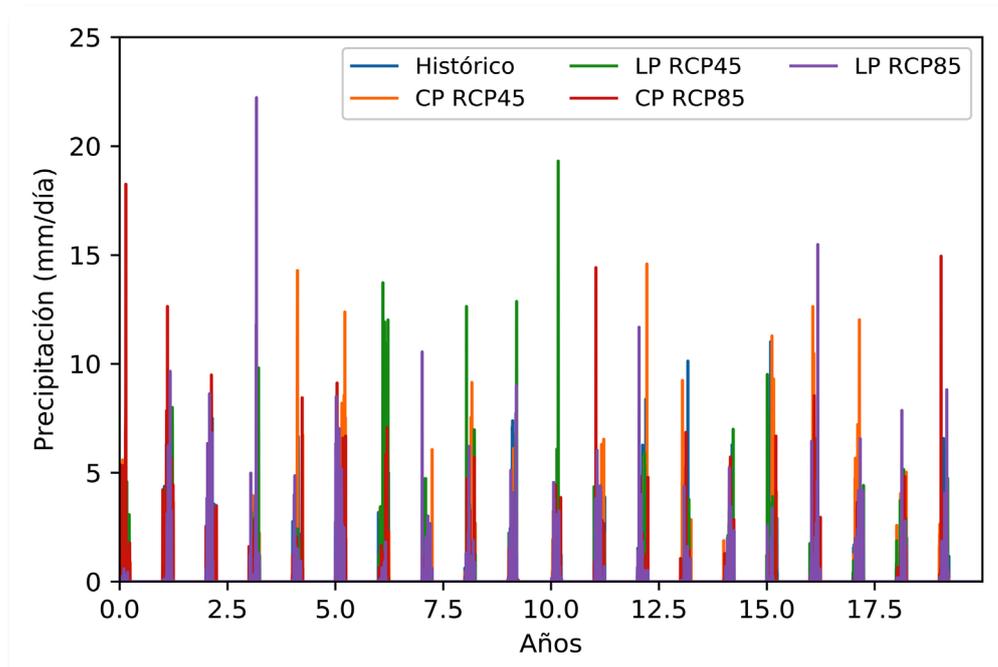
Fuente: elaboración propia

Lo importante, de cara a realizar la actualización de las IDF para incluir los efectos del cambio climático, es entender que el procedimiento que habrá que seguir para generar las IDF del futuro habrá de ser el mismo que el seguido para generarlas para el periodo actual. Esto es esencial para asegurar que las diferencias que surjan estén únicamente ligadas a los cambios en el clima, y que no se deban a pequeñas variaciones en la metodología. Por tanto, debido a que en este caso de estudio las curvas IDF se construyen a partir del estadístico **precipitación acumulada en 24 horas**, este ha de ser el parámetro que habremos de actualizar a partir de la información de los modelos climáticos.

## 2.2.3 Recopilación de la información de cambio climático

Como se comentó en la sección correspondiente, la información de cambio climático ha de ser obtenida, bien de los modelos de circulación general (GCM), cuya fuente principal de consulta sería el proyecto *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* (45) utilizado en el desarrollo del quinto informe del IPCC; bien de los modelos de circulación regional (RCM), que hacen uso de las simulaciones de los GCM para obtener las condiciones de contorno de simulaciones sobre mallas de mayor detalle, con modelos que incluyen mejores parametrizaciones de los procesos y que por tanto proporcionan información más exacta, cuya principal fuente de consulta sería el proyecto *CORDEX* y sus materializaciones regionales.

➤ **Figura 30:** Series temporales de precipitación del periodo histórico y de los periodos futuros extraídas de los modelos climáticos



➤ **Fuente:** elaboración propia

Para este caso piloto, se ha decidido utilizar la información de cambio climático del *downscaling* de la base de datos *Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP (50), Thrasher, B., 2012 (217)). Esta base de datos contiene 150 años simulados, desde 1950 a 2100, con una resolución espacial de 0.25 X 0.25 grados para 21 modelos del CMIP5 (CMIP5 (45); Taylor et al., 2012 (218)). Los datos tienen una resolución temporal diaria. Es decir, en lugar de acudir a cada uno de los modelos, se ha utilizado la información proporcionada por el conjunto o *ensemble*. Esta información es más robusta que la de cada uno de los modelos por separado y podría utilizarse incluso para realizar un análisis de incertidumbre (Gleckler et al., 2008 (219)).

El acceso a los datos NEX-GDDP se ha realizado a través de la siguiente dirección: <https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/NEXGDDP/BCSD/>. Dicha dirección pertenece a un servidor de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) desde donde se puede descargar manualmente la información de los modelos de cambio climático utilizados en el presente informe.

La Figura 31 muestra las diferentes opciones que podemos encontrar al abrir la página. Como podemos ver en la Figura, existen tres opciones que corresponden a los resultados de los modelos climáticos para el periodo histórico (1950-2005) y para el periodo futuro (2005-2100) para los escenarios RCP4.5 y RCP.8.5

➤ **Figura 31:** Acceso al portal de datos NCCS

El portal de datos NCCS Datashare muestra la siguiente estructura de directorios y carpetas:

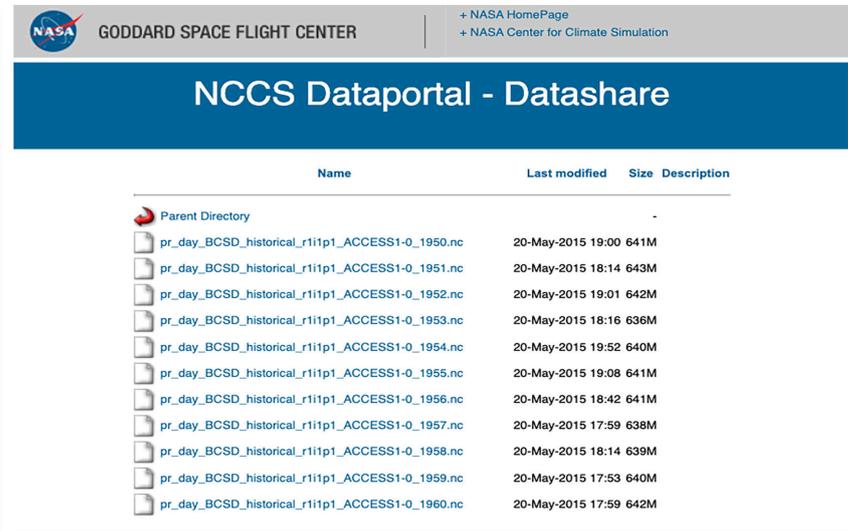
Name	Last modified	Size	Description
Parent Directory		-	
historical/	22-May-2015 10:36	-	
rcp45/	22-May-2015 10:39	-	
rcp85/	22-May-2015 10:48	-	

El pie de página incluye el logo de USA.gov, un enlace a la política de privacidad y el logo de NASA. El curador es Corey D Jones, el oficial de NASA es Dan Duffy y la última actualización fue el 03/13/2019.

➤ **Fuente:** elaboración propia a partir de <https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/NEXGDDP/BCSD/>

Al seleccionar cualquiera de las tres opciones (historical, rcp45 y rcp85) tendremos la posibilidad de descargar tres variables: precipitación diaria (prcp), temperatura máxima diaria (tasmax) y temperatura mínima diaria (tasmin). En nuestro caso hemos seleccionado la variable prcp.

Una vez seleccionada la variable precipitación (prcp) el servidor mostrara los resultados para los 21 modelos (GCMs) como muestra la Figura N2. Cada uno de los ficheros contiene la información para uno de los 21 modelos, para todo el globo, y para cada año por separado en formato NetCDF.

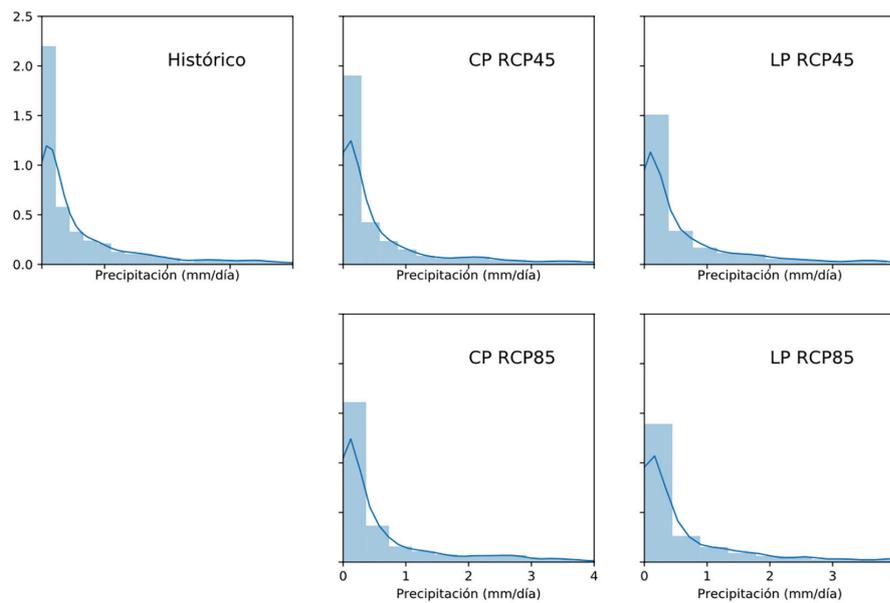


**Figura 32:** Vista del portal de datos NCCS

**Fuente:** Fuente: elaboración propia a partir de <https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/NEXGDDP/BCSD/>

Como también se ha comentado, sería necesario escoger tanto un periodo horizonte futuro para el análisis, puesto que el cambio climático provocará diferentes efectos en diferentes periodos futuros, como una serie de escenarios de referencia para el análisis. Estos últimos son los ya descritos *Representative Concentration Pathways (RCP)*, escenarios sintéticos de emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente desarrollo industrial) y cambios en el uso de suelo (desarrollo agrícola) que proporcionan situaciones de referencia para la simulación de acuerdo con distintos escenarios plausibles de desarrollo socioeconómico. Una práctica habitual es la de trabajar con los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 únicamente, ya que proporcionan una imagen de la posible dispersión de resultados, incluyendo escenarios adicionales tan solo en aquellos casos en que la dispersión sea tan grande que la incorporación de nuevos escenarios pueda permitir una mejor delimitación de la misma.

**Figura 33:** Distribuciones de la precipitación obtenidas del modelo



**Fuente:** elaboración propia

Respecto a los años horizonte, se ha decidido analizar los periodos centrados en el año 2030 (corto plazo) y el 2050 (medio plazo). Es importante destacar que, al estar trabajando con periodos de 20 años, estos periodos no coinciden exactamente con los estándar que se suelen manejar en análisis climático. En cualquier caso, el análisis sigue siendo válido, y se ajustan los periodos a las necesidades específicas de cada proyecto.

El año de referencia es el 1991, debido a que el análisis del que surgen las curvas IDF hace uso de información de los años 1985-1998. Este periodo de análisis es corto para el cálculo de una climatología, que normalmente hace uso de veinte o treinta años de datos. A pesar de que las curvas IDF han sido calculadas en base a un periodo más corto de lo habitual, los cambios inducidos por el cambio climático se calcularán en base a periodos de 20 años, es decir, que el periodo de referencia será el 1981-2000, cuyo centroide sería aproximadamente el año 1991, mientras que el corto plazo se caracterizaría en base a la información del periodo 2021-2040 y la del largo plazo en base a la información del 2041-2060. Este punto es muy importante, debido a que, como ya se ha explicado, la variabilidad climática interanual puede afectar a varios años consecutivos y, por tanto, si no se consideran periodos de longitud suficiente, los cambios derivados del análisis podrían no ser únicamente debidos al cambio climático.

Es importante destacar que, si bien en este caso necesitamos calcular el cambio sobre la máxima precipitación acumulada en 24 horas, los modelos tan solo proporcionan información a resolución diaria. Debemos trabajar, por tanto, bajo la hipótesis de que el cambio en la máxima precipitación diaria, para cada periodo de retorno, será el mismo cambio que sufrirá en el futuro y bajos los distintos escenarios la máxima precipitación acumulada en 24 horas. Por tanto, para este caso de estudio será necesario calcular el cambio en la máxima precipitación diaria para las estaciones de Turco y Cosapa, que son las que se han utilizado para el cálculo de las curvas IDF.

Para ello, se extrae de la base de datos NEX-GDDP (50) la serie temporal de la malla del modelo más cercano a cada una de las estaciones. Del modelo se extraerán cinco series por estación: la correspondiente al periodo histórico, las dos correspondientes al corto plazo (escenario RCP4.5 y RCP8.5), y las dos correspondientes al largo plazo (de nuevo, escenarios RCP4.5 y RCP8.5). La Figura 33 muestra la distribución de precipitación para valores mayores que 0 y menores que 4 mm para la estación de Turco. Las distribuciones se muestran por medio de histogramas, que reflejan la densidad de probabilidad de cada uno de los posibles valores de precipitación. El eje de abscisas se limita al valor de 4 mm porque a partir del mismo la densidad de probabilidad decae rápidamente. Cuanto más alto es el valor de cada barra en el histograma, más probable es que se obtenga el valor mostrado en el eje de abscisas. El hecho de que la barra más alta en el origen sea la del periodo histórico, muestra que cuando llueva en el futuro, lloverá más cantidad por evento que en la actualidad.

A estas cinco series se les realiza un análisis de extremos, ajustando la distribución de máximos diarios de precipitación a la distribución Generalizada de Extremos - GEV (Coles y col., 2001 (220)), obteniendo los valores asociados a cada periodo de retorno, tal y cómo se muestra en la Tabla 12.

➤ **Tabla 12:** Valores de máxima lluvia diaria (en mm) para distintos periodos de retorno, en distintos periodos horizonte y escenarios

Periodo de retorno	Periodo y escenario				
	Histórico	CP RCP45	LP RCP45	CP RCP85	LP RCP85
1,1	14,13	15,54	15,11	16,05	12,17
2	28,21	30,99	30,97	33,26	25,08
5	44,78	48,31	48,48	54,79	44,12
10	59,03	62,96	62,77	75,04	63,43
25	83,18	86,57	85,81	112,50	101,21
50	108,13	109,02	108,41	153,85	145,02
100	142,47	136,88	137,93	212,65	210,3

➤ **Fuente:** elaboración propia

Comparando los valores de cada periodo de retorno en cada escenario con el periodo histórico tal y cómo se deriva del modelo, se determinan los factores de cambio a aplicar a la máxima precipitación acumulada en 24 horas, para convertirla en su proyección a futuro, y, por tanto, en el parámetro de referencia para construir dichas curvas IDF. Estos factores de cambio se muestran en la Tabla 13 para la estación de Turco.

**Tabla 13:** Factores multiplicadores para transformar la precipitación máxima diaria de distintos periodos de retornos en su proyección bajo cambio climático

Periodos de retorno	Escenarios y periodos			
	CP RCP45	LP RCP45	CP RCP85	LP RCP85
1,1	1,18	1,24	1,28	1,35
2	1,13	1,22	1,25	1,35
5	1,04	1,12	1,14	1,31
10	0,98	1,08	1,06	1,29
25	0,93	1,05	0,97	1,30
50	0,94	1,07	0,93	1,33
100	0,98	1,12	0,91	1,38

Fuente: elaboración propia

## 2.2.4 Actualización de las curvas IDF por el cambio climático

La actualización de las curvas IDF, una vez completados los pasos anteriores, es sencilla y directa. Tal y como se explicó anteriormente, la máxima precipitación en 24 horas se utilizó para llevar a cabo la construcción de las curvas IDF, ahora tan solo hemos de aplicar los factores de cambio o deltas, determinadas en el paso anterior, a los valores del estadístico derivado de las observaciones pluviométricas, que en el caso que nos ocupa proceden de un estudio específico. Una vez actualizados los valores de dicho estadístico para ambas estaciones, tan solo ha de repetirse el procedimiento de derivación de las nuevas curvas IDF.

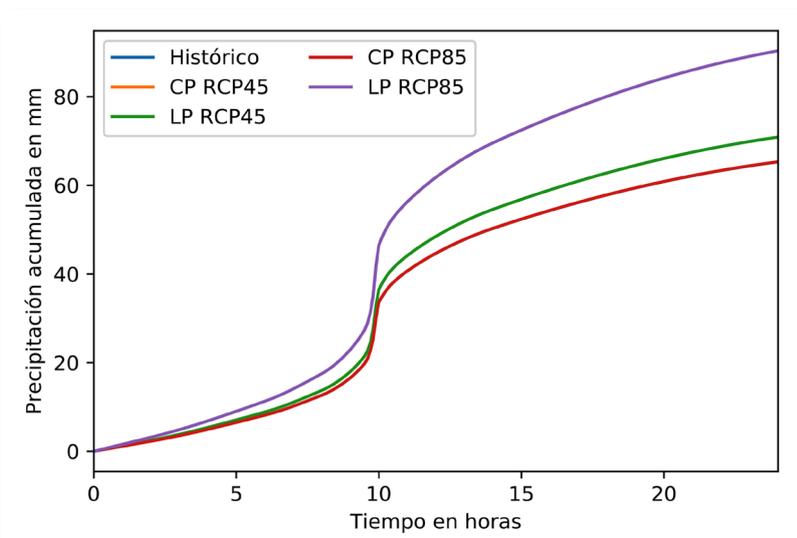
Para el caso de la estación de Turco, la Tabla 14 muestra los valores de la máxima precipitación en 24 horas obtenidas del estudio citado para el periodo histórico, y los valores actualizados para los escenarios RCP45 y RCP85, en el corto y el largo plazo. Estos valores se han calculado a partir de los proporcionados en el estudio original y aplicando los factores correctores de la Tabla 13.

**Tabla 14:** Valores de la máxima precipitación en 24 horas, en mm, asociada a distintos periodos de retorno en la estación de Turco

Periodos de retorno	Escenarios y periodos				
	Histórico	CP RCP45	CP RCP85	LP RCP45	LP RCP85
1,1	14,58	17,23	18,12	17,23	19,66
2	34,71	39,39	42,34	39,39	47,03
5	53,10	55,12	59,71	55,12	69,67
10	65,28	63,92	70,32	63,91	84,53
25	80,67	75,49	85,08	75,49	104,89
50	92,08	86,43	98,64	86,434	122,39
100	103,41	101,65	115,80	101,65	142,98

Fuente: elaboración propia

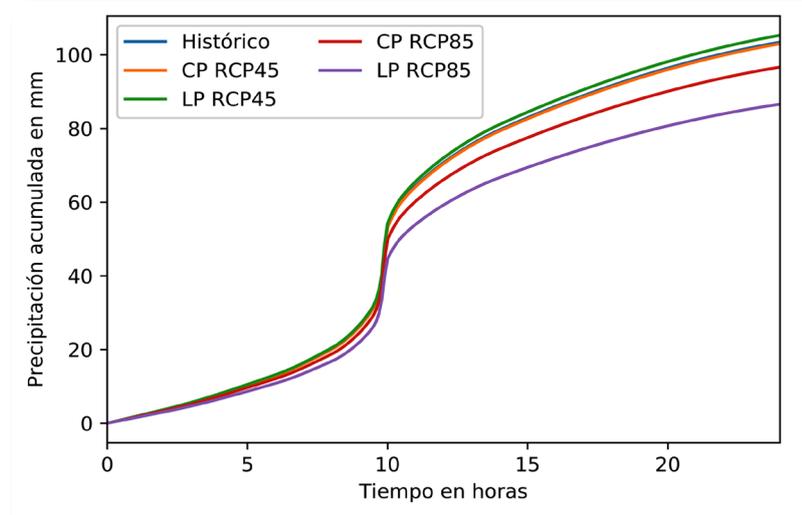
A partir de estos valores se puede construir el hietograma sintético que sea necesario para el diseño de cualquier elemento de la vía. La Figura 34 muestra los hietogramas sintéticos de tipo I para la estación de Turco y para un periodo de retorno de 10 años. Puede verse que, para dicho periodo de retorno, los cambios son bastante significativos para los dos escenarios de largo plazo respecto al periodo histórico. Los resultados para los periodos de medio plazo son similares a los obtenidos para el periodo históricos.



**Figura 34:**  
Hietogramas sintéticos del tipo I para el periodo de retorno de 10 años

**Fuente:**  
elaboración propia

Un comportamiento similar se puede apreciar para los hietogramas de 100 años de periodo de retorno (Figura 35). Al igual que para el periodo de 10 años el escenario LP RCP85 muestra un incremento mucho mayor que el resto respecto al periodo histórico. Del mismo modo que para los hietogramas de 10 años no se aprecia cambios entre los resultados para el corto plazo y el periodo histórico.



**Figura 35:**  
Hietogramas sintéticos del tipo I para el periodo de retorno de 100 años

**Fuente:**  
elaboración propia

## 2.2.5 Metodología alternativa

En la sección previa se muestra la actualización de las curvas IDF por el cambio climático directamente mediante la corrección de los periodos de retorno de precipitación a través de la metodología basada en factores de cambio. Sin embargo, existen otras metodologías alternativas que en vez de corregir únicamente los periodos de retorno de la precipitación corrigen las series de precipitación al completo. Las más importantes son: el método de las deltas, el método directo y el método de mapeo de cuantiles. Los aspectos técnicos de cada una de dichas técnicas son descritos en el apartado de “Técnicas de corrección del sesgo y reducción de escala” del Tomo 1.

Para una correcta aplicación de las técnicas de corrección de sesgo, ha de hacerse uso de todos los modelos climáticos a disposición para la zona de estudio. Debe quedar claro que ningún modelo es mejor que otro, ya que cada uno es más capaz de capturar unas dinámicas que otras, y por tanto podría representar mejor las respuestas del clima frente al cambio climático en unas situaciones que en otras. Esto hace que la forma ideal de tratar con la corrección de sesgo sea utilizar todos los modelos disponibles, a partir de cuyos resultados se podrá construir una distribución que permita un análisis como los que se realizan habitualmente en hidrología clásica.

Existen estudios como por ejemplo el plasmado en el documento «Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático», en donde se llevan a cabo análisis de la bondad con que cada uno de los modelos representa algunas de las características del clima actual en diversas localizaciones. Este tipo de análisis podrían utilizarse para reducir el número de modelos a utilizar en la corrección de sesgo, aunque esta práctica no es recomendable. Como apuntan Nissan y colaboradores ((221)), «muchas veces no es posible determinar de forma definitiva cuando un modelo es “suficientemente bueno” para responder a una pregunta concreta y cuando ha de ser descartado por completo (ver Di Luca et al., 2015 ((222)); Knutti et al., 2010 ((223)) ), por lo que actualmente, el juicio subjetivo es una componente esencial» del proceso de análisis de los efectos del cambio climático. Complementan esta conclusión, con el comentario de que, en aquellos casos en que la incertidumbre sea tal que no permita la concreción necesaria para la definición concreta de los impactos derivados del cambio climático, habría de recurrirse al análisis de tendencias y al estudio de los efectos en el corto plazo, haciendo uso de las dinámicas históricas y de su variabilidad.

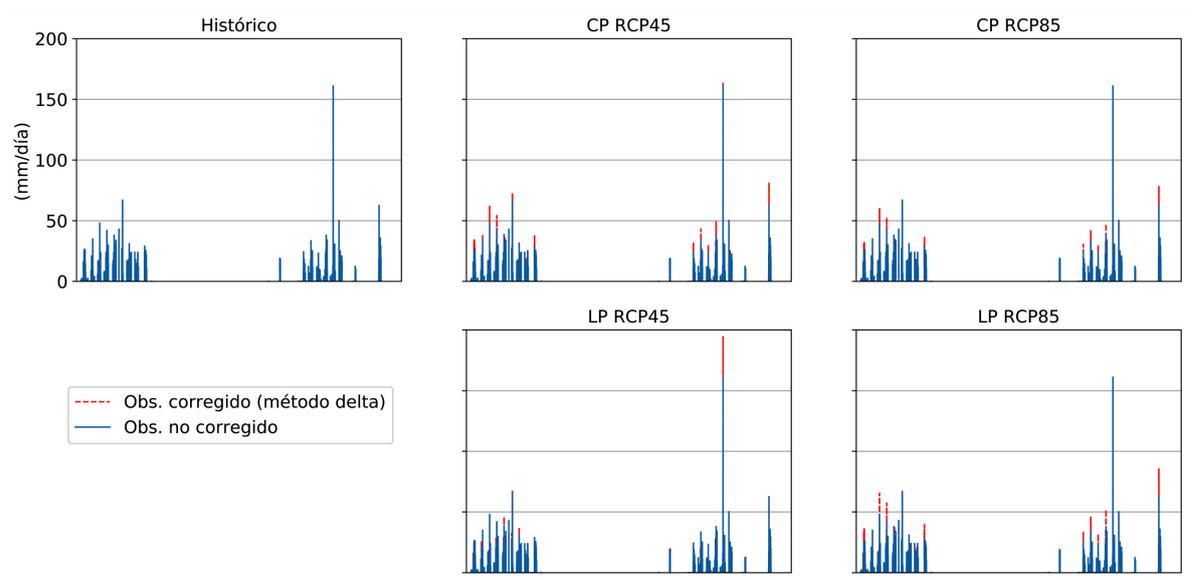
En definitiva, las técnicas de corrección de sesgo, así como cualquier actualización de dinámicas por los efectos del cambio climático, requiere una aplicación sistemática de todo el conocimiento generado -lo que incluye las proyecciones de todos los modelos-. La evaluación de los resultados obtenidos incluye una componente subjetiva, lo que hace imprescindible que estos análisis los lleven a cabo especialistas en el campo del cambio climático. Además, la conclusión de estos estudios puede ser que la incertidumbre sea mayor que el valor medio del resultado, y por tanto que no quede más remedio que recurrir a analizar al futuro más próximo, abandonando por completo la posibilidad de estudiar el largo plazo.

A continuación, se muestra un ejemplo de cada una de las técnicas sobre la estación de Turco utilizando para ello únicamente uno de los modelos regionales de cambio climático. Sin embargo no ha de olvidarse que, como se ha comentado en los párrafos anteriores, el proceso debería repetirse para todos los modelos disponibles, y con todas las proyecciones, proceder a realizar un análisis estadístico de las mismas para decidir sobre su robustez.

Es importante destacar aquí que para la aplicación de estas técnicas es necesario disponer de la serie temporal de observaciones en la estación de Turco, requerimiento que no existía en el caso anterior. Es decir, que esta aproximación podríamos seguirla en el caso de tener acceso a la totalidad de la información climática, y no únicamente a la información parcial que nos presenta el proyecto original referido.

La Figura 36 muestra un ejemplo del método delta de corrección de sesgo aplicado sobre los datos de precipitación disponibles de la estación de Turco. La línea de color azul corresponde a la serie observada mientras que la línea roja discontinua corresponde a la serie corregida mediante el método delta. Cada panel corresponde a los diferentes periodos y escenarios analizados (histórico, CP RCP45, CP RCP85, LP RCP45 y LP RCP85). Como podemos observar en la Figura 36, las series corregidas mediante el método delta siguen la misma distribución que las observadas. El método delta se basa en corregir las series observadas mediante unos factores de cambio calculados a través del cociente del conjunto de modelos de cambio climático para el periodo futuro y para el periodo histórico. El principal inconveniente de este método es que se pierde gran parte de la información proporcionada por lo modelos de cambio climático ya que la estructura temporal de las series corregidas estará marcada por la serie observada y no por las series simuladas por los modelos de cambio climático.

**Figura 36:** Ejemplo del método delta de corrección de sesgo aplicado a la estación de Turco

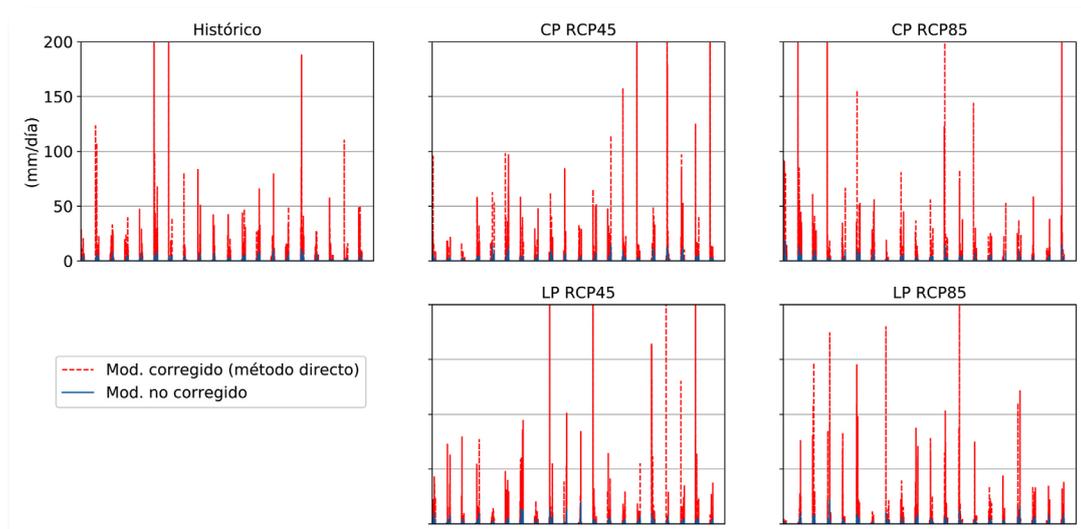


La línea de color azul corresponde a la serie observada mientras que la línea roja discontinua corresponde a la serie corregida mediante el método delta. Cada panel corresponde a los diferentes periodos y escenarios analizados (histórico, CP RCP45, CP RCP85, LP RCP45 y LP RCP85).

**Fuente:** elaboración propia

La Figura 37 muestra el método directo de corrección de sesgo aplicado a la estación de Turco. La línea de color azul corresponde a un ejemplo de la serie de precipitación simulada por uno de los modelos de cambio climático mientras que la línea roja discontinua corresponde a la misma serie corregida mediante el método directo. Cada panel corresponde a los diferentes periodos y escenarios analizados (histórico, CP RCP45, CP RCP85, LP RCP45 y LP RCP85). Mediante el método directo se calcula la distancia entre el modelo de cambio climático y la serie observada en el periodo histórico, y se aplica dicho cambio para corregir directamente las salidas de los modelos. Como se puede observar en la Figura 37, este método puede resultar en ocasiones inestable, dando como resultado valores de precipitación muy elevados (la figura está limitada para valores por debajo de los 200 mm/día, sin embargo, existe algún valor que supera los 400 mm/día). Es por eso que habrá que prestar especial atención a los valores máximos obtenidos al corregir los modelos climáticos, ya que de ellos dependerán enormemente los periodos de retorno calculados.

➤ **Figura 37:** Ejemplo del método directo de corrección de sesgo aplicado a la estación de Turco

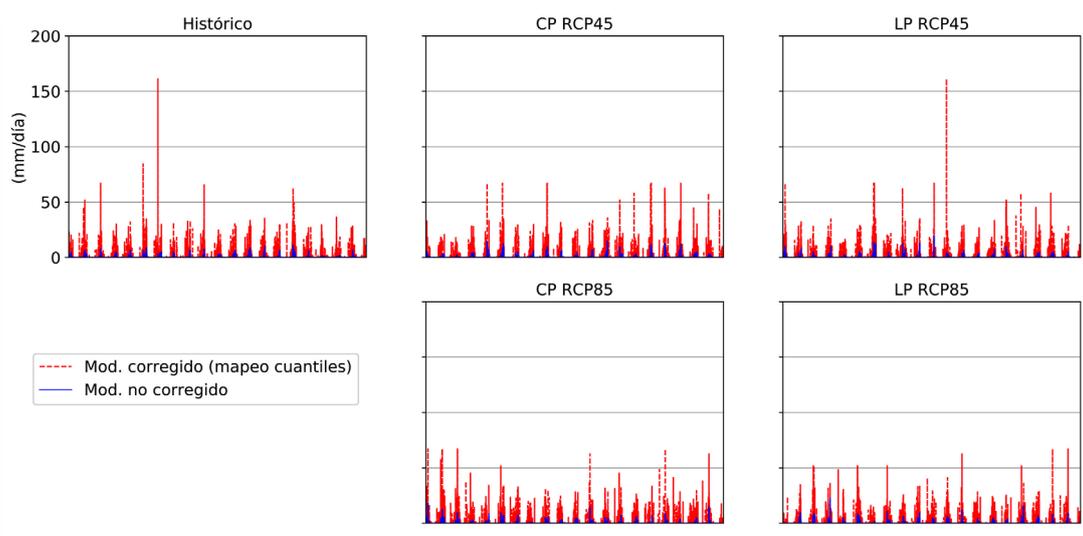


**Nota:** La línea de color azul corresponde a un ejemplo de la serie de precipitación simulada por uno de los modelos de cambio climático mientras que la línea roja discontinua corresponde a la misma serie corregida mediante el método directo. Cada panel corresponde a los diferentes periodos y escenarios analizados (histórico, CP RCP45, CP RCP85, LP RCP45 y LP RCP85).

➤ **Fuente:** elaboración propia

Por último, la Figura 38 muestra método basado en mapeo de cuantiles para la estación de Turco. La línea de color azul corresponde a un ejemplo de la serie de precipitación simulada por uno de los modelos de cambio climático mientras que la línea roja discontinua corresponde a la misma serie corregida mediante el método de mapeo de cuantiles. Del mismo modo que en las dos figuras previas, cada panel corresponde a los diferentes periodos y escenarios analizados (histórico, CP RCP45, CP RCP85, LP RCP45 y LP RCP85). Mediante el método de mapeo de cuantiles se transforma cada valor del modelo climático con el valor asociado al cuantil correspondiente de la serie observada. Para poder conseguir valores más elevados que los observados (extrapolar) hemos aplicado una función de extrapolación lineal. Como podemos observar en la Figura 38, los resultados obtenidos son más estables que aquellos conseguidos con el método directo. Esto se debe a que la serie resultante al aplicar el método de mapeo de cuantiles es similar a la observada desde un punto de vista estadístico. La Figura 38 muestra que los máximos obtenidos con el método de mapeo de cuantiles superan ligeramente los 150 mm/día, valor que se acerca mucho al máximo registrado para la estación de Turco.

**Figura 38:** Ejemplo del método de mapeo de cuantiles de corrección de sesgo aplicado a la estación de Turco



La línea de color azul corresponde a un ejemplo de la serie de precipitación simulada por uno de los modelos de cambio climático mientras que la línea roja discontinua corresponde a la misma serie corregida mediante el método de mapeo de cuantiles. Cada panel corresponde a los diferentes periodos y escenarios analizados (histórico, CP RCP45, CP RCP85, LP RCP45 y LP RCP85).

**Fuente:** elaboración propia

En la Figura 37 y en la Figura 38 se puede apreciar el sesgo tan importante existente entre las series observadas de precipitación y las simuladas por los modelos de cambio climático; y la importancia de aplicar las técnicas de corrección de sesgo. También se puede observar que el método basado en mapeo de cuantiles es más estable que el método directo, y por lo tanto debería de ser utilizado como primera opción, siempre y cuando sea viable en términos de coste computacional (el método de mapeo de cuantiles presenta mucho mayor coste computacional que los otros dos métodos).

Una vez aplicadas las técnicas de corrección de sesgo podemos calcular los periodos de retorno directamente de las series corregidas y compararlos con los observados. La Tabla 15 muestra los factores multiplicadores obtenidos para el modelo “CSIRO-Mk3-6-0” utilizado en el presente análisis. Los valores contenidos en la Tabla 15 son diferentes a los presentados en Tabla 13, ya que estos últimos fueron obtenidos mediante el ensamble de los 21 modelos.

Por otro lado, la Tabla 16 muestra los periodos de retorno actualizados mediante el método basado en mapeo de cuantiles. Como es lógico los periodos de retorno calculados para el modelo “CSIRO-Mk3-6-0” difieren de aquellos obtenidos mediante el “ensamble” de los modelos, pero puede verse que las diferencias no suponen un cambio radical en las conclusiones; los números cambian, porque los modelos utilizados son diferentes, pero los cambios son compatibles.

**Tabla 15:** Factores multiplicadores para transformar la precipitación máxima diaria de distintos periodos de retornos en su proyección bajo cambio climático

Periodos de retorno	Escenarios y periodos			
	CP RCP45	LP RCP45	CP RCP85	LP RCP85
1,1	1,41	1,46	1,65	1,46
2	1,12	1,16	1,15	1,06
5	1,05	1,09	1,02	0,96
10	1,03	1,06	0,98	0,93
25	1,01	1,04	0,94	0,90
50	0,99	1,03	0,92	0,88
100	0,99	1,02	0,91	0,87

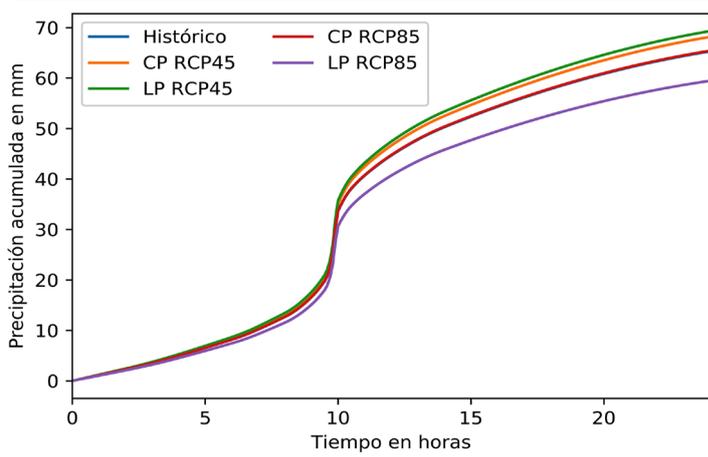
**Fuente:** elaboración propia

➤ **Tabla 16:** Valores de la máxima precipitación en 24 horas, en mm, asociada a distintos periodos de retorno en la estación de Turco

Periodos de retorno	Escenarios y periodos				
	Histórico	CP RCP45	CP RCP85	LP RCP45	LP RCP85
1,1	14,58	20,61	21,30	24,05	21,29
2	34,72	39,08	40,46	39,92	36,90
5	53,11	55,95	57,95	54,40	51,15
10	65,28	67,11	69,53	63,99	60,58
25	80,67	81,23	84,16	76,11	72,50
50	92,08	91,69	95,02	85,10	81,35
100	103,41	102,09	105,80	94,03	90,13

➤ **Fuente:** elaboración propia

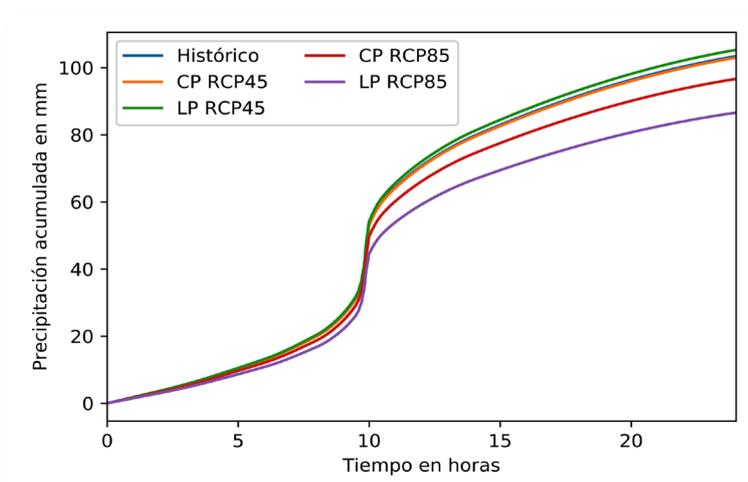
De nuevo mediante la misma metodología aplicada en el apartado anterior construimos el hietograma sintético necesario para el diseño de cualquier elemento de la vía. La Figura 39 muestra los hietogramas sintéticos de tipo I para la estación de Turco y para un periodo de retorno de 10 años. Los hietogramas para los distintos escenarios de cambio climático fueron calculados con las series corregidas mediante el método de mapeo de cuantiles. Como se puede observar en la Figura 39, los valores obtenidos para el escenario RCP45 son superiores a los observados, mientras que aquellos obtenidos para el escenario RCP85 son inferiores.



➤ **Figura 39:** Hietogramas sintéticos del tipo I para el periodo de retorno de 10 años

**Fuente:** elaboración propia

Sin embargo, para los hietogramas de 100 años de periodo de retorno (Figura 40) el único escenario que supera los valores observados es aquel que corresponde al escenario de largo plazo para el RCP45 (LP RCP45). Para el resto de escenarios, los periodos de retorno y por lo tanto los hietogramas sintéticos simulados, son inferiores a los observados.



➤ **Figura 40:** Hietogramas sintéticos del tipo I para el periodo de retorno de 100 años

**Fuente:** elaboración propia

Hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos en la presente sección sirven únicamente de ejemplo ya que son resultados de utilizar un único modelo regional; es por ello que difieren en gran medida de los obtenidos en la sección previa.

## 2.3 Exposición

En el caso que nos atañe, la evaluación de la exposición corresponde a identificar aquellos elementos expuestos a la amenaza considerada, entendiendo como elementos tanto los objetos físicos (una tubería, una cuneta, un talud, un puente, etc.) como los servicios que estos proveen (evacuación de agua de la calzada, circulación a lo largo de la carretera, etc.). Normalmente, la evaluación del riesgo se centra más en estos últimos, puesto que los objetos físicos que conforman una obra de ingeniería son diseñados siguiendo un marco conceptual distinto ligado a la probabilidad de fallo en la vida útil del elemento.

Si quisiéramos por ejemplo considerar el riesgo de interrupción del servicio de la carretera debido a lluvias torrenciales, deberíamos considerar como elementos expuestos las obras de drenaje, los puentes y los taludes de la carretera. Estos elementos expuestos cumplen distintas funciones, que se verían comprometidas si los elementos físicos enumerados fuesen modificados o dañados por la lluvia; la amenaza.

La identificación de los elementos expuestos es por tanto el paso inicial a acometer en la evaluación del riesgo, y comienza una vez que se ha determinado el riesgo que es necesario estudiar, en este caso, la pérdida de servicio de la infraestructura.

Para caracterizar el elemento expuesto, y por tanto la exposición, es necesario decidir de qué forma se cuantifica el efecto de la amenaza sobre el mismo, que es lo que comúnmente se conoce como exposición, y que se detallará en la próxima sección. Sí es importante comentar aquí que, es la vulnerabilidad la que determina cómo caracterizamos la exposición. Normalmente, cuanto más detallada sea la forma en que determinamos la vulnerabilidad, más información requeriremos para caracterizar adecuadamente la exposición.

En el caso de un talud de carretera, podríamos tan solo necesitar su pendiente, para un modelo de daño, o vulnerabilidad, relativamente sencillo; pero podríamos necesitar además su composición granulométrica, la disposición de sus elementos drenantes, la densidad del material y la disposición de la escollera, por ejemplo, para aplicar un modelo de daño más complejo.

El objetivo de la caracterización de la exposición es, por tanto, proveer de información a los modelos de daño para poder combinar la información de la amenaza con la de vulnerabilidad y obtener por tanto el valor buscado del riesgo. Nótese, en cualquier caso, que el riesgo de pérdida de servicio en la infraestructura vial, no se corresponde automáticamente con el fallo de un talud, sino que viene determinado por las posibilidades de fallo de todos los taludes presentes en la infraestructura, combinadas con las probabilidades de fallo de cada uno de los elementos de drenaje, etc. Por ello, ha de construirse un árbol o cadena de fallo que permita calcular la probabilidad o el riesgo deseado, teniendo en cuenta que los eventos no son independientes, es decir, que no parece plausible pensar que los eventos que producen el fallo en un talud o en otro sean independientes, sino que el fallo de algún talud vendrá ligado a un evento de lluvia torrencial, que afectará a la toda la infraestructura a la vez, y que por lo tanto, la amenaza no está repartida en el tiempo sino que actúa simultáneamente sobre todos los elementos expuestos.

La exposición es susceptible de variar en el tiempo. Por ejemplo, puede que la cimentación de una determinada obra de fábrica no pueda ser afectada por el agua inicialmente debido a la protección inicial de la misma. Pero con el tiempo, esta protección puede disminuir debido a la erosión, y la cimentación verse afectada en un periodo horizonte posterior. También puede ocurrir que inicialmente no exista ningún elemento en una localización, pero más tarde pueda aparecer. Un claro ejemplo podría ser una gasolinera que abriese sus puertas después de que la infraestructura llevase años operando. Por ello, es importante evaluar la exposición considerando siempre que es susceptible de evolucionar, y que una correcta evaluación de los efectos del cambio climático implica considerar también esta evolución temporal.

## 2.4 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad mide el impacto que la amenaza genera sobre el elemento o servicio expuesto en base a las características de la primera y del segundo. Su materialización corresponde a las funciones de daño o modelos de impacto que, a partir de la información de amenaza y exposición, proporcionan una cuantificación del efecto sobre el elemento expuesto.

En el caso de una tubería de drenaje, por ejemplo, la función de impacto podría medir si el elemento es capaz de desaguar o no el flujo recibido, y por tanto la función de impacto sería binaria: fallo o no fallo. También podría ser una función más compleja, que, en base a características de la tubería como su rugosidad y el grosor de las paredes, calculase el daño acumulado por la tubería, permitiendo evaluar la pérdida de vida útil de la infraestructura o la necesidad de mantenimiento adicional debido a las inclemencias climáticas.

Para el caso de un talud, el problema sería similar. Podríamos evaluar la posibilidad de fallo por vuelco, la posible erosión por flujo sobre el mismo y otros efectos, siempre a condición de encontrar la función de impacto adecuada y la información necesaria para aplicarla. A este respecto es importante destacar que muchas veces las funciones de daño utilizadas son generadas *ad hoc*, es decir, que no existe una fórmula o cuantificación explícita en la literatura técnica ni científica que permita cuantificar bajo un marco conceptual robusto el valor del impacto. En estos casos, se generan valores indicadores y se analiza mediante criterio de experto el valor de los mismos.

Un ejemplo podría corresponder por ejemplo a la erosión de un talud de carretera. El talud estará diseñado para soportar una determinada sollicitación de agua fluyendo sobre el mismo. Como se ha citado anteriormente, esta sollicitación máxima corresponde a una probabilidad de fallo en la vida útil del elemento. Sin embargo, cuando queremos cuantificar el riesgo, lo que estamos haciendo es asignar un valor, bien sea monetario o de otra índole, al evento de fallo, y este valor podría evaluarse de distintas maneras.

Un ejemplo claro sería la pérdida de servicio de la carretera por rotura de un talud. Podría, por ejemplo, utilizarse un modelo de daño acumulado en el que el fallo del talud pueda provenir, no únicamente de la sollicitación extrema de una amenaza puntual, sino de la acumulación de daños no extremos a lo largo del tiempo. Esta función de daño podría no existir, pero podría aproximarse, por ejemplo, sumando las fuerzas de cizalla que el agua genera sobre el talud al discurrir sobre él. Haciendo uso de formulaciones de transporte de sedimentos, podríamos llegar a una formulación *ad hoc*, que permita incorporar estos efectos sobre el talud, permitiendo una cuantificación aproximada de la vulnerabilidad.

Igual que se comentaba en el caso de la exposición, la vulnerabilidad es susceptible de evolucionar en el tiempo. Un ejemplo podría ser el incremento de la sensibilidad a la erosión de un talud a medida que sus capas superficiales se ven dañadas por sucesivas sollicitaciones climáticas. Muchas veces estos efectos son no lineales, es decir, que el primer 50% del daño se produce a través del primer 80% de vida útil del elemento, y a partir de aquí los efectos se aceleran, es decir, que la función de impacto podría necesitar de alguna variable de estado del elemento, variable que podría sufrir modificaciones a lo largo del tiempo que han de considerarse para una adecuada evaluación del riesgo climático.

## 2.5 Riesgo

Cómo se ha discutido a lo largo del documento, el riesgo no es más que una expresión combinada de las probabilidades de los distintos modos de fallo o pérdida de servicio de una infraestructura y las consecuencias de las mismas. Es decir, el riesgo combina probabilidades e impactos para generar una métrica única que agrega distintos efectos a lo largo del tiempo.

El cálculo del riesgo comienza con la identificación del riesgo a evaluar, que en el caso de infraestructuras viales puede corresponder a fallos estructurales o no, que limiten o imposibiliten el servicio de la infraestructura. Obviamente, la forma más sencilla de atacar el problema es construir un árbol o cadena a partir de los fallos que se quieren caracterizar, para poder determinar que funciones de daño son necesarias para calcular la vulnerabilidad, qué elementos expuestos existen y cuáles son las amenazas climáticas que considerar. Es decir, que a pesar de que el cálculo comience con la amenaza, el diseño conceptual del estudio de riesgo climático comienza con la caracterización del riesgo.

Continuando con los ejemplos expuestos hasta ahora, un riesgo a calcular podría ser el de pérdida de servicio debido a un fallo geotécnico de los taludes de la carretera. Para ello, debemos primero de todo determinar qué función de daño vamos a utilizar para el cálculo. Una vez determinada de qué forma vamos a calcular la vulnerabilidad, habría que hacer un inventario de todos los taludes de la infraestructura y recopilar las características de los mismos que sean necesarias para alimentar el modelo de impacto. También caracterizaremos las amenazas climáticas necesarias para alimentar dicho modelo de impacto, teniendo en cuenta que cada modelo puede requerir una caracterización de la amenaza ligeramente distinto.

Con este diseño inicial, en dónde nos hemos movido desde el riesgo hasta la amenaza, tenemos un esquema que habrá que seguir para el cálculo, comenzando con la amenaza. Por ejemplo, para el fallo de un talud puede que tan solo necesitemos evaluar la máxima lluvia horaria sobre la zona de estudio, que no tiene por qué ser homogénea en el espacio, y que además variará dependiendo del periodo de retorno considerado. Debido a ello, quizá no sea necesario un análisis detallado de la serie climática, sino tan solo un análisis limitado a los extremos de la misma.

Es importante destacar que, para cada probabilidad de ocurrencia de un evento extremo, o para periodo de retorno, existirá un valor distinto del impacto, y, por tanto, a la hora de calcular el riesgo, ha de tomarse una decisión respecto a la manera de agregar o resumir toda esta información.

En algunos casos, expresaremos el riesgo como una curva, por ejemplo, a través de los periodos de retorno del número de horas de pérdida de servicio de la infraestructura. En otros casos, combinaremos los periodos de retorno y los efectos para ofrecer un valor de pérdida de horas medias anuales, que aglutina el efecto de cada pérdida de servicio con la distribución temporal del mismo. En cualquier caso, la forma en que quede reflejado el riesgo tendrá que ver con el uso que se vaya a dar a esta cuantificación, y por tanto, es muy particular de cada proyecto concreto.

Cuando nos enfrentamos a la evaluación del riesgo climático, ha de tenerse en cuenta que este variará a lo largo del tiempo, puesto que tanto la amenaza, como la exposición y la vulnerabilidad pueden cambiar a lo largo del tiempo. Por lo tanto, tendremos una evaluación del riesgo distinta para cada escenario y periodo horizonte considerado. Precisamente, esta variación del riesgo en base a estos cambios es lo que nos permite evaluar la incertidumbre esperada, e introduciendo cambios de forma explicitar, generar y evaluación actuación de mitigación del riesgo.

## 2.6 Evaluación de medidas

La evaluación de medidas para la reducción del riesgo ha de basarse en análisis coste-beneficio y el coste-efectividad. En el primero de los casos se cuantifican monetariamente tanto los costes de las medidas a implantar como los beneficios derivados de estas. Se aplicarán y desarrollarán con detalle aquellas medidas que aporten mayores beneficios que costes generen. En el segundo de los casos, no se cuantifican monetariamente los beneficios, sino que estos se evalúan en base a alguna métrica, como podría ser el aumento en número de horas de servicio de una carretera, o el aumento en la vida media por desgaste. En este segundo caso, se preferirían aquellas medidas que proporcionen un mayor aumento en la métrica utilizada por cada unidad monetaria de coste inducida por la medida. Es decir, en ambos casos la evaluación de las medidas se lleva a cabo comparando el beneficio aportado por la misma, cuantificado de diversas maneras, con el coste que supone su implementación.

El coste de implementación es habitualmente sencillo de calcular, puesto que la medida implicará la construcción de infraestructuras o la implementación de servicios, cuyo coste puede ser fácilmente evaluado en base a las necesidades de capital y costes de funcionamiento. En esencia, la evaluación del coste se puede realizar como cualquier actuación en ingeniería, sin que existe ninguna peculiaridad ligada a la evaluación de cambio climático.

La evaluación de los beneficios de las medidas, sin embargo, sí que conllevan un planteamiento particular y específico ligado precisamente a la evaluación de los efectos del cambio climático. En estos casos, el beneficio de las medidas se mide a través de la reducción del riesgo que cada medida aporta, y esto tan solo puede hacerse comparando las distintas situaciones futuras con y sin medidas. Es decir, la evaluación de medidas requiere repetir el análisis climático, modificando las características del terreno y/o las infraestructuras para que reflejen la nueva situación.

Es importante tener en cuenta que este procedimiento generará una línea de situaciones futuras alternativas. Si inicialmente la evaluación del riesgo se ha llevado a cabo para dos escenarios (asumamos que el RCP4.5 y el RCP8.5) y en tres periodos horizonte (corto, medio y largo plazo), la evaluación de medidas requerirá generar otras cuantificaciones del riesgo para esos escenarios y periodos horizonte. Cada situación con medidas será comparada con la situación sin medidas, y la diferencia entre la métrica de riesgo de una y otra será el beneficio aportado por las medidas.

Por tanto, cada medida tendrá un beneficio, que podrá verse modificado tanto por el escenario considerado, como por el periodo horizonte de análisis. De esta manera, el beneficio aportado por la medida podría ir cambiando en el tiempo, y esto podría proporcionar información respecto al momento óptimo de implementación de una medida concreta.

El análisis de medidas es por tanto el paso más demandante de toda la metodología, puesto que requiere repetir la cuantificación del futuro para cada medida. Por ello, las medidas suelen agruparse, de tal forma que se reduzca el número total de simulaciones a realizar, y por tanto se ahorre tanto tiempo como esfuerzo computacional.

## 2.7 Conclusiones

El procedimiento mostrado, permite obtener una estimación o proyección de los valores de diseño a utilizar bajo distintos escenarios climáticos en diferentes periodos horizonte.

Como puede observarse en las tablas de resultados, los efectos del cambio climático en los valores máximos de precipitación diaria son diferentes dependiendo del periodo de retorno considerado. De hecho, los resultados muestran que pueden obtenerse desde disminuciones de estos máximos, para los menores periodos de retorno, hasta aumentos bastante importantes para los mayores.

Como se ha insistido a lo largo del documento, los escenarios tan solo están ordenados en severidad cuando nos referimos al forzamiento radiativo. Cualquier otra variable no guarda esta ordenación y por lo tanto, en ocasiones, escenarios menos intensos (RCP4.5) pueden dar cambios más importantes que otros más intensos en incremento del forzamiento radiativo (RCP8.5).

No ha de perderse de vista, en cualquier caso, que los extremos se están evaluando en base a series de 20 años de longitud, las obtenidas de los modelos climáticos, y por tanto, la estimación de los mayores periodos de retorno puede tener una mayor incertidumbre. Este efecto es independiente del origen de las series analizadas, es decir, que el mismo problema ocurre cuando trabajamos con series observadas.



# 3 > PILOTO 3: PROTECCIÓN CIUDADES/ INUNDACIÓN FLUVIAL

3.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático	63
3.2 Descripción general de la metodología	63
3.2.1 Evaluación del riesgo por inundación fluvial	63
3.2.2 Evaluación del riesgo de sequía urbana	78
3.2.3 Conclusiones	88



En esta sección se presenta el caso de estudio de riesgos urbanos. Los riesgos urbanos ligados a dinámicas climáticas pueden ser varios y de muy diversa índole, ya que, dependiendo de los elementos impactados y de su caracterización, podemos hablar desde afección a minorías y población desprotegida, hasta una caracterización del riesgo económico por la pérdida de servicios.

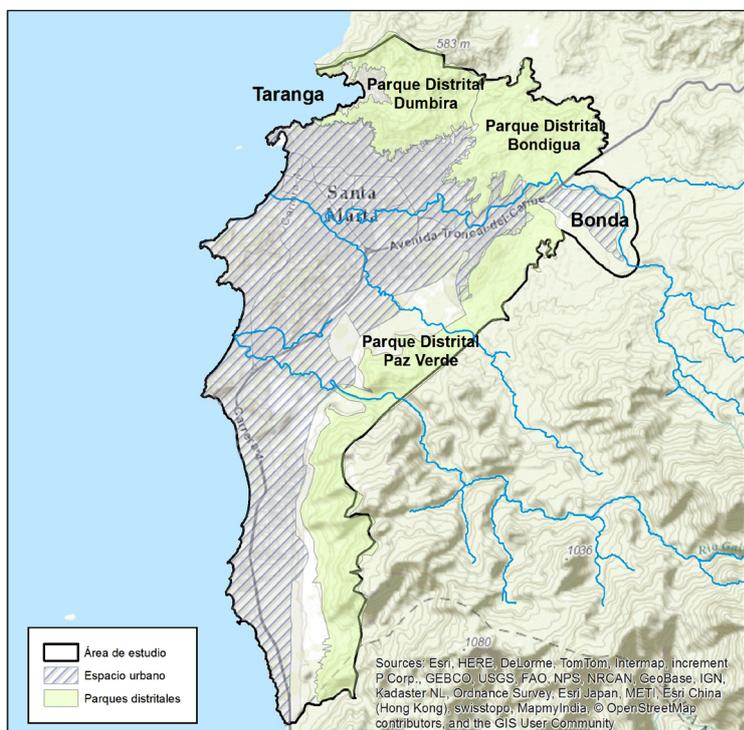
El ámbito urbano sea quizá el que mayor rango de posibilidades ofrezca a la hora de caracterizar el riesgo, ya que podemos hablar de amenazas inducidas por lluvias torrenciales, inundación fluvial, inundación costera, sequías, olas de calor, olas de frío, nieblas, huracanes y deslizamientos, entre otras amenazas. Estas peligrosidades añadidas a todos los elementos expuestos, hacen de las ciudades un campo de trabajo muy complejo donde se hace especialmente relevante formular claramente las preguntas a que se quiere responder antes de definir una metodología de trabajo.

Los impactos del cambio climático en las ciudades son cada vez más evidentes. Un aumento esperado en número e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos incrementará las pérdidas económicas y humanas, reducirá la disponibilidad de agua y la capacidad de producción y generará impactos sociales negativos significativos.

Por otra parte, la falta de una adecuada planificación urbana y rural agrava aún más el riesgo de eventos desastrosos. Según CEPAL ((224)), los costes acumulados de no reducir los impactos de eventos extremos en ALC en las próximas décadas podrían llegar a alcanzar los 250 mil millones de USD en 2100. Para exponer cómo se analiza el impacto del cambio climático en áreas urbanas y cómo mitigar los efectos, se ha escogido el Estudio de riesgo de desastres y vulnerabilidad ante el cambio climático para la ciudad de Santa Marta (Colombia).

Santa Marta es la capital del Departamento de Magdalena, situado en la vertiente atlántica de la República de Colombia. Esta ciudad cuenta con unas características geográficas singulares, por su posición junto al mar Caribe y en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, la formación montañosa litoral más alta del mundo.

Con este estudio se pretende exponer cómo identificar los principales peligros naturales que amenazan a un núcleo urbano y estimar el riesgo de desastre asociado, es decir, la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas en términos de impactos económicos y humanos. Este tipo de estudios permite a las ciudades priorizar sus inversiones para mejorar sus mecanismos de gestión de riesgo. Asimismo, los datos y mapas generados facilitan la revisión de los instrumentos de desarrollo relacionados al Ordenamiento Territorial, de forma que puedan guiar el crecimiento de la ciudad y evitar asentamientos en zonas de riesgos no mitigables.



**Figura 41:**  
Localización del caso de estudio

**Fuente:**  
elaboración propia

Este caso presenta dos metodologías completamente diferenciadas, ligadas a las dos preguntas básicas a que se pretende responder: ¿cuál es la afección inducida por las inundaciones?, y ¿cuál es la afección inducida por las sequías?. Por un lado, para el caso de las inundaciones, se ha optado por realizar una valoración del riesgo en términos cuantitativos, evaluando los impactos económicos. En contraste con este planteamiento, para el caso de la sequía, se analiza el déficit hídrico y cómo influye sobre las dotaciones de agua que permiten satisfacer las demandas de los distintos usos. En el primer caso, debido a la estandarización en el proceso de cuantificación de los impactos de sequía, se obtiene una valoración más concreta, fruto de que el impacto directo es más fácilmente de ser caracterizado. En el segundo, se lleva a cabo una aproximación más general, puesto que los impactos de la sequía son más difusos y más difícilmente cuantificables.

## 3.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático

Para analizar el impacto del cambio climático en núcleos urbanos es necesario identificar cuáles son las amenazas principales. En este caso de estudio las amenazas son las siguientes:

- Inundación de la zona urbana por lluvias locales y desbordamiento de ríos.
- Disminución del recurso hídrico y sequía urbana.

La inundación fluvial y la sequía urbana son analizadas de manera probabilista, es decir, mediante la estimación de los daños esperados por eventos de diferente probabilidad de ocurrencia, en términos de impactos económicos y humanos. En el caso de las inundaciones, el estudio analiza las tres componentes del riesgo: amenaza, exposición y vulnerabilidad.

En el caso de la sequía urbana, el estudio se centra en determinar, con sus probabilidades asociadas, los déficits hídricos de la ciudad, contemplando diversos escenarios de evolución climática, demográfica y de hábitos de consumo. Para cada uno de los dos riesgos, el análisis final se centra en definir a grandes rasgos las alternativas disponibles (tanto de infraestructuras como de carácter normativo y de gestión) para resolver hasta un nivel aceptable los problemas detectados y, en caso de que existan varias opciones, en compararlas y ordenarlas para facilitar la toma de decisiones.

## 3.2 Descripción general de la metodología

A continuación, se exponen las dos metodologías abordadas para este caso piloto: evaluación del riesgo de inundación fluvial y evaluación del riesgo de sequía.

### 3.2.1 Evaluación del riesgo por inundación fluvial

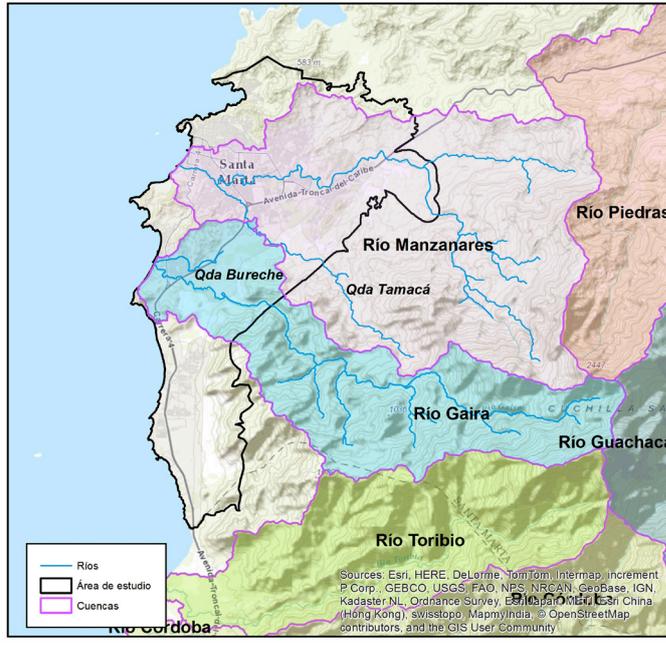
La metodología general de estudios de inundación se resume en un proceso de siete pasos:

- Caracterización hidrográfica del área de estudio.
- Recopilación de la información climática e hidrológica actual.
- Generación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (o "IDF").
- Recopilación de datos de cambio climático.
- Actualización de las curvas IDF en los periodos horizonte futuros y para los escenarios de cambio climático seleccionados.
- Estimación de los caudales en el presente y a futuro.
- Estimación de calados (tirantes de agua) y velocidades asociados a los caudales generados en el paso anterior.

#### ■ 3.2.1.1 Caracterización hidrográfica del área de estudio

El cauce principal en cuya cuenca se engloba la zona urbana de Santa Marta es el río Manzanares, donde se encuentra asentada la mayor parte de la población urbana; los estratos sociales más bajos han tomado terreno que pertenece al río Manzanares y su zona de amortiguación de crecientes, lo que no solo aumenta los riesgos de la población ante la crecida del río, sino que también afecta desde el punto de vista ambiental e hidráulico. De igual manera en la zona baja del río se ha pavimentado y construido en los humedales que constituían el parte de la zona inundable del mismo.

Esta situación se repite en el río Gaira y las quebradas Bureche y Tamacá, que también sufren inundaciones cíclicas que se han agravado en los últimos años por acciones antrópicas (recientes construcciones civiles en áreas inadecuadas y deficiente planificación urbana). Figura 42, con indicación de las cuencas vertientes a la misma y ríos principales.



➤ **Figura 42:**  
Cuencas de la zona de estudio

**Fuente:**  
elaboración propia

### ■ 3.2.1.2 Recopilación de la información climática e hidrológica actual

Para la caracterización, se ha dispuesto de información instrumental de precipitaciones máximas en 24 h y totales, proveniente de la estación pluviométrica de Minca con un registro de más de 35 años de duración. La Figura 43 muestra la localización de dicho pluviómetro, con información de la altitud (m) a la que se encuentran. La Tabla 17 incluye la localización geográfica y altitud de las mismas.

La información de esta estación ha sido proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

➤ **Tabla 17:** Nombre, localización y altitud de la estación pluviométrica utilizada en el análisis

Estación	Código	Corriente	Periodo	Coordenadas Geográficas [WGS 84]		Elevación [m]
				Longitud	Latitud	
MINCA	15010010	Gaira	1975-2014	1108N	7407W	640

➤ **Fuente:** elaboración propia



➤ **Figura 43**  
Localización de la estación pluviométrica de Minca

**Fuente:**  
elaboración propia

Se dispone de dos estaciones de aforo en el entorno del área de estudio que han sido proporcionadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), ambas estaciones con datos de caudales medios y máximos mensuales (Figura 44 y Tabla 18).



**Figura 44:** Localización de las estaciones hidrométricas Bocat Santa Marta y Minca

**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 18:** Nombre, localización y altitud de las estaciones de aforo utilizadas en el análisis

ESTACIÓN	CÓDIGO	CORRIENTE	PERIODO	COORDENADAS GEOGRÁFICAS [WGS 84]		ELEVACIÓN [M]
				LONGITUD	LATITUD	
<b>BOCAT SANTA MARTA</b>	15017060	Manzanares	1980-2014	1112N	7405W	60
<b>MINCA</b>	15017030	Gaira	1978-2014	1108N	7407W	650

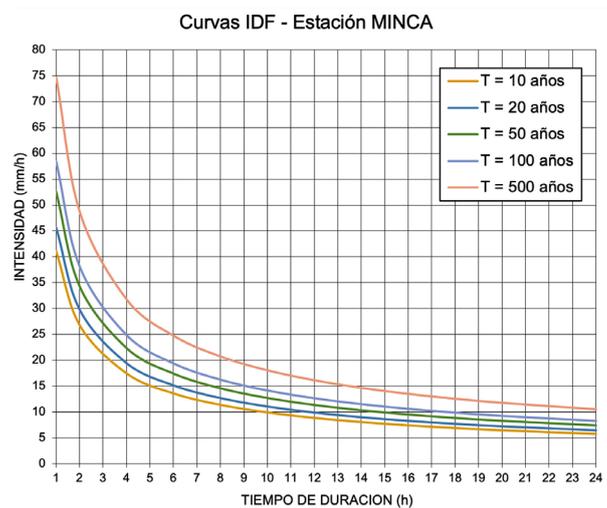
**Fuente:** elaboración propia

### ■ 3.2.1.3 Generación de las curvas IDF

La caracterización del régimen de eventos extremos de precipitación se ha realizado por medio de las curvas IDF. Estas curvas representan la relación matemática existente entre la intensidad de la precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa.

Los datos de precipitaciones de las curvas IDF proporcionadas por las autoridades locales- se han empleado para la determinación de las intensidades de precipitación asociadas a cada periodo de retorno en ese área, para la realización del cálculo de caudales mediante el modelado hidrológico y posteriormente la obtención de calados y velocidades a través del modelado hidráulico.

En la Figura 45 se muestran las curvas IDF obtenidas para los periodos de retorno de 10, 20, 50, 100 y 500 años en la estación pluviométrica de Minca.



**Figura 45:** Relaciones IDF de la estación de Minca

**Fuente:** elaboración propia

### ■ 3.2.1.4 Recopilación de datos de cambio climático

Como se comentó en otros casos pilotos, la información de cambio climático ha de ser obtenida, bien de los modelos de circulación general (GCM), cuya fuente principal de consulta sería el proyecto *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* ((45)), utilizado en el desarrollo del quinto informe del IPCC; bien de los modelos de circulación regional (RCM), que hacen uso de las simulaciones de los GCM para obtener las condiciones de contorno de simulaciones sobre mallas de mayor detalle, con modelos que incluyen mejores parametrizaciones de los procesos y que por tanto proporcionan información más exacta, cuya principal fuente de consulta sería el proyecto *CORDEX* y sus materializaciones regionales.

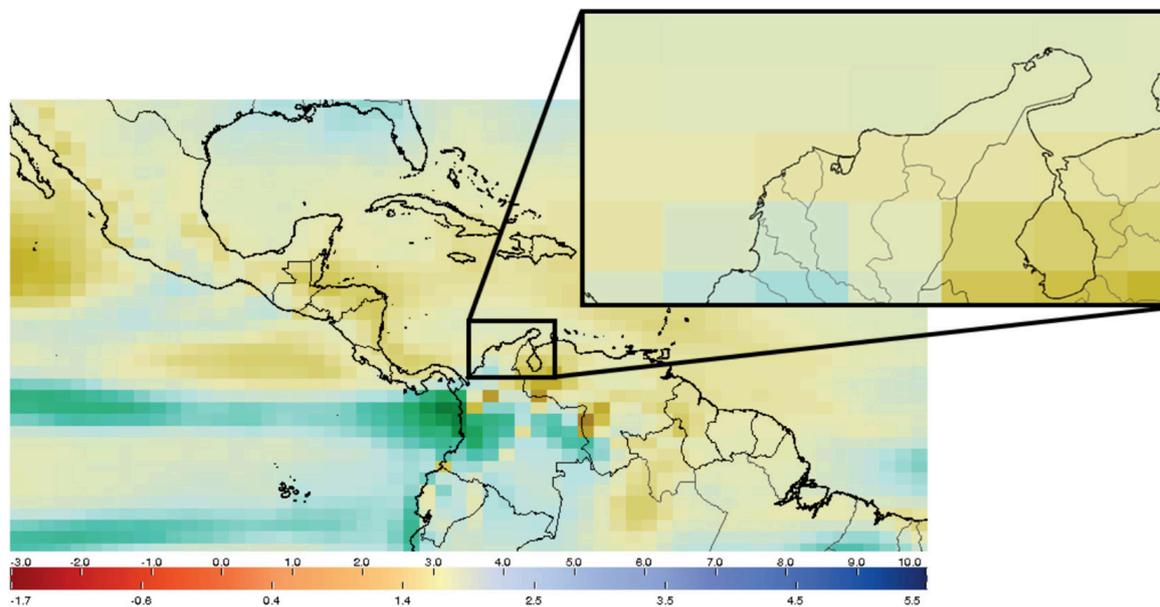
En el presente caso piloto se realiza simultáneamente un análisis multimodelo (usando múltiples GCMs) con varios escenarios climáticos, conocido habitualmente como “*ensemble*”. Este detalle es muy importante ya que el uso de un mayor número de modelos proporciona proyecciones más sólidas y además una medida de la incertidumbre (219). El “*ensemble*” utilizado incluye los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 de muchos de los modelos correspondientes CMIP5.

Los años horizonte en los que se estudian los efectos del cambio climático son el 2030 (corto plazo o “*short-term*”) y el 2050 (largo plazo o “*long-term*”). El año de referencia es el 1995, ya que la mayoría de información instrumental disponible corresponde al periodo 1975-2014 (los cambios en el clima van a ser aplicados a la información instrumental para simular el clima futuro). Para que los resultados sean consistentes el análisis se ha efectuado sobre periodos de 20 años centrados en los años de interés, es decir, los periodos horizonte corresponden al 2020-2039, para caracterizar el “*short-term*” (año 2030), y al 2040-2059 para caracterizar el “*long-term*” (año 2050). El periodo de referencia para caracterizar el clima actual es 1986-2005, que es el periodo cubierto por las observaciones utilizadas en el estudio.

Debido a la resolución espacial de los modelos climáticos globales y a cuán próximas se encuentran las estaciones entre sí, se ha utilizado la información de un único nodo de los GCMs para realizar el análisis.

Para obtener los cambios en el régimen extremal de precipitación se ha hecho uso del “*downscaling*” de la base de datos “*Global Daily Downscaled Projections*” (NEX-GDDP, (225) <https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/>). Dicha base de datos contiene 150 años simulados, desde 1950 a 2100, con una resolución espacial de 0,25 X 0,25 grados para 21 modelos del CMIP5. Los datos tienen una resolución temporal diaria.

➤ **Figura 46:** Cambio en la precipitación media anual para el periodo 2040-2059 respecto a 1986-2005 para el escenario RCP4.5



➤ **Fuente:** elaboración propia

### ■ 3.2.1.5 Actualización de las curvas IDF en los periodos horizonte futuros y para los escenarios de cambio climático seleccionados

La metodología aplicada para actualizar las curvas IDF puede descomponerse en los siguientes puntos:

- Para cada GCM, se seleccionan los nodos más cercanos a las estaciones pluviométricas utilizadas.
- Se ajusta una distribución generalizada de extremos (GEV) a los máximos anuales de la serie del GCM para los periodos 2020-2039, 2040-2059 y 1986-2005.
- A partir de las distribuciones ajustadas en el punto anterior, se calculan los periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años de precipitación.
- Para cada escenario y para cada año horizonte se calcula un “factor multiplicador”<sup>1</sup> como la media del cociente de los valores asociados a los distintos periodos de retorno futuros o periodos horizonte y los valores asociados a los periodos de retorno del periodo actual o periodo de referencia.
- Se repite este mismo proceso para cada GCM y se calcula un “factor multiplicador” medio para todos los modelos pertenecientes al mismo escenario y año horizonte.
- Por último, se multiplica las curvas IDF actuales, calculadas a partir de observaciones, por el factor multiplicador derivado de los GCMs, para calcular las curvas IDF futuras.

La Tabla 19 muestra los cambios obtenidos (factor multiplicador) en el régimen extremal de precipitación para los dos periodos horizonte sobre el periodo de referencia 1986-2005. El “factor multiplicador” será aplicado a las curvas IDF del presente para simular diferentes escenarios de cambio climático. Se puede observar una disminución en el régimen extremal de precipitación para todos los escenarios y periodos de estudio, siendo esta más pronunciada para el escenario RCP8.5 y el periodo 2040-2059. Hay que tener en cuenta que según el IPCC los cambios en el clima presente pueden llevar a grandes cambios en la frecuencia, intensidad, distribución espacial, duración y tiempo en la suceden dichos eventos y puede conducir a que se produzcan eventos extremos sin precedencia.

➤ **Tabla 19:** Resultados del análisis de cambio climático del régimen extremal de precipitación

Escenarios	Periodos	
	2020-2039	2040-2059
	Factor multiplicador	
RCP4.5	0,93	0,86
RCP8.5	0,90	0,82

➤ **Fuente:** elaboración propia

### ■ 3.2.1.6 Estimación de los caudales en el presente y a futuro

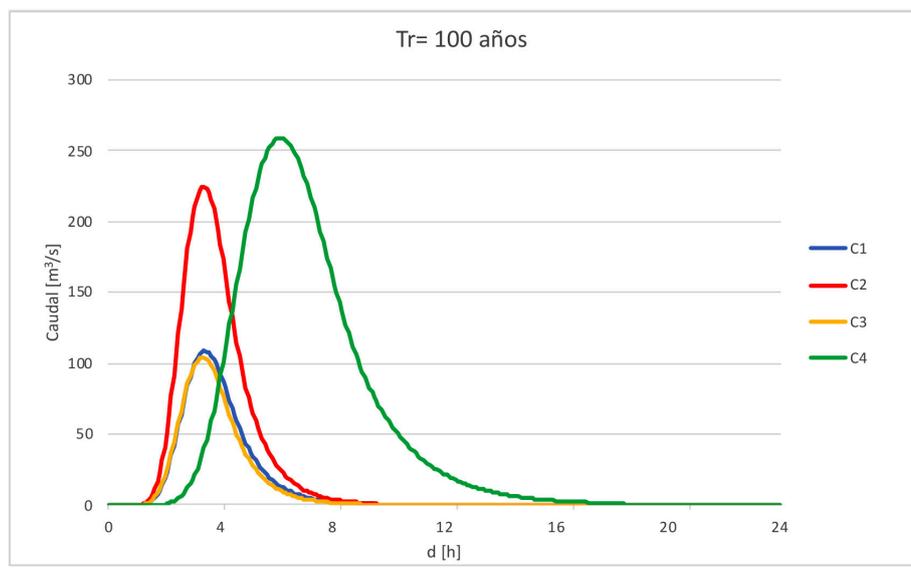
Para la determinación de los caudales de aportación en régimen natural en situación actual y en escenarios de cambio climático para los diferentes periodos de retorno, se ha empleado un modelo hidrológico, en este caso piloto fue utilizado el modelo HEC-HMS (“*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*”, (226)) desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EE.UU, ampliamente empleado para simular procesos de transformación precipitación-escorrentía en sistemas fluviales.

Los inputs de partida del modelo son las curvas IDF definidas anteriormente y las propiedades físicas y geomorfológicas de la cuenca.

Finalmente, a modo de ejemplo se presentan en la Figura 47 y en la Figura 48 los hidrogramas de diseño obtenidos para un evento de 100 años de periodo de retorno en situación actual., siendo C1, C2, C3 y C4 las subcuencas de la zona de estudio.

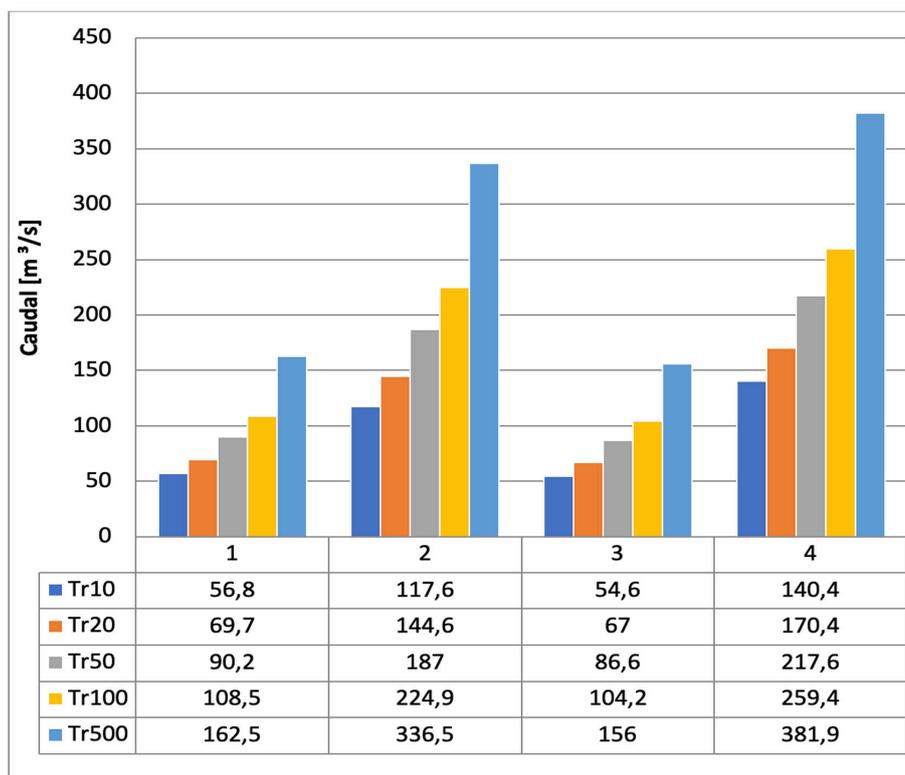
➤ <sup>1</sup> Es importante tener en cuenta que este factor multiplicador cuantifica principalmente los efectos del cambio climático, pero también está influenciado por la discretización de la información, la incertidumbre de las curvas IDF y la de los modelos de cambio climático.

Figura 47: Hidrogramas de diseño para un evento de 100 años de periodo de retorno



Fuente: elaboración propia

Figura 48: Caudales máximos en las subcuencas para diferentes periodos de retorno



Fuente: elaboración propia

### ■ 3.2.1.7 Estimación de calados y velocidades asociados a los caudales generados en el paso anterior

En los estudios de amenaza por inundaciones, tras la determinación de las precipitaciones máximas asociadas a diferentes periodos de retorno (tal y como se ha expuesto en el apartado anterior) y el cálculo de caudales, se deben obtener los calados y velocidades correspondientes a los desbordamientos causados por los caudales circulantes por los cauces obtenidos anteriormente. Para ello es necesario utilizar un modelo hidráulico, que en este caso piloto ha sido InfoWorks ICM (*Integrated Catchment Modeling*), modelo matemático bidimensional que permite calcular la hidráulica fluvial.

El primer paso en el cálculo bidimensional exige la correcta caracterización geométrica de la zona de estudio. Esto se consigue mediante la definición previa de una serie de elementos triangulares o rectangulares, que conforman la malla de cálculo. Esta malla tiene que tener una precisión suficiente para una adecuada definición de la zona de estudio y una correcta representación de las condiciones del flujo. En este sentido hay que hacer referencia, en primer lugar, a la información topográfica, que es básica para la realización del estudio y el análisis del comportamiento hidráulico.

Tras la simulación mediante el modelo hidráulico se obtienen los resultados de la inundación para los eventos de cálculo.

A modo de resumen de los resultados más destacados, en las figuras siguientes se presentan los mapas correspondientes a los valores máximos de calados y velocidades para las avenidas de 20 años de periodo.

De forma general, en la Figura 49 puede observarse como los calados en las llanuras de inundación son en su mayoría menores a 1 m encontrando solo calados pronunciados en las zonas cercanas a los cauces donde estos pueden llegar a sobrepasar los 2 m en zonas puntuales donde el terreno presenta gargantas, depresiones u otro tipo de accidente.

En cuanto a las velocidades, de forma general puede observarse que en los únicos puntos donde la velocidad sobrepasa los 1,5 m/s es en determinadas secciones del cauce de los ríos. El resto de las zonas de inundación presentan unas velocidades en torno a 0,6-0,8 m/s disminuyendo paulatinamente según nos alejamos del eje de los cauces (véase la Figura 50).

➤ **Figura 49:** Resultados de Calado (m) para T20. Vista general (escala 1:50000 en el original)



➤ **Fuente:** elaboración propia

Figura 50: Resultados de Velocidades (m/s) para T20. Vista general (escala 1:50000 en el original)



Fuente: elaboración propia

### 3.2.1.8 Exposición

El análisis de la exposición se centra en la identificación de los elementos físicos y humanos que se encuentran bajo la amenaza de inundación. Para llevar a cabo el análisis se ha establecido un umbral mínimo de calado a partir del cual se considera que puede existir algún tipo de afección.

El análisis de la exposición, tanto para la dimensión física como para la humana, se realiza para eventos de inundación con dos periodos de retorno: T10 y T100, que representan eventos de alta y baja probabilidad de ocurrencia respectivamente.

#### Exposición física

La exposición física analiza la exposición de los elementos físicos urbanos a través de la evaluación de las siguientes variables:

- En el caso de las edificaciones, la variable considerada es la superficie edificada que queda cubierta por una lámina de agua de al menos 20 cm. de profundidad. Esta profundidad se debe establecer, en cada caso específico, a partir de las condiciones locales y de los valores que se exponen.
- En el caso de las infraestructuras críticas, en el entendido que requieren mayor resiliencia al clima, tales como hospitales, estaciones de bomberos, etc., se cuantifica el número de infraestructuras y el área afectada, considerando un umbral mínimo de 50 cm. de profundidad.

Una vez identificados estos elementos, se calcula su valor económico en función de la calidad constructiva. La clasificación de calidades constructivas se basa en la relación del nivel socioeconómico de los habitantes con la calidad constructiva de las edificaciones que ocupan. Esta información, junto con un análisis de fotointerpretación y el trabajo de campo desarrollado, ha permitido definir cuatro categorías de calidad constructiva, en función del nivel socioeconómico de la población, la tipología edificatoria y el acceso a servicios de abastecimiento y saneamiento básicos. (véase el apartado de Vulnerabilidad).

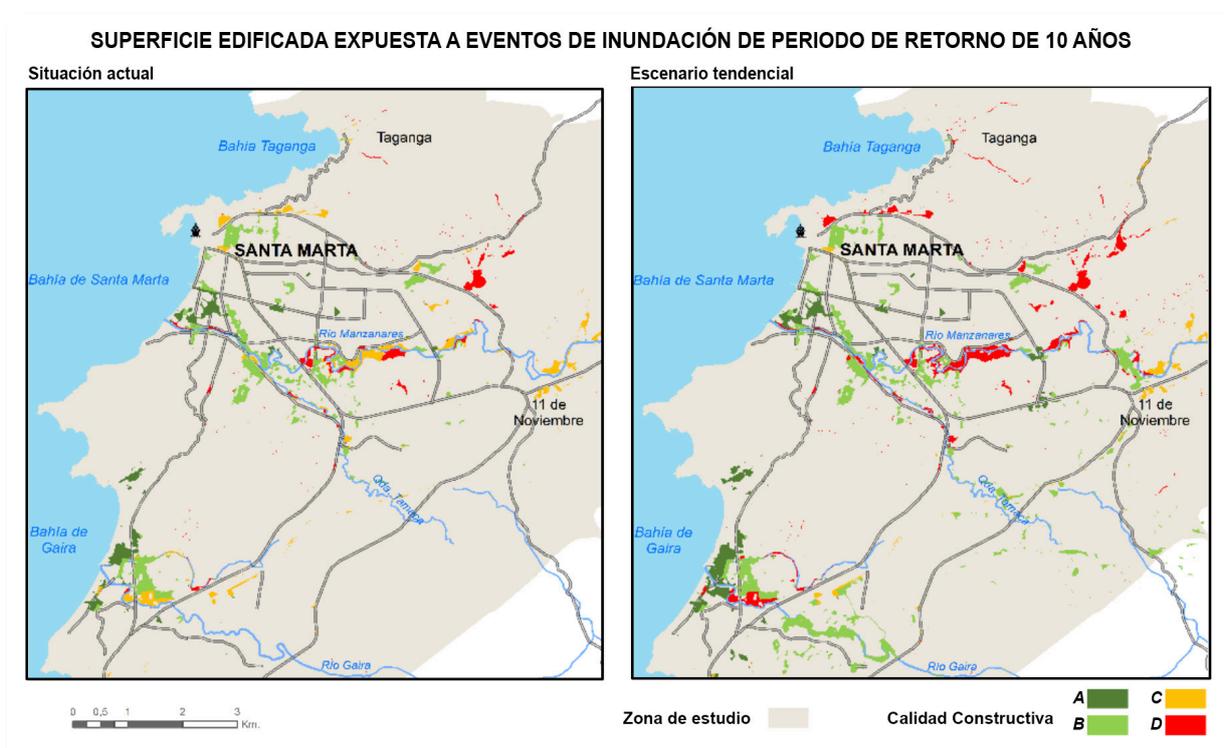
De cara a realizar el análisis de daños económicos en edificaciones debido a eventos de inundación, a cada una de estas categorías se le asigna un valor económico, que considera tres aspectos: i) el valor de la construcción, ii) el valor de las instalaciones (ej.: electricidad, fontanería) y iii) el valor del equipamiento (ej.: mobiliario, vehículos). Estos valores se han obtenido para la situación actual y para el año 2050 (escenario tendencial y escenario *smart*). Los valores económicos asignados a cada categoría se muestran en la Tabla 20.

**Tabla 20:** Valor económico de las edificaciones

Calidad constructiva	Valor económico situación actual (USD/m <sup>2</sup> )	Valor económico año 2050 (USD/m <sup>2</sup> )
A	600	1 181,46
B	517,5	1 019
C	240	472,58
D	97,5	191,99

**Fuente:** elaboración propia

**Figura 51:** Superficie edificada expuesta a eventos de inundación de periodo de retorno de 10 años. Vista general (escala 1:50000 en el original)



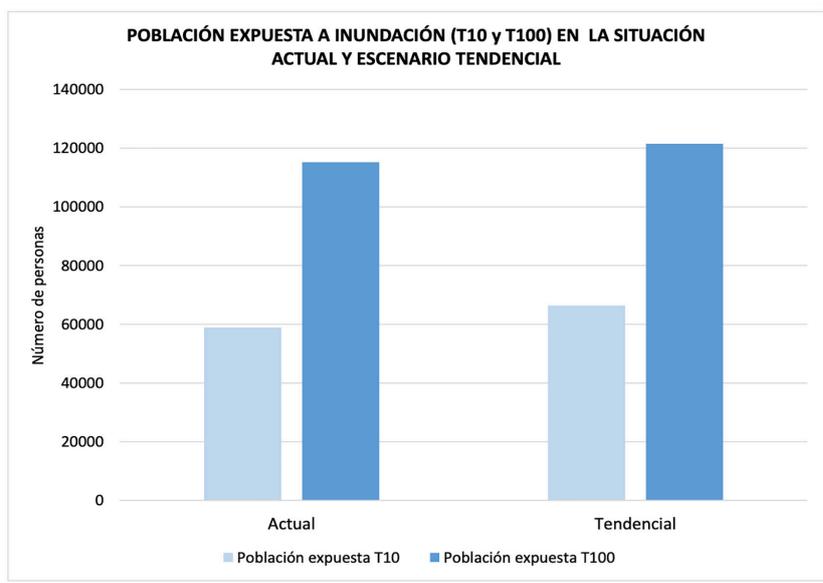
**Fuente:** elaboración propia

Como se podrá apreciar en la figura, las áreas de calidad constructiva “C” pasan a “D”, en el escenario tendencial. Esto se debe a que en este último se asume que las dinámicas siguen sin mejora, y por tanto, las edificaciones de baja calidad van a seguir empeorando y por tanto van a convertirse en las de peor calidad; es decir se debe a un simple efecto del envejecimiento. Normalmente esto es cierto en las zonas más depauperadas de las ciudades.

### Exposición humana

Considerando los datos de población de un año base, en este caso 2015 y la población proyectada para el año 2050, datos proporcionados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística. En la Figura 52 se muestra la población expuesta a inundación en la situación actual y en el escenario tendencial, para los periodos de retorno de 10 y de 100 años.

➤ **Figura 52:** Comparativa de la población expuesta para diferentes periodos de retorno en la situación actual y en el escenario tendencial



➤ **Fuente:** elaboración propia

### ■ 3.2.1.9 Vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad consiste en evaluar las características intrínsecas de los elementos expuestos que les hacen más susceptibles de sufrir los impactos negativos de la inundación. Este análisis se realiza en las dos dimensiones analizadas: (i) vulnerabilidad física (referida a los elementos físicos expuestos) y (ii) vulnerabilidad humana (referida a la población expuesta).

#### Vulnerabilidad física:

La vulnerabilidad física se representa mediante funciones de daño que relacionan la profundidad de la lámina de agua con el daño potencial sobre el elemento analizado, que dependerá de las características intrínsecas de este. Las funciones de vulnerabilidad física se han establecido considerando las definidas por las herramientas ERN-Vulnerabilidad – CAPRA (217) y HAZUS (227), adaptándolas al contexto del presente estudio según la caracterización física de la construcción analizada. Se emplean las mismas funciones de daño para los diferentes periodos de retorno y los diferentes escenarios analizados.

A continuación, se presenta el análisis de la vulnerabilidad y las funciones de daño establecidas para las edificaciones y las infraestructuras críticas.

En el caso de las **edificaciones**, las funciones de daño se definen a partir de la calidad constructiva, ya que esta considera un conjunto de variables (ej. Materiales de construcción o número de alturas) que condicionan la resistencia de una edificación ante un evento de inundación, y por tanto el impacto que se produzca sobre ella. Por tanto, se define una función de daño para cada categoría de calidad constructiva:

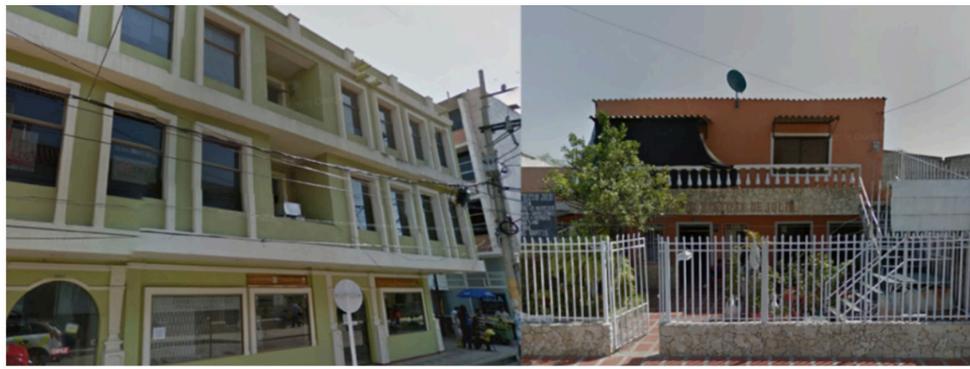
- **Categoría A** (calidad constructiva alta): las edificaciones están construidas con materiales resistentes y de gran calidad. Esta calidad constructiva es la más resistente frente a inundaciones. Se le asigna una función de daño Tipo A, basada en la función CAPRA M2 (Tabla 21, Figura 53).



➤ **Figura 53:** Ejemplo de edificaciones con calidad constructiva A

**Fuente:** IH Cantabria/  
Google streetview

- **Categoría B** (calidad constructiva media): las edificaciones están construidas con materiales permanentes, resistentes y acabados de buena calidad. Estas edificaciones serán también resistentes a los eventos de inundación. La función de daño definida es la Tipo B, basada en la función de CAPRA W2 (Tabla 21, Figura 54).



➤ **Figura 54:**  
Ejemplo de edificaciones con calidad constructiva B

**Fuente:**  
IH Cantabria/  
Google streetview

- **Categoría C** (calidad constructiva baja): las edificaciones están construidas con materiales de construcción básicos de escasa calidad: con materiales resistentes en paredes (normalmente bloque), no así en techos y/o cubiertas donde las láminas metálicas o de amianto/uralita son los materiales más utilizados. La construcción de las paredes con bloques y su localización en calles pavimentadas y con acceso a algunas infraestructuras básicas confiere a estas edificaciones cierta protección frente a inundaciones. Predominan las edificaciones de una única planta, por lo que la función CAPRA utilizada es la W1. La función de daño definida se denomina Tipo C (Tabla 21, Figura 55).



➤ **Figura 55:**  
Ejemplo de edificaciones con calidad constructiva C

**Fuente:**  
IH Cantabria/  
Google streetview

- **Categoría D** (calidad constructiva precaria): edificaciones de baja calidad constructiva que se encuentran en un hábitat precario, en zonas informales o invasiones. Predominan las edificaciones de una única planta con acceso a la vivienda directo desde las vías, no existiendo patios pavimentados a la entrada de las edificaciones, lo cual agrava la afección de las inundaciones en estas edificaciones. En este caso, la función de daño es la Tipo D y está basada en la función CAPRA T1 (Tabla 21, Figura 56).



➤ **Figura 56:**  
Ejemplo de edificaciones con calidad constructiva D

**Fuente:**  
IH Cantabria/  
Google streetview

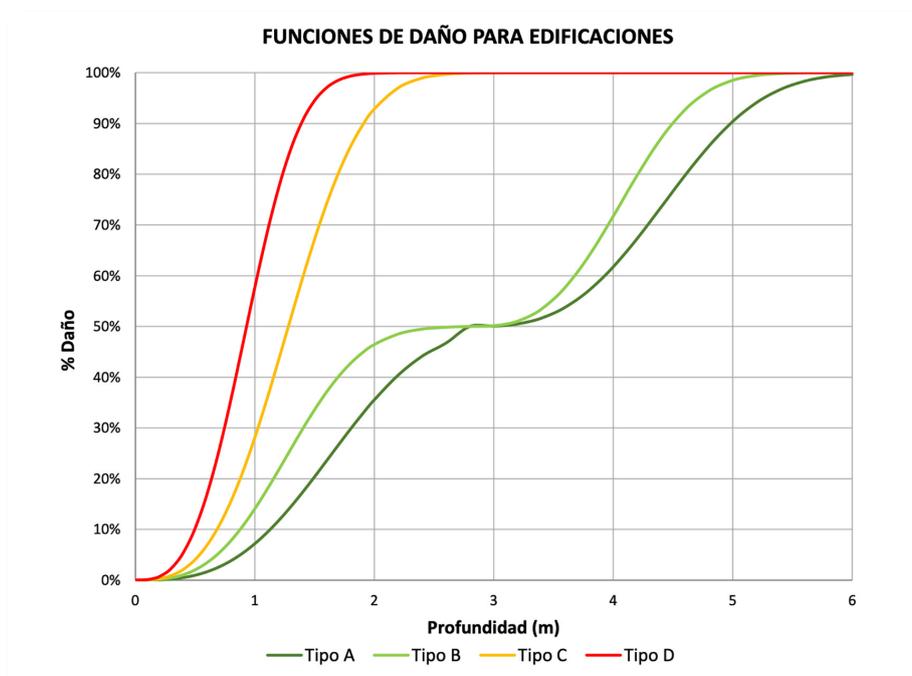
La Tabla 21 y la Figura 57 muestran las funciones de daños establecidas para las cuatro categorías de calidad constructiva.

**Tabla 21:** Funciones de daño en función de la calidad constructiva de las edificaciones (228)

Calidad constructiva	Función de daño	
Categoría A	Tipo A	SI $H < 2,8$ : Daño = $0,5 * (1 - \text{EXP}(-0,155 * H^3))$ SI $H \geq 2,8$ : Daño = $0,5 + 0,5 * (1 - \text{EXP}(-0,155 * (H - 2,8)^3))$
Categoría B	Tipo B	SI $H < 2,8$ : Daño = $0,5 * (1 - \text{EXP}(-0,33 * H^3))$ SI $H \geq 2,8$ : Daño = $0,5 + 0,5 * (1 - \text{EXP}(-0,33 * (H - 2,8)^3))$
Categoría C	Tipo C	Daño = $1 - \text{EXP}(-0,33 * H^3)$
Categoría D	Tipo D	Daño = $1 - \text{EXP}(-0,86 * H^3)$

**Fuente:** elaboración propia

**Figura 57:** Funciones de daño para calcular los riesgos de inundación



**Fuente:** elaboración propia

En el caso de las **infraestructuras críticas**, se asigna una función de daño a cada categoría de infraestructura crítica, agrupadas por su tipología y tipo de servicios que provén (Tabla 22).

➤ **Tabla 22:** Funciones de daño para las diferentes categorías de infraestructuras críticas

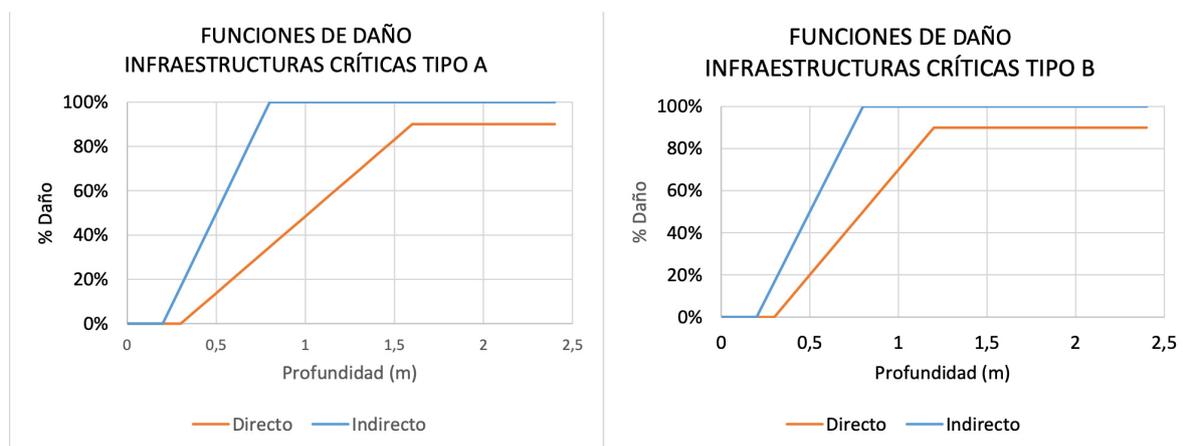
Categoría	Tipo de función de daño de Infraestructuras críticas
Abastecimiento	Tipo A
Saneamiento	
Servicios urbanos y educación	Tipo B
Salud	
Comercial	
Energía	Tipo C
Industrial	
Transporte y comunicaciones	Tipo D

➤ **Fuente:** elaboración propia

Para cada tipo de función de daño, se asignan dos funciones de daño (Figura 58 y Figura 59):

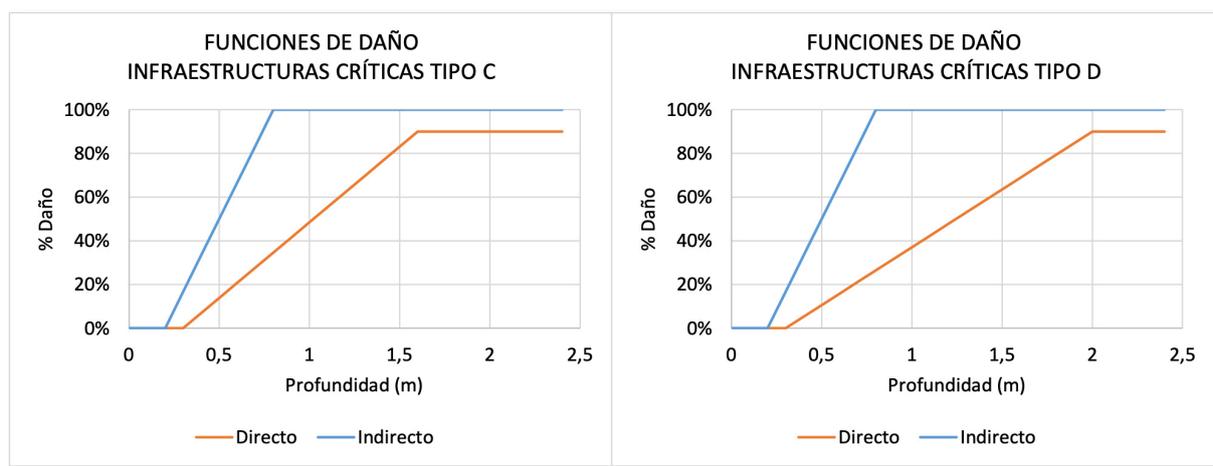
- Funciones de daño que permiten valorar los **daños directos**, asociados a la afección de la propia infraestructura crítica. A partir de estas funciones, es posible cuantificar los costes de la infraestructura crítica.
- Funciones de daño que permiten valorar los **daños indirectos**, asociados a la pérdida de servicio. A partir de estas funciones, es posible cuantificar los costes derivados de la no funcionalidad de la infraestructura crítica.

➤ **Figura 58:** Funciones de daño para infraestructuras críticas de tipo A y B



➤ **Fuente:** elaboración propia

➤ **Figura 59:** Funciones de daño para infraestructuras críticas de tipo C y D



➤ **Fuente:** elaboración propia

Estas funciones de daño en infraestructuras críticas representan adecuadamente la relación entre el incremento de calado (tirante de agua) y el daño producido, pudiéndose identificar tres tramos principales en cada función: un primer tramo en el que se establece un umbral mínimo de inundación a partir del cual se empiezan a producir daños; a continuación, un tramo en que el daño aumenta proporcionalmente con el calado; y por último, para calados elevados, se define un punto de daño máximo a partir del cual, aunque aumente la profundidad, el incremento de daño en la infraestructura es despreciable.

#### Vulnerabilidad humana:

El análisis de la vulnerabilidad humana se centra en comprender las características intrínsecas de la población que incrementan o disminuyen la susceptibilidad a sufrir el impacto.

En el presente estudio se han considerado características socioeconómicas, como el estrato socioeconómico al que pertenecen las personas, y factores asociados a la capacidad de evacuación temprana de la zona afectada.

En este sentido, se ha estimado que un 1% de la población no puede acceder a un refugio o sitio elevado durante los eventos de inundación. Este valor se ha considerado para la evaluación del riesgo humano, que se ha realizado a través de la fórmula propuesta por (229) *a new method is proposed for the estimation of loss of life caused by the flooding of low-lying areas protected by flood defences. An estimate of the loss of life due to a flood event can be given based on:* (1 que relaciona la mortalidad con el calado (h) ya velocidad (v).

El factor, que toma valores entre 0-1, multiplica al 1% de la población que se estima que no puede acceder a refugio o sitio elevado, haciendo que dicho porcentaje se mantenga en el valor del 1%, o que pueda incluso reducirse hasta el valor 0%.

### ■ 3.2.1.10 Riesgo

Como se ha visto a lo largo de este apartado las herramientas que nos permiten cuantificar el riesgo de una inundación se basan en el cálculo de su probabilidad y consecuencias, combinando la elaboración de mapas de peligrosidad y riesgo y la estimación de las consecuencias de la inundación. El riesgo de inundación debe definirse para un área que depende del nivel de detalle del estudio. En cada área, se obtiene la probabilidad de inundación dado un determinado calado y se estiman las consecuencias asociadas a dicha profundidad del agua. La suma de los productos resultantes de probabilidad y consecuencias para cada evento da lugar al riesgo total en el área de estudio.

El cálculo del riesgo de inundación fluvial comienza con la cuantificación de los daños causados por las amenazas evaluadas, seguido de la determinación de ocurrencia de dicha amenaza. Es necesario expresar los daños económicos en edificaciones e infraestructuras críticas, así como en la vertiente humana, expresada en número de fallecidos, refugiados y afectados tanto en la situación actual como en los escenarios de cambio climático.

#### **Daños económicos por inundación en edificaciones:**

Los daños económicos directos en las edificaciones del área de estudio, debidos a una inundación se obtienen aplicando las curvas de vulnerabilidad descritas en las diferentes tipologías de viviendas, teniendo en cuenta el calado alcanzado por los eventos de distinto periodo de retorno. Con estos valores, se estima un valor anualizado medio de dichos daños.

#### **Daños económicos por inundación en infraestructuras críticas:**

Los daños anteriores se refieren a edificios de uso privado, pero la inundación también afecta a edificios y a infraestructuras de carácter público. Para estas infraestructuras críticas (IC), clasificadas en seis categorías o subsistemas urbanos, se evalúan tres tipos de afectaciones:

- Daños económicos directos. Son el equivalente a los daños en edificaciones, pero aplicados a infraestructuras públicas.
- Capacidad afectada. Para calcular los daños indirectos, se estiman la merma de capacidad que una inundación genera en cada uno de los subsistemas críticos analizados. Se emplean para ello un conjunto de curvas de funcionalidad, descritas anteriormente, que relacionan los calados de agua con la pérdida de servicio que conllevan.
- Daños económicos indirectos. Tratan de recoger, mediante precios sombra, el daño económico derivado de la interrupción de un servicio al que cada infraestructura crítica está ligado.

#### **Evaluación de daños humanos por inundación:**

Se obtienen tres indicadores de daños humanos debidos a inundaciones en Santa Marta:

- Número de fallecidos y heridos graves.
- Número de afectados: aquellas personas censadas en zonas cuyo calado asociado a un evento dado es superior a 0,2 m.
- Número de personas con necesidad de refugio de largo periodo: se calcula a partir del número de personas censadas en viviendas que sufren colapso por efecto de las inundaciones.

### ■ 3.2.1.11 Evaluación de medidas

De forma general las medidas para reducir el riesgo ante un evento de inundación fluvial en un núcleo urbano se dividen en dos grandes categorías: medidas estructurales, en las que se propone la actuación mediante una infraestructura rígida que confiera un incremento de capacidad a la red hidráulica existente y, por otro lado, medidas no estructurales o de carácter blando, que comprenden un grupo variado de medidas de preparación y prevención.

#### **Medidas de carácter no estructural:**

Estas medidas requieren del apoyo de diferentes actores públicos (Protección civil, Alcaldía, Planeación...) y la necesidad de estudios y desarrollos de ámbito más local. Por dicha razón en el actual estudio se cuantifica de forma general un monto de USD 500.000 para su futuro desarrollo, sin menospreciar la valía y efectividad de las mismas.

- Mejora hidro-forestal de la cuenca media y alta de los ríos.
- Elaboración de un sistema de alerta temprana.
- Información a la población potencialmente afectada por eventos de inundación.
- Fomento de los seguros frente a riesgos naturales.

### Medidas de carácter estructural:

La mitigación de la amenaza en cauces para un escenario futuro se estructura generalmente a partir de actuaciones de definición de corredores fluviales que protejan zonas urbanas y restrinjan los usos y la ocupación de las áreas de influencia de los cauces en grandes avenidas; asimismo la modificación y/o consolidación de los límites de estos corredores posibilitaría la recuperación para el desarrollo urbano de terrenos actualmente inundables.

Otro aspecto muy importante para evitar inundaciones es controlar las áreas de la ciudad que carecen de una red de drenaje de aguas pluviales bien desarrollada, donde la propia escorrentía urbana origina situaciones de inundación local en puntos bajos. Las medidas de mitigación, en este caso, se deben orientar a facilitar el paso del agua garantizando la continuidad de la red de pluviales acelerando su evacuación de las zonas de acumulación.

- Restauración fluvial.
- Modificación de la red de aguas pluviales.

Para realizar la selección de las medidas más óptimas es necesario realizar un análisis coste-beneficio. Los pasos para seguir son los siguientes:

1. Estimación del coste económico de las actuaciones.
2. Evaluación de la amenaza por inundación aplicando estas medidas en el período actual y en los escenarios de cambio climático.
3. Análisis de la exposición para cada una de las medidas.
4. Evaluación de los daños económicos y humanos por inundación.

Una vez que se tienen todos los datos anteriormente descritos se realiza el análisis coste beneficio. Se considera que este análisis, basado únicamente en costes y beneficios de tipo económico directo, no refleja completamente la utilidad de las obras propuestas para el núcleo urbano, y las mejoras que se conseguirían en otros aspectos más difíciles de monitorizar, pero no por ello menos relevantes:

- Reducción drástica de los daños humanos y en términos de salud pública.
- Aumento del valor del suelo por consolidación de zonas actualmente inundables.
- Reducción de los daños indirectos en actividades comerciales, industriales, tráfico, etc.
- Consolidación de la actividad turística y efecto llamada por mejora de los servicios públicos y el entorno urbano.

## 3.2.2 Evaluación del riesgo de sequía urbana

La metodología general de estudios de sequía se resume en los siguientes pasos:

1. Análisis general del sistema de abastecimiento de agua del área metropolitana del núcleo urbano de estudio.
2. Análisis de recursos disponibles.
3. Análisis de demandas y del balance hídrico.

### ■ 3.2.2.1. Análisis general del sistema de abastecimiento de agua del área metropolitana del núcleo urbano de estudio

El sistema de abastecimiento de la ciudad de Santa Marta es administrado por la empresa Metroagua S.A. E.S.P. desde 1989. Reporta un total de 98 600 suscriptores alcanzando una cobertura del servicio de acueducto del 89%, pero con dificultades para garantizar su continuidad por un crecimiento acelerado de la ciudad, ocasionado por población desplazada, ubicada en asentamientos, con un sistema de distribución deficiente y conectada de manera irregular. Esta situación origina unas pérdidas altas al sistema.

Los estudios de población y demanda estiman que tiene un censo total de 105 984 viviendas, que demanda un caudal total de unos 1800 litros por segundo. Se estiman unas pérdidas en la red de entre 30% y 40%, según el tratamiento que se dé a las conexiones ilegales (que son agua no contabilizada, pero sí utilizada para consumo, y que por tanto satisface una demanda). Las dotaciones finales unitarias se sitúan entre 180 y 210 litros por persona y día.

El sistema de acueducto de la ciudad de Santa Marta se encuentra dividido en dos zonas (Norte y Sur), cada una de las cuales constituye un sistema hidráulico independiente. Esto es debido a que el territorio local se encuentra dividido naturalmente por el cerro El Ziruma, que separa a la ciudad de Santa Marta del sector turístico de El Rodadero.

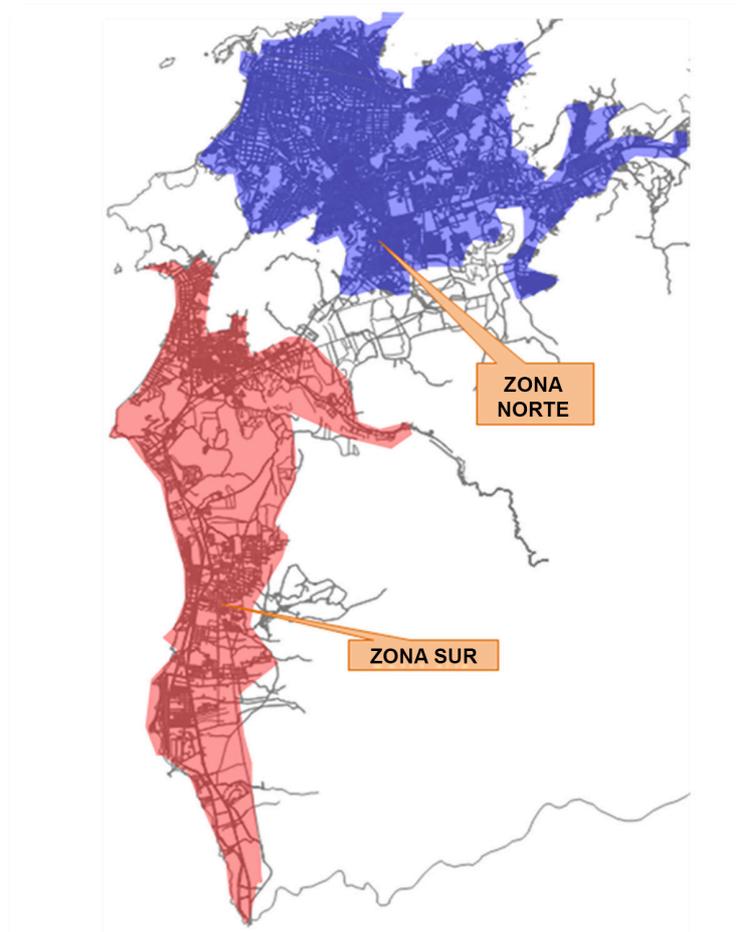
La Zona Norte está constituida por la ciudad de Santa Marta y los corregimientos de Taganga y Bonda, y la Zona Sur corresponde a una zona de desarrollo turístico, conformada por El Rodadero, Gaira, Salguero, Bello Horizonte, pasando por el aeropuerto y extendiéndose hasta el límite sur del Distrito (quebrada del Doctor), en un sector denominado Los Alcatraces.

Hoy en día el sistema de acueducto de la ciudad es abastecido por tres fuentes superficiales, de las cuales dos abastecen la Zona Norte: Río Piedras y Río Manzanares, y la Zona Sur es abastecida por el Río Gaira, el cual es una de las fuentes que mantiene el caudal constante la mayor parte del año (Figura 60). El sistema cuenta con dos plantas de tratamiento de agua potable - la PTAP de Mamatoco la cual abastece a un 45% de la ciudad y la PTAP de El Roble.

Es sistema cuenta también con un sistema de acuíferos ubicados en la ciudad Santa Marta y en el corregimiento de Gaira, cuyas fuentes de recarga principal son los ríos Manzanares, Quebrada Tamacá y Río Gaira. El agua subterránea es captada mediante una treintena de pozos profundos, que abastecen a más del 50% de la ciudad en época de verano.

La cobertura de la red de distribución de agua potable aumentó considerablemente en la última década, en la que pasó de estar en un 49,5% a un 90%. Las redes cuentan con unos 890 km de tuberías con tamaños que varían entre 1 y 36".

**Figura 60:** Zonas en las que se divide el sistema de acueducto de la ciudad de Santa Marta



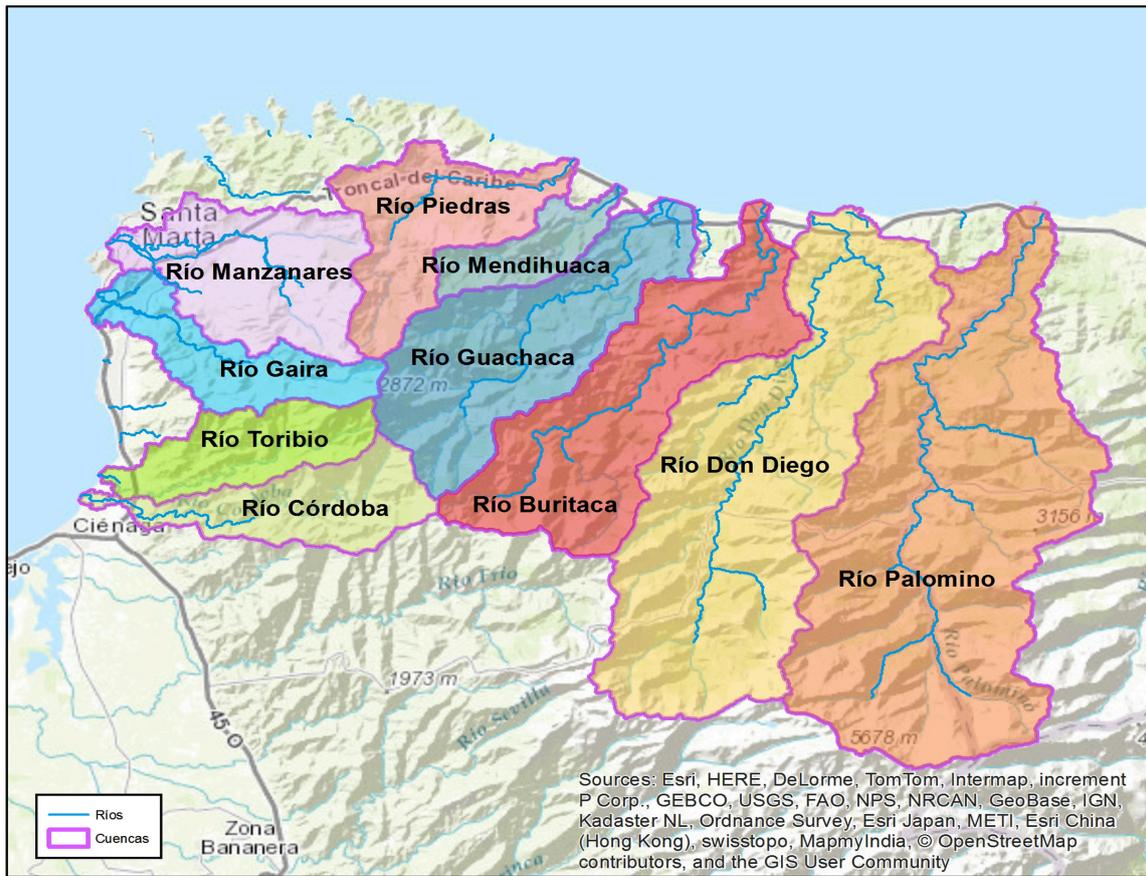
Fuente: METROAGUA.

### 3.2.2.2 Análisis de recursos disponibles y demandas hídricas

#### Estimación de caudales fluyentes en los ríos cercanos:

Se han evaluado los recursos hídricos disponibles en los ríos de las vertientes noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta (Figura 60), a partir de los datos de precipitaciones proporcionados por el IDEAM y las características de las cuencas. También se ha contado como información puntual con los datos de los aforos medidos en días sueltos del primer trimestre de 2016 por Corpamag. Tras un análisis preliminar de los datos de aforo disponibles en estos ríos, se han identificado algunas inconsistencias en los mismos, por lo que se ha optado por descartar los datos de dos de las cuencas: Buritaca y Manzanares. En estas dos cuencas, al igual que en las de los ríos Toribio y Córdoba donde no se dispone de datos, los caudales han sido estimados por extrapolación de las cuencas más cercanas con información. En las cuencas con datos, se ha ajustado un modelo hidrológico agregado, y dicho modelo ha sido empleado para extrapolar a otras cuencas y para proyectar los caudales futuros bajo condiciones de cambio climático. Además, de estas cuencas relativamente menores, a unos 100 km de Santa Marta por tierra se encuentra el tramo final del río Magdalena, uno de los mayores ríos del país, y en cuya cuenca se ubica un 80% de la población.

Figura 61: Principales cuencas en la zona de Santa Marta



Fuente: elaboración propia

La Tabla 23 resume las estimaciones obtenidas de los caudales fluyentes para el clima actual en situación de estiaje severo (probabilidad de superación del 99% del tiempo). Los caudales de mantenimiento o ecológicos considerados equivalen a un 10% del caudal medio interanual, y de la resta del caudal mínimo fluyente y el caudal de mantenimiento resulta el caudal disponible (última columna de la Tabla 23). Se observa que los únicos ríos que muestran disponibilidad a efectos prácticos son cuatro: Guachaca, Buritaca, Don Diego y Palomino. En conjunto, el caudal mínimo disponible procedente de los ríos de la vertiente norte asciende a unos 9,7 m<sup>3</sup>/s.

➤ **Tabla 23:** Estimación de aportaciones totales y disponibles en los ríos cercanos (Sierra Nevada) en situación de diseño. Clima actual

Corriente	Qmin (m <sup>3</sup> /s)	Qecol (m <sup>3</sup> /s)	Qdisp (m <sup>3</sup> /s)
Gaira	0,46	0,54	0,00
Piedras	0,38	0,46	0,00
Guachaca	2,61	1,60	1,01
Palomino	5,13	2,56	2,57
Don Diego	8,01	3,84	4,17
Buritaca	3,94	2,08	1,86
Mendihuaca	0,27	0,17	0,10
Manzanares	0,61	0,71	0,00
Toribio	0,49	0,49	0,00
Córdoba	0,57	0,57	0,00

**Qmin:** caudal mínimo (caudal mínimo fluyente por el río).

**Qecol =** caudal ecológico (o caudal de mantenimiento, es el agua necesaria para preservar los valores ecológicos en el cauce y que equivale en este caso a un 10% del caudal medio interanual).

**Qdisp =** caudal disponible (es la diferencia entre el caudal mínimo fluyente y el caudal ecológico).

➤ **Fuente:** elaboración propia

Atendiendo a las previsiones regionales de cambio climático, se estima que para el escenario 2050 puede darse una reducción de entre el 25 y el 35% en las precipitaciones, sobre todo en los ríos de la vertiente norte. La Tabla 24 muestra los resultados obtenidos para el escenario de cambio climático. Se comprueba que el cambio climático podría producir una reducción importante de los caudales disponibles, que obviamente afecta a los mismos cuatro ríos con excedente; no obstante, los cuatro seguirían proporcionando un excedente de agua incluso en condiciones de clima menos lluvioso. Todos los caudales proporcionados corresponden al régimen natural en los puntos de captación, y no reflejan el efecto de posibles detracciones aguas arriba.

➤ **Tabla 24:** Estimación de aportaciones totales y disponibles en los ríos cercanos (Sierra Nevada) en situación de diseño. Clima futuro (2050)

Corriente	Qmin (m <sup>3</sup> /s)	Qecol (m <sup>3</sup> /s)	Qdisp (m <sup>3</sup> /s)
Gaira	0,42	0,37	0,06
Piedras	0,27	0,24	0,03
Guachaca	2,14	0,88	1,26
Palomino	2,51	0,99	1,52
Don Diego	5,26	2,51	2,75
Buritaca	2,79	1,34	1,45
Mendihuaca	0,19	0,09	0,10
Manzanares	0,58	0,57	0,01
Toribio	0,44	0,39	0,06
Córdoba	0,51	0,45	0,06

**Qmin:** caudal mínimo (caudal mínimo fluyente por el río).

**Qecol =** caudal ecológico (o caudal de mantenimiento, es el agua necesaria para preservar los valores ecológicos en el cauce y que equivale en este caso a un 10% del caudal medio interanual).

**Qdisp =** caudal disponible (es la diferencia entre el caudal mínimo fluyente y el caudal ecológico).

➤ **Fuente:** elaboración propia

En conclusión, a la vista de la información disponible y de las predicciones locales de cambio climático, que apuntan hacia reducciones muy severas en las precipitaciones, el río del sistema de la Sierra Nevada que presenta un mayor excedente de recursos hídricos en su desembocadura para el horizonte 2050 en todos los escenarios, respetando el caudal de mantenimiento, es el río Don Diego. En particular, se ha estimado que su caudal disponible en un periodo seco correspondiente a dicho horizonte asciende a 2,75 m³/s. Por encima de este valor, se requerirían otras fuentes, traer el agua del río Magdalena, o bien recurrir a procedimientos no convencionales como la desalación.

**Disponibilidad de recursos subterráneos renovables:**

Existe un estudio detallado del comportamiento del acuífero costero de Santa Marta, incluido en el informe realizado en 2014 por la Universidad de los Andes. En dicho informe se llega a la siguiente conclusión:

*“Actualmente (2015) el rendimiento seguro (medio anual) del acuífero se calcula entre 250 y 400 l/s, de los cuales la recarga natural superficial en el acuífero es del orden de 30 l/s (70 mm/año) y el resto lo proveen los cauces superficiales. Si se extrae agua del acuífero únicamente en épocas de verano, dejándolo recargar en épocas de invierno, el caudal aprovechable es del orden de 500 a 600 l/s.”*

Por lo tanto, a efectos de este trabajo, se adoptará como recurso subterráneo renovable la cifra de 0,5 m³/s, que solo se empleará en las épocas de sequía, cuando los ríos no dispongan del caudal suficiente. Se considera que el mantenimiento de unos caudales mínimos fluyentes en los ríos fomenta la recarga del acuífero, lo que permitirá que en los periodos críticos pueda aportar el caudal citado sin producirse sobreexplotación.

**3.2.2.3 Análisis de demandas y del balance hídrico**

**Evolución de las demandas:**

Con el fin de cuantificar el déficit hídrico de la ciudad de Santa Marta a futuro, es necesario proyectar tanto las variables climáticas, que condicionan la disponibilidad del recurso, como las variables demográficas y socioeconómicas que determinarán la calidad del sistema de abastecimiento y la conducta de los usuarios. Para la primera proyección están disponibles los resultados procedentes del IPCC, particularizados para esta zona, así como otros estudios regionales realizados.

Asimismo, la proyección demográfica prevé las siguientes cifras de viviendas totales en Santa Marta:

➤ **Tabla 25:** Estimación del número de viviendas

Actual	2030	2050
105 984 viviendas	153 972 viviendas	235 829 viviendas

➤ **Fuente:** elaboración propia

Estas cifras de viviendas totales incluyen la parte proporcional de edificios de oficina, hoteles y locales comerciales, pero no las áreas industriales, que se consideran aparte. Las otras dos variables que determinan las necesidades de agua bruta son:

- Tasa de pérdidas de la red de abastecimiento. Depende fundamentalmente del estado de conservación y nivel de mantenimiento de la red, y en definitiva del modelo de gestión y explotación vigente, incluyendo los incentivos que existan para la mejora continua y la reducción de costes de operación. Las conexiones ilegales colaboran a aumentar las pérdidas (puesto que en este tipo de conexiones se tiende a desperdiciar más agua por tener coste cero).
- Dotación de agua por vivienda. Es la necesidad media de agua por vivienda y día, medida en la acometida doméstica, y que refleja los usos domésticos y potencialmente comerciales (oficinas). La disposición de la sociedad e instituciones públicas o privadas para fomentar el ahorro de agua tiene gran incidencia en la dotación final.

Para cuantificar estas variables, que tendrán un impacto significativo en las cifras de déficit, y atender la incertidumbre asociada a los escenarios de crecimiento con soluciones de abastecimiento a largo plazo, se han establecido tres hipótesis de desarrollo futuro en función de la demanda hídrica:

- **Hipótesis de baja demanda.** Desarrollo con gran reducción en pérdidas y dotación. La empresa de abastecimiento aplica herramientas y criterios de gestión de países plenamente desarrollados; se aplican tarifas progresivas y se pone en marcha un plan de gestión de fugas y de eliminación de las conexiones ilegales. Los consumidores otorgan un valor alto al agua, que se emplea en la medida estrictamente necesaria, y perciben un esfuerzo colectivo por preservarla y sacar el mayor partido de ella.

- **Hipótesis de demanda moderada.** Desarrollo mixto con reducción moderada en pérdidas y dotación. La empresa de abastecimiento adopta algunas medidas, aunque sin alcanzar estándares de los países más desarrollados, para mejorar la eficiencia de la red. Los consumidores otorgan un mayor valor al agua que en la actualidad, pero sigue existiendo un amplio sector de la población que se conecta de manera ilegal y, lo que es peor, no se preocupa por el agua desperdiciada.
- **Hipótesis de alta demanda hídrica.** Se mantienen los parámetros de pérdidas registrados en la última década. Se considera un ratio de seguridad asociado a la incertidumbre en el comportamiento de consumo, especialmente en el sector turístico.

Las cifras de dotación neta por vivienda y pérdidas totales en la red (incluyendo pérdidas en la aducción, tratamiento, red en baja y conexiones domiciliarias) que se han adoptado para las tres hipótesis de demandas definidas, son las reflejadas en las Tabla 26 y Tabla 27.

➤ **Tabla 26:** Dotaciones medias de abastecimiento por vivienda en litros por vivienda y día (l/viv-día, en función de la hipótesis de evolución y el año horizonte

Dotaciones (l/viv-día)	Actual	2030	2050
Baja demanda	1006	696	473
Demanda moderada	1006	783	631
Alta demanda	1006	870	789

➤ **Fuente:** elaboración propia

➤ **Tabla 27:** Pérdidas medias en la red, en función de la hipótesis de evolución y el año horizonte

Pérdidas totales (%)	Actual	2030	2050
Baja demanda	35%	25%	15%
Demanda moderada	35%	30%	25%
Alta demanda	35%	35%	35%

➤ **Fuente:** elaboración propia

Nótese que la hipótesis de baja demanda no se corresponde con un escenario óptimo idealizado sino realista, aunque propio de ciudades con alto nivel de eficiencia en el uso del agua; en ningún caso se han establecido valores que no hayan sido alcanzados, y muchas veces superados, en ciudades de características similares, aunque si alejadas de la realidad colombiana. De la misma forma, la hipótesis de alta demanda representa una evolución posible y realista, podría considerar una hipótesis aún con mayor demanda ya que los valores de 1006 l/viv-d y 35% de pérdidas bien podrían deteriorarse, en lugar de mantenerse estables y la presión demográfica crecer de forma más acelerada. En cualquier caso, se considera que con estas tres hipótesis se representan bandas de confianza representativas de la mayor parte de las evoluciones probables del sistema.

En cuanto a los consumos industriales, el estudio de crecimiento urbano aporta las siguientes superficies industriales, en función del escenario de evolución:

➤ **Tabla 28:** Superficie industrial estimada en hectáreas (ha)

ESCENARIO	Superficie (ha)
Actual	276
Tendencial 2050	331
Intermedio 2050	307

➤ **Fuente:** elaboración propia

Asimismo, se han adoptado las siguientes dotaciones industriales medias para todos los años horizonte, teniendo en cuenta que Santa Marta no es una ciudad con gran actividad industrial, y las principales actividades son de logística ligada al Puerto, con necesidades de agua moderados, lo que se refleja en las dotaciones industriales estimadas de la Tabla 29.

**Tabla 29:** Dotaciones industriales por hipótesis de demanda, en litros por segundo y hectárea (l/s·ha)

Hipótesis	Dotación (l/s·ha)
Baja demanda	0,2
Demanda moderada	0,5
Alta demanda	1

**Fuente:** elaboración propia

Sumando las demandas urbanas e industriales, y aplicando las pérdidas correspondientes en la red, resultan las necesidades de agua en temporada alta en Santa Marta que se reflejan en la Tabla 29 y Tabla 30.

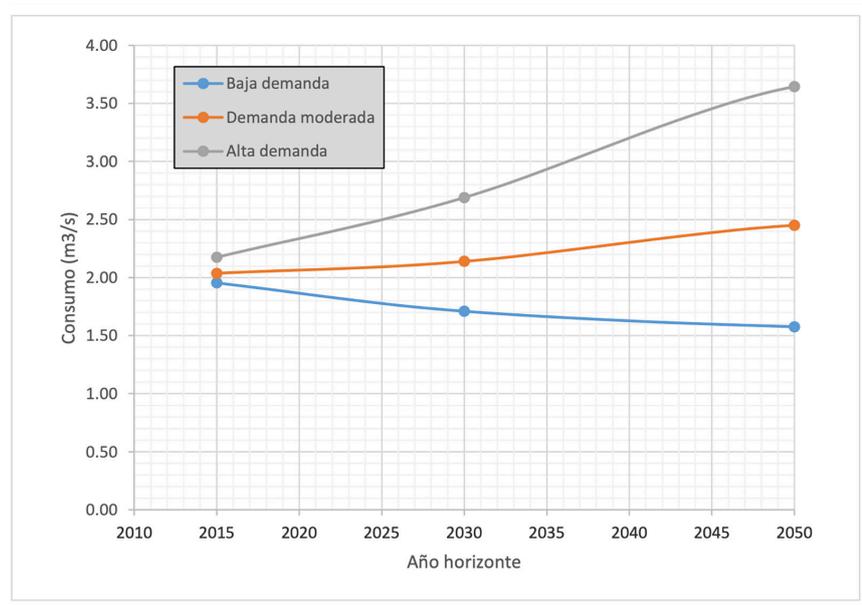
**Tabla 30:** Necesidades totales de agua bruta en situación de diseño, en función de la hipótesis de demanda y el año horizonte (m<sup>3</sup>/s)

Hipótesis	2015	2030	2050
Baja demanda	2,04	1,71	1,58
Demanda moderada	2,04	2,14	2,45
Alta demanda	2,04	2,69	3,64

**Fuente:** elaboración propia

En la actualidad y temporada alta, Santa Marta requiere en torno a 2 m<sup>3</sup>/s, lo equivale a 172.800 m<sup>3</sup> por día. En la hipótesis de bajo consumo, la ciudad podría consumir en 2050 un 20% menos del agua que requiere en la actualidad, mientras que en la de alta demanda, el consumo diario punta aumentaría en un 80%.

**Figura 62:** Evolución de las necesidades de agua bruta en función de las hipótesis de evolución de las demandas



**Fuente:** elaboración propia

**Balance hídrico en los escenarios considerados:**

El balance hídrico que resulta de combinar los recursos disponibles y las demandas descritas en los apartados previos es directo, ya que ninguno de los ríos de los que se toma agua en la actualidad (Manzanares, Piedras y Gaira) tiene caudal disponible en periodo seco, asumiendo que se respetan los caudales de mantenimiento, que además coadyuvan a la renovación del acuífero. Por lo tanto, el déficit actual resulta de sustraer a las demandas brutas de agua estimadas el caudal subterráneo máximo que se considera sostenible, en este caso 0,5 m<sup>3</sup>/s; en los escenarios futuros se aplica el mismo criterio, ya que se considera la misma disponibilidad del acuífero. Los resultados del déficit estructural resultante se muestran en la Tabla 31.

**Tabla 31:** Estimación del déficit hídrico en Santa Marta, en función de la hipótesis de demandas y el año horizonte

Hipótesis	2015		2030		2050	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /d
<b>Baja Demanda</b>	1,54	132 792	1,21	104 543	1,08	93 034
<b>Demanda Moderada</b>			1,64	141 654	1,95	168 537
<b>Alta Demanda</b>			2,19	189 147	3,14	271 661

**Fuente:** elaboración propia

En definitiva, para el horizonte 2050 Santa Marta, en periodo de sequía, requerirá recursos procedentes de fuentes que no sean sus propios pozos o ríos cercanos, por valor de entre 93 000 y 272 000 m<sup>3</sup>/d, según la eficiencia de la red y los consumos por vivienda. Como se puede observar, existen diferencias apreciables entre las tres hipótesis consideradas, lo que en última instancia se traducirá en fuertes divergencias en el coste y tipología de las actuaciones disponibles para resolver los problemas de abastecimiento en Santa Marta.

### ■ 3.2.2.4 Exposición

El análisis de la exposición en el caso de la sequía se centra en analizar la frecuencia con la que no es posible satisfacer las demandas del recurso hídrico.

Para ello en primer lugar es necesario establecer cuáles son las demandas actuales y futuras.

Una vez conocidas las demandas actuales y futuras, se evalúan los recursos disponibles en periodo de estiaje en los ríos cercanos, con el propósito último de determinar el balance (en este caso déficit) hídrico que permite conocer si es posible satisfacer las demandas.

### ■ 3.2.2.5 Vulnerabilidad

Los periodos de sequía o indigencia pluviométrica rompen los equilibrios perseguidos en materia de oferta-demanda de agua de una forma lenta, y solo se percibe la amenaza cuando dicho equilibrio desaparece. En una cuenca hidrográfica, donde la sequía ha adquirido un carácter crónico, no se puede bajar la guardia, intentando realizar una gestión del recurso agua inmejorable, adaptándose de la mejor forma posible a las parcas o exiguas disponibilidades hídricas. La organización del territorio en esta cuenca ha evolucionado históricamente, el hombre ha sabido sacar beneficio o utilidad de la interrelación clima-suelo-relieve, ocupando un espacio con características hostiles para su permanencia y desarrollo. Cuando hablamos de vulnerabilidad ante un riesgo como la sequía, nos referimos a la disposición que presenta una sociedad para defenderse de la amenaza. Para que esta amenaza alcance el grado de desastre debe de existir un desequilibrio o desajuste entre la estructura social y el medio físico o natural, predominando en este caso la intensidad de la sequía y sus efectos negativos sobre la capacidad de defensa y gestión del grupo humano.

La vulnerabilidad frente a la sequía no es un hecho estático sino dinámico; progresa desde un estado inicial — deficientes precipitaciones y falta de recursos hídricos— que se ve estimulado por diversas presiones como la rápida urbanización y crecimiento de la superficie de regadío, incrementándose así la inseguridad.

### ■ 3.2.2.6 Riesgo

La identificación y caracterización del riesgo de sequía, comprende siempre una parte de análisis de los fenómenos naturales como los regímenes de precipitación y temperatura y otra vinculada con la vulnerabilidad y los consecuentes impactos.

En este caso el riesgo está vinculado con la materialización de efectos como son las pérdidas de cultivos, en cuanto a producción y por tanto económicas, o la no satisfacción de la demanda de agua urbana.

Por último, el riesgo se modela en términos de pérdidas económicas derivadas de la pérdida de rendimiento debido a la escasez de agua. El riesgo se expresa en términos de la curva de excedencia de pérdidas, la pérdida anual esperada y las pérdidas máximas probables; métricas de riesgo que son útiles para los procesos de toma de decisiones.

### 3.2.2.7 Alternativas

Este apartado se centrará en describir y evaluar las alternativas disponibles para resolver el problema de la escasez de recursos hídricos, en función de las hipótesis de demandas (Tabla 32) y con un horizonte temporal.

**Tabla 32:** Ejemplo resumen de alternativas disponibles según la evolución de las demandas de la ciudad de Santa Marta

Hipótesis	Déficit hídrico 2050	Alternativas
<i>BAJA DEMANDA</i>	1,08 m <sup>3</sup> /s	Trasvase del río Magdalena (MAG)
	93 000 m <sup>3</sup> /d	Trasvase del río Guachaca (GUA)
		Desalación (DES)
<i>DEMANDA MODERADA</i>	1,95 m <sup>3</sup> /s	Trasvase del río Magdalena (MAG)
	169 000 m <sup>3</sup> /d	Trasvase del río Don Diego (DIE)
		Desalación (DES)
<i>ALTA DEMANDA</i>	3,14 m <sup>3</sup> /s	Trasvase del río Magdalena (MAG)
	272 000 m <sup>3</sup> /d	Desalación (DES)

**Fuente:** elaboración propia

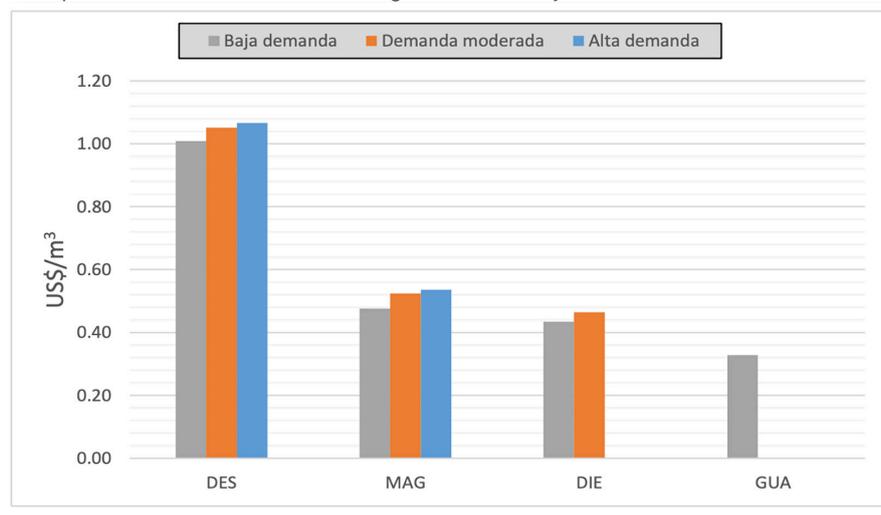
En definitiva, las alternativas que se consideran viables y que se analizarán con mayor detalle en los próximos apartados son:

1. Trasvase mediante tubería desde el río Magdalena (MAG).
2. Trasvase mediante tubería desde el río Guachaca (GUA).
3. Trasvase mediante tubería desde el río Don Diego (DIE).
4. Planta desaladora en Santa Marta (DES).

Nótese que se trata de obras cuyo dimensionamiento y coste dependen de la hipótesis de demandas para la que se diseñen.

Posteriormente se realiza un análisis coste-beneficio de las alternativas disponibles para cada hipótesis, basado en la información disponible. Únicamente se consideran los costes y beneficios diferenciales, dejando fuera del cálculo los costes comunes a todas las alternativas, ya que no sirven para discriminar entre ellas. En consecuencia, los costes unitarios del agua obtenida mediante cada alternativa se pueden considerar costes de aducción (transporte en alta) y para obtener los costes finales del agua habría que sumar los costes de tratamiento y de explotación (mantenimiento y energía) de la red en baja. Además, el coste final del agua servida debe tener en cuenta la proporción del agua que se obtiene de fuentes locales durante el periodo de lluvias, que son notablemente inferiores a los del agua procedente de las alternativas que aquí se analizan.

**Figura 63:** Resumen de precios unitarios resultantes según alternativa y escenario



**Fuente:** elaboración propia

Posteriormente se realiza un análisis multi-criterio que permite la comparación de alternativas, pero dejando de lado aspectos no fácilmente monetizables de cada solución que, en el caso de incluirse, requerirían una dosis de subjetividad y juicios de valor. Por ello, se recomienda separar el análisis economicista y meramente cuantitativo, de otro de índole más cualitativa como, por ejemplo:

- a) Calidad del agua de cada una de las alternativas (1: muy buena calidad del agua bruta; 5: agua bruta de muy mala calidad).
- b) Riesgos de ejecución y de explotación. (1: riesgo despreciable; 5: riesgo muy alto).
- c) Factores de gobernanza y sostenibilidad (1: Muy buenas prácticas; 5: Muy malas prácticas).
- d) Escalabilidad y flexibilidad operativa de las distintas soluciones. (1: Muy alta escalabilidad; 5: Muy baja escalabilidad).
- e) Impacto ambiental (1: impacto despreciable; 5: impacto muy alto).
- f) Impacto social y en las comunidades indígenas (1: impacto despreciable; 5: impacto muy alto).
- g) Vulnerabilidad frente al cambio climático. (1: nada vulnerable; 5: muy vulnerable).

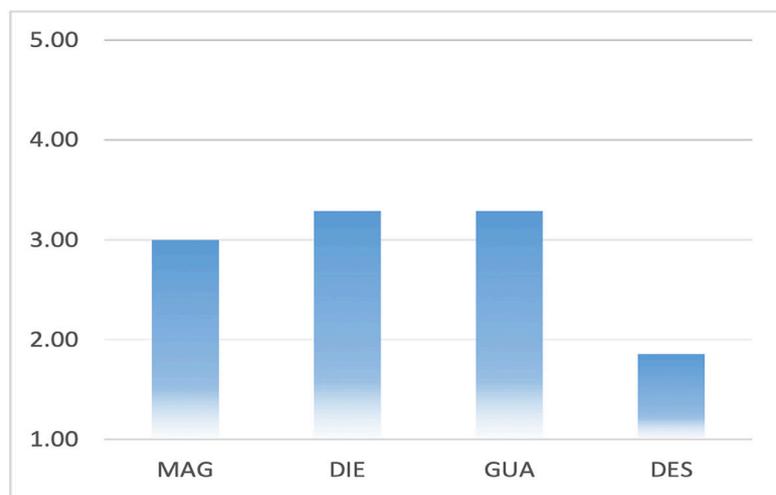
En la Tabla 33 se muestran las valoraciones otorgadas a las alternativas, y en la Figura 64 se resume la puntuación final obtenida, mediante media aritmética simple de las puntuaciones parciales. Se observa que la solución con menos riesgos no monetarios es la desalación; las opciones que más inconvenientes presentan son las de trasvase, siendo ligeramente peor el trasvase desde el río Don Diego o Guachaca (ambas muy similares y con la misma puntuación).

**Tabla 33:** Ejemplo de valoración de las alternativas según los diferentes criterios considerados en la ciudad de Santa Marta (1: impacto despreciable; 5: impacto muy alto)

	MAG	DIE	GUA	DES
A. Calidad del agua bruta.	3	1	1	2
B. Riesgos tecnológicos de ejecución y de explotación.	4	3	3	2
C. Fomento de buena gobernanza y sostenibilidad.	4	3	3	2
D. Escalabilidad y flexibilidad operativa.	4	4	4	3
E. Impacto ambiental.	4	3	3	2
F. Impacto social y en las comunidades indígenas.	1	5	4	1
G. Vulnerabilidad frente al cambio climático	1	4	5	1
<b>TOTAL:</b>	<b>3,00</b>	<b>3,29</b>	<b>3,29</b>	<b>1,86</b>

**Fuente:** elaboración propia

**Figura 64:** Valoración total del impacto no monetario de las alternativas analizadas (1: impacto despreciable; 5: impacto muy alto)



**Fuente:** elaboración propia

### 3.2.3 Conclusiones

#### Riesgo de inundación:

En núcleos urbanos donde se producen con frecuencia desbordamientos de los cauces colindantes, si la ocupación de las nuevas zonas en las márgenes de los ríos y quebradas se realiza sin obras de mejora y expansión de los corredores fluviales, es muy probable que los riesgos actuales se multipliquen por cuatro para el horizonte 2050 en términos económicos, como prevé el escenario tendencial. Los riesgos humanos también podrán incrementarse, aunque en menor proporción, ya que se prevé que parte de las nuevas viviendas sean de calidad constructiva media y alta, por lo que podrán servir de refugio estable a la población.

#### Riesgo de sequías:

Muchas ciudades presentan en la actualidad un problema de abastecimiento urbano (incluyendo en este término los usos residenciales, turísticos, comerciales e industriales), derivado de la confluencia de tres factores: escasez de recursos, deficiencias en el sistema de abastecimiento y una cultura poco desarrollada de conservación y ahorro de agua en la sociedad samaria.

La escasez de agua, pese a ser un fenómeno que repercute en la vida cotidiana de la ciudad, tiene un carácter estacional (época seca) y está muy influenciado por los ciclos climáticos hiperanuales de El Niño-La Niña.

Este estudio se ha orientado a buscar las soluciones más adecuadas, en diferentes sentidos del término, condicionadas por diversas hipótesis de evolución de las variables de diseño, entre las que destacan dos: la eficiencia de la red de abastecimiento y los consumos unitarios (urbanos e industriales). Estas variables no son de naturaleza técnica y se abordan de forma estadística mediante escenarios, por lo que los resultados del estudio son dependientes del camino de evolución socioeconómica y demográfica que se adopte, en este caso representado por tres hipótesis que se han ordenado en función de la demanda hídrica. Más allá de esta nomenclatura habitual en la metodología ICES (230), los tres escenarios o hipótesis representan niveles crecientes de necesidades de agua:

- El de baja demanda conlleva consumos bajos, sin especificar si ello se debe a una gran cultura de conservación y/o a un aumento de la eficiencia de la red.
- El de alta demanda prevé consumos mucho más altos que los actuales, lo que puede explicarse por crecimiento de los consumos por un aumento de las pérdidas en la red o por una combinación de ambos factores).
- Finalmente, el de demanda moderada plantea una situación a medio camino entre las anteriores.

Hay que señalar que las tres hipótesis consideran la misma proyección demográfica, variando por el consumo per cápita y las pérdidas de la red.

Las alternativas disponibles en cada escenario se han evaluado y comparado mediante dos enfoques:

1. Análisis coste-beneficio estándar, considerando únicamente los costes de obra, mantenimiento y explotación (incluyendo energía).
2. Análisis multicriterio, considerando una amplia variedad de aspectos difíciles de monetizar/cuantificar: sociales, ambientales, culturales, etc.

Todos los cálculos económicos se han realizado con una tasa de descuento del 8%. Si se adoptaran tasas menores, saldrían beneficiadas las soluciones que tienen mayor componente de costes fijos frente a los variables, mientras que tasas mayores premiarían las estrategias que variabilizan más los costes.

Para las soluciones de trasvase se recomienda prestar especial atención en el proyecto constructivo y en la supervisión de las obras, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Incorporación de los criterios del futuro explotador de las instalaciones en la fase de diseño (y posiblemente de construcción). Se debe prever la forma de realizar las tareas de mantenimiento y reparación en la nueva tubería. Se debe prever la forma de realizar el llenado/vaciado estacional de la tubería completa.
- Análisis exhaustivo de riesgos de obra y control estricto de los sobrecostes asociados. Se trata de una infraestructura con un alto potencial de incrementar su presupuesto inicial debido a imprevistos de obra e imprecisiones de proyecto.

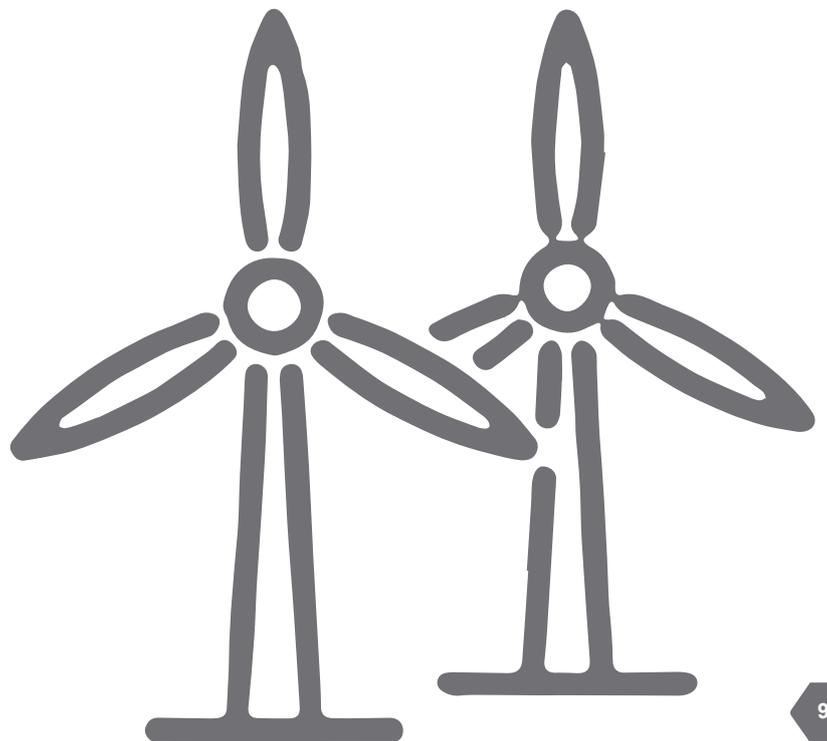
Si bien este estudio se ha centrado en el análisis de alternativas estructurales para resolver el déficit hídrico, cabe señalar que existe espacio para elaborar medidas de gestión destinadas a reducir el déficit, y en definitiva promover el tránsito hacia un escenario de bajo consumo. Dichas medidas se podrían concretar en las siguientes líneas de trabajo a corto y medio plazo:

- Auditoría externa, de procesos y de gestión, de la empresa de abastecimiento municipal. En ella se debe caracterizar con exactitud la situación actual (operativa, organizacional, financiera, etc.), establecer los objetivos realizables y proponer acciones para alcanzarlos.
- Fomento del ahorro de agua en la ciudad. Se sugiere la implementación de un Plan de Ahorro de Agua, destinado a sectores económicos y usuarios domésticos, con el fin de reducir los consumos (aportando las herramientas y los medios necesarios en algunos casos) y crear conciencia del valor del agua.
- Revisión del sistema tarifario del agua de abastecimiento. El precio, al menos en los estratos más altos, debería reflejar el grado de escasez del recurso; en los más bajos, debería minimizar el riesgo moral de desperdiciar un recurso fuertemente subsidiado.
- Analizar la posibilidad de aprobar (y hacer cumplir) unas ordenanzas municipales para regular los consumos de agua en épocas de sequía. No es aceptable en términos generales, ni siquiera con un aumento de las tarifas, que se rieguen jardines o se llenen piscinas en periodos con restricción de agua para usos básicos.
- Incorporar el factor agua como criterio de planificación urbana. La disponibilidad de agua debe ser un requisito para el otorgamiento de permisos para nuevas edificaciones. Se recomienda abrir un debate público-institucional sobre el coste de edificar sin garantía de abastecimiento.



## 4 > PILOTO 4: ENERGÍA EÓLICA

4.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático	94
4.2 Descripción general de la metodología	95
4.3 Análisis de la vulnerabilidad	102
4.4 Evaluación del riesgo	102
4.5 Evaluación de medidas de adaptación	102
4.6 Conclusiones	103
4.7 Resultados adicionales	103



En este apartado y siguientes se expone el caso de estudio referido a la generación de energía eólica. Su objetivo es eminentemente didáctico, por lo que se escogió el caso que mejor ejemplifica los planteamientos y técnicas que se desea mostrar, que son los siguientes:

- Trabajar con distribuciones de probabilidad en lugar de con series históricas (ya que existen ejemplos de otros casos de estudio donde se analizan las mismas, como es el caso centrado en hidroenergía).
- Aplicar escenarios de cambio climático empleando técnicas que evalúan el cambio en las funciones de probabilidad.
- Mostrar un claro ejemplo de cómo evaluar la sensibilidad cuantitativamente con un algoritmo o función concreta, ya que para este caso existe una clara relación entre el cambio de las variables climáticas (velocidad del viento) y la operación del sistema (energía generada).

Por tanto, este caso no busca ser una exposición de la cadena global de procesamiento de información climática empleada en la evaluación de proyectos eólicos, lo que implicaría una extensión excesiva. Se centra exclusivamente en los pasos más específicos necesarios para generar proyecciones climáticas en un punto concreto a partir de la información climática aportada por modelos de circulación globales (GCM) o regional (RCM).

Previa a la aplicación de la metodología expuesta en este caso de estudio, en los proyectos eólicos se debe procesar la información climática de tal forma que a partir de datos recogidos en la zona de estudio durante un periodo corto permitan estimar las condiciones climáticas en esa zona durante un periodo largo, los métodos utilizados se denominan “*measure-correlate-predict*” (MCP). Las principales diferencias entre los distintos métodos MCP residen fundamentalmente en el tipo de relación existente entre los datos de viento (velocidad y dirección) recogidos en el lugar de estudio y los datos recogidos de forma simultánea en una o varias estaciones meteorológicas cercanas, las cuales sirven como estaciones de referencia y aportan las series de datos de un periodo de tiempo largo. Así, podemos distinguir desde los métodos MCP más simples y antiguos que solo calculan la media de la velocidad del viento de un periodo de tiempo largo, hasta los más complejos y actuales que usan modelos no lineales, modelos lineales superiores al primer orden, o relaciones de probabilidad para caracterizar el recurso eólico (Carta et al. 2013) (231).

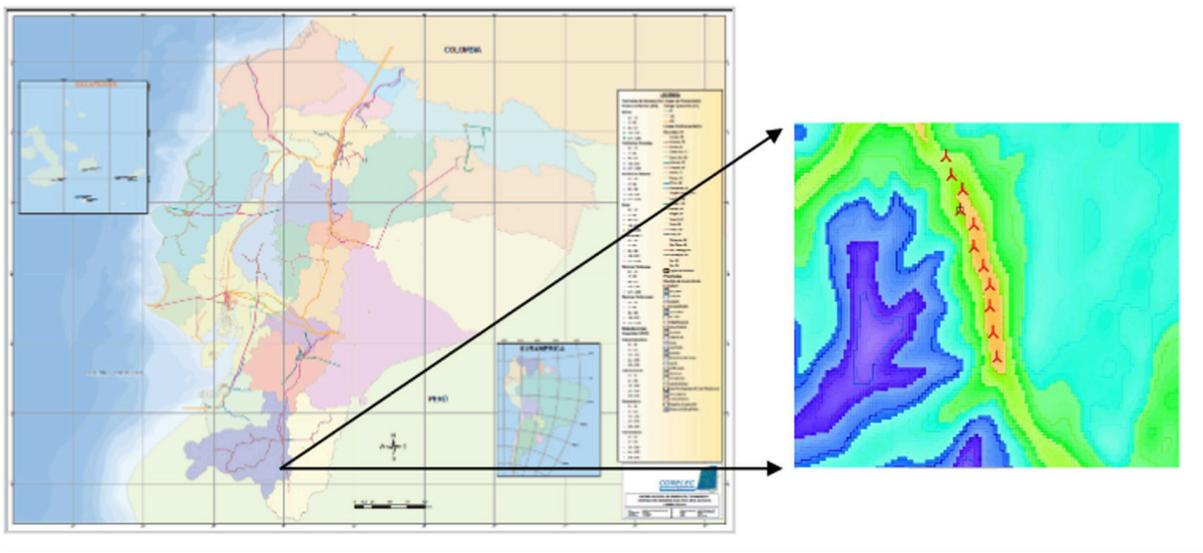
Como caso de estudio se usa el proyecto Villonaco Windpower (VW), que está localizado en la región de Loja (Ecuador) y tiene el objetivo de generar electricidad usando el viento como única fuente de energía. El proyecto suministra energía a la red eléctrica central ecuatoriana: Sistema Nacional Interconectado (SNI), y ha sido registrado como proyecto del Mecanismo de Desarrollo Limpio de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. La información mostrada a continuación se ha obtenido de los documentos públicos generados en este contexto (232), y tiene el objetivo de contextualizar el estudio y demostrar que la información requerida no es especialmente abundante y específica, para las técnicas específicas que se quieren mostrar.

El parque eólico estudiado está compuesto por 11 aerogeneradores del modelo *Gold Wind Australia* GW70/1500 equipados con tecnología “*direct drive*” (de 1,5 MW de capacidad cada uno). En nuestro estudio, además del modelo de turbina usado en el proyecto, vamos a considerar también la posibilidad de replantear el mismo con el modelo GW77/1500 para comparar las diferencias en la producción total anual. Si bien ambos modelos tienen la misma potencia máxima, su capacidad para aprovechar vientos de diferentes rangos de velocidades es diferente. Empleando los términos que se vienen utilizando en la guía, al remplazar un modelo por otro alterarían la sensibilidad del proyecto. En este caso es posible realizar una evaluación cuantitativa del efecto de cambiar de modelo de aerogenerador, que podría ser considerada para evaluar si esta puede ser una medida de adaptación interesante frente a cambios en los patrones de viento.

La central está situada en la cumbre de Villonaco (Figura 65), a 640 km de Quito. El monte se encuentra a más de 2700 m por encima del nivel mar. A continuación, se muestran las coordenadas de la central:

- Longitud: -79,2585E.
- Latitud: -4,0021S.
- Altitud: 2 722,4.

➤ **Figura 65:** Localización del caso de estudio



➤ **Fuente:** Project Design Document Villonaco Windpower (version 14.0) ((232))

Los principales criterios para la elección de este proyecto son la adecuación del mismo a los fines didácticos perseguidos y la similitud de la distribución del viento apreciada en esta ubicación, que se corresponde con la más frecuente en la literatura, la distribución de Weibull (Chang 2011 (233); Costa-Rocha et al. 2012 (234); Hiddouan y Staffell 2017(62)).

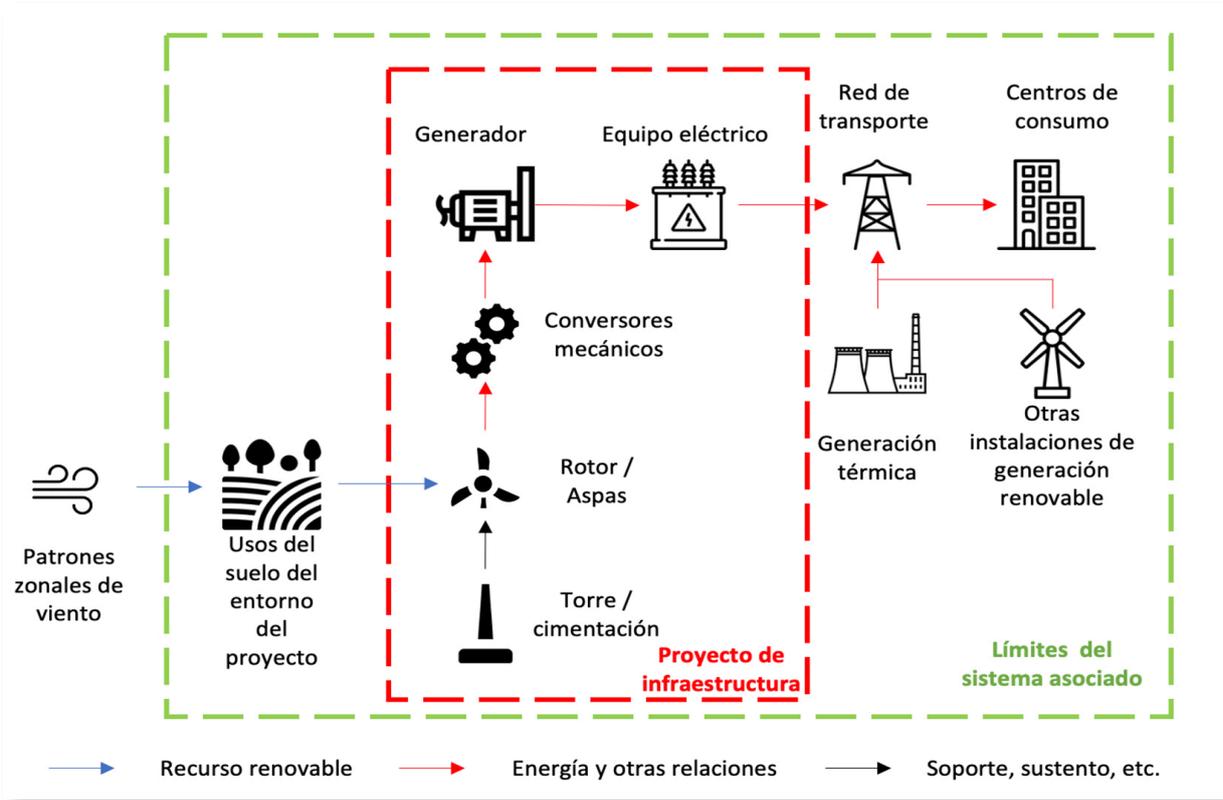


➤ **Nota:** esta imagen no corresponde al parque eólico descrito en este ejemplo

## 4.1 Contextualización del proyecto respecto al cambio climático

La contextualización de los proyectos de instalaciones eólicas con respecto al cambio climático se describe en el apartado “Energía eólica” del Tomo 1. En la Figura 66 observamos el esquema del contexto propuesto para la evaluación de riesgos climáticos de un proyecto eólico. En este caso de estudio solo analizamos el “proyecto de infraestructura”.

➤ **Figura 66:** Esquema del contexto para la evaluación de riesgos climáticos de un proyecto eólico



➤ **Fuente:** elaboración propia

De este modo, en el análisis presentado se obvian aspectos que pueden condicionar la operativa del parque. Por ejemplo, asumimos que no habrá cambios significativos en la orografía y usos del suelo circundantes, por lo que el potencial cambio de recurso se deberá exclusivamente a cambios en los patrones climáticos. Igualmente, se considera que la red nacional de energía demanda al proyecto toda la energía que le sea posible entregar, tanto en la situación actual como futura.

Bajo estos planteamientos, las variables climáticas claves para caracterizar la producción de energía de un parque eólico son el régimen de viento y la densidad del aire. Ambos podrían verse afectados por el cambio climático. El régimen de viento es el mecanismo principal y más directo por el cual el cambio climático puede afectar al sector eólico. La densidad del aire también tiene un impacto directo sobre la producción eólica, aunque en menor grado. En nuestro caso de estudio nos centraremos en los cambios de la velocidad del viento.

## 4.2 Descripción general de la metodología

La metodología seguida para la elaboración del caso de estudio se resume en estos puntos:

- Descripción de los datos utilizados.
- Extrapolación del viento en altura.
- Cálculo de los parámetros de la distribución de probabilidad.
- Aplicación de la delta relativa para velocidad del viento.
- Cálculo de la energía generada en escenarios futuros.

### 4.2.1 Descripción de los datos utilizados

En este ejemplo usaremos los datos de velocidad de viento aportados por el reanálisis ERA5 como datos observados. Esta simplificación tiene el objetivo de centrar el estudio en las etapas que se desea exponer con más detalle, pero se ha de tener presente en todo momento que, como en cualquier caso en el que se empleen datos de modelos, es conveniente contrastar y calibrar los mismos con observaciones.

En este sentido la industria eólica cuenta con un importante abanico de técnicas que generalmente se referencian como métodos de correlación entre observaciones y predicciones o “*Measure-Correlate-Predict (MCP) methods*”. Su grado de complejidad, desarrollo e implantación es tal que algunos se encuentran incluso implementados en las principales herramientas que emplea esta industria. Es posible tener una visión de los mismos en el documento “*A review of measure-correlate-predict (MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site*”, (Carta et al., 2013, (231)), por lo que no son descritos en este documento.

Hecha esta salvedad, y asumiendo que los datos de ERA5 representan bien el viento en la ubicación que estamos estudiando (Hdidouan y Stafell, 2017) (62), a continuación se describe como se emplean estos datos.

ERA5 es la quinta generación de reanálisis atmosférico del clima global de ECMWF. Este conjunto de datos o *dataset* combina datos de modelos con observaciones de todo el mundo. El periodo utilizado va desde 1986 hasta 2005, con resolución temporal de la información de 1 hora. Este último aspecto es muy importante, ya que, para el análisis de generación eólica, en la que pequeños cambios en la velocidad del viento suponen cambios significativos en la energía generada, emplear una resolución temporal insuficiente (con medias diarias, por ejemplo) puede conducir a errores de valoración.

Este mismo aspecto ha condicionado el modelo empleado para generar proyecciones de cambio climático. Para el cálculo de los cambios en el futuro en los dos escenarios de cambio climático contemplados, RCP4.5 y RCP8.5, se emplearon los datos de velocidad del viento de uno de los modelos participantes en el proyecto *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)*, en concreto del modelo *National Oceanic and Atmospheric Administration: Geophysical Fluids Dynamics Laboratory – Earth System model 2 (ESM2G)*. Se obtuvieron datos de los resultados generados por el mismo para un periodo de 20 años (1986-2005) como representativo de la serie histórica y se utilizó el periodo de 2036-2055 de los datos para evaluar la evolución futura del clima. La resolución temporal de estos datos es de 3 horas, superior a muchos otros modelos del propio CMIP5 que solo aportan datos diarios.

La ubicación exacta para la que se obtuvieron los datos de este modelo es la siguiente:

- Latitud = -3,9934
- Longitud = -79,2612.

Todos los datos mostrados en el documento se cogieron en la coordenada concreta de los *datasets*, que es la más cercana a la ubicación del proyecto. Esto simplifica la exposición, pero sería posible aplicar métodos más elaborados (por ejemplo, descargando datos para varios puntos cercanos y ponderando los mismos por su distancia a la ubicación exacta de nuestro proyecto).

## 4.2.2 Extrapolación del viento en altura

La velocidad del viento debe ser extrapolada de 10 metros (altura para la cual la facilitan tanto ERA5 como ESM2G) a la altura de la turbina (en este caso 65 metros), usando el perfil vertical del viento descrito por la ley empírica de potencia mostrada en la Ecuación 1 (Elliott 1979 (235); Tobin et al. 2015 (83)).

$$U_H = U_S \cdot \left( \frac{H}{10} \right)^{\frac{1}{7}}$$

➤ **Ecuación 1**

**Fuente:**  
(Tobin et al. 2015. (83))

Donde:  $U_H$  es la velocidad del viento a la altura de la turbina  $H$  y  $U_S$  es la velocidad del viento a 10 m.

La Ecuación 1 proviene de la Ley Exponencial de Hellmann y el valor del exponente varía con la rugosidad del terreno. En nuestro caso asumimos que el exponente es  $1/7$ , ya que en Tobin et al. 2015 (83) muestran que es una buena aproximación.

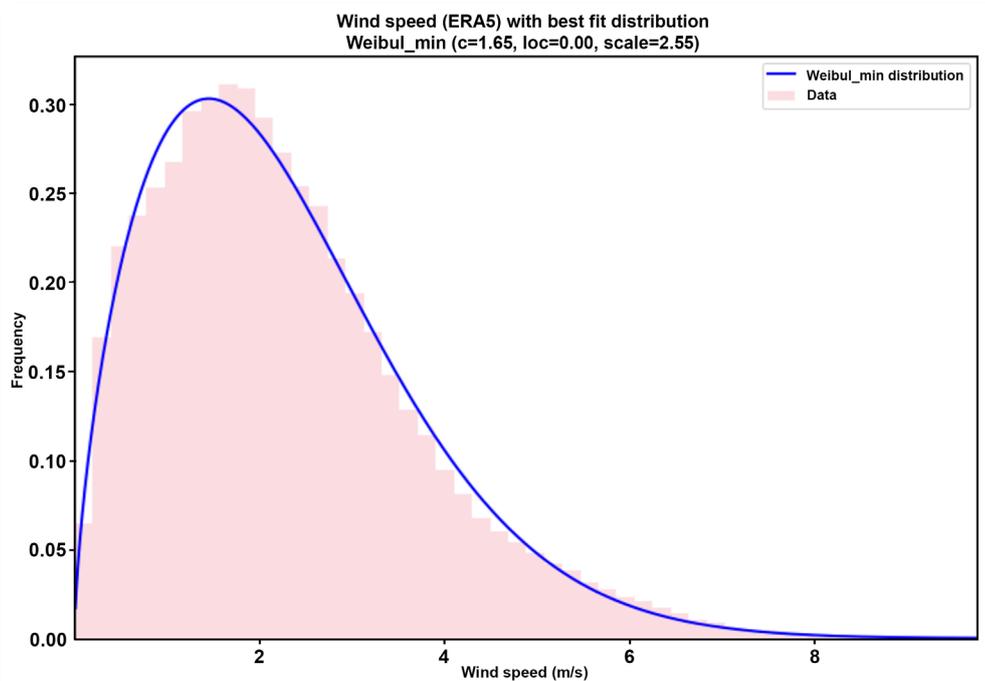
## 4.2.3 Cálculo de los parámetros de la distribución de probabilidad

Los reanálisis como ERA5 generalmente aportan los datos de velocidad del viento como dos componentes: El viento en sentido Norte y el viento en sentido Este. Ambos componentes pueden adquirir valores negativos. Por ejemplo, si tenemos un viento que claramente se dirige hacia el Sur a 3 m/s, su componente Norte sería -3m/s y su componente Este nulo.

Para realizar el análisis es preciso descargar ambos componentes y calcular para cada una de las horas del periodo base estudiado la velocidad global (que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de ambos componentes).

Una vez realizadas estas operaciones y la corrección por altura, se procede a analizar la distribución de probabilidad de las velocidades. Para el cálculo de los parámetros de distribución de se ha empleado el paquete de Python *scipy*, que permite ajustar a un conjunto de datos distribuciones estadísticas comunes. Entre todas las distribuciones se ha empleado la que mejor se ajusta a los datos históricos, es decir, utilizamos aquella con menor suma de los errores cuadráticos. A continuación, se muestra el resultado de la serie de datos de ERA5 (Figura 67):

➤ **Figura 67:** Frecuencia de velocidad de vientos en la zona de estudio



**Nota:** En rosa el histograma de frecuencias de los datos de ERA5 (periodo 1986-2005) y en azul la distribución de probabilidad de *Weibull Minimum* con los parámetros en el encabezado.

➤ **Fuente:** elaboración propia

Observamos que la distribución de probabilidad que mejor encaja con la serie de datos de ERA5 es la *Weibull Minimum*, según la terminología empleada por *Statistical functions* (scipy.stats) o, simplemente *Weibull*. Para el resto de las series de CMIP5, también es la distribución *Weibull Minimum* la escogida.

La distribución de Weibull es una distribución de probabilidad continua. La función de densidad de una variable aleatoria con la distribución Weibull  $x$  es:

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(x/\lambda)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$

> **Ecuación 2**

**Fuente:**  
([https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n\\_de\\_Weibull](https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_Weibull))

Donde:  $k > 0$  es el parámetro de forma y  $\lambda > 0$  es el parámetro de escala de la distribución.

La función de distribución de probabilidad de Weibull es:

$$F(x; k, \lambda) = 1 - e^{-(x/\lambda)^k}$$

> **Ecuación 3**

**Fuente:**  
([https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n\\_de\\_Weibull](https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_Weibull))

Para  $x \geq 0$ , siendo nula cuando  $x < 0$ .

Lógicamente, se podrían emplear otras técnicas para analizar la distribución que presentan los datos de probabilidad. Igualmente, en otras ubicaciones o periodos podríamos obtener que otras funciones de probabilidad explican mejor la distribución de las velocidades. Para intentar simplificar la exposición de este caso, se ha realizado un análisis conjunto de todas las direcciones del viento, pero las técnicas expuestas son igualmente aplicables a un análisis por cuadrantes.

#### 4.2.4 Aplicación de la delta relativa

La Ecuación 4 (Hdidouan y Stafell 2017) (62) muestra la transformación aplicada al parámetro de escala ( $C$ ) de la distribución Weibull, basado en los resultados históricos y de futuro del modelo ESM2G, y los resultados históricos de ERA5 los cuales son tomados como los datos observados. La misma transformación se aplica al parámetro 'shape' ( $k$ ), reemplazando  $C$  por  $k$  en la ecuación.

$$C_{\text{future}}^{\text{ERA5}} = C_{\text{historic}}^{\text{ERA5}} \times \frac{C_{\text{future}}^{\text{ESM2G}}}{C_{\text{historic}}^{\text{ESM2G}}}$$

> **Ecuación 4**

**Fuente:**  
(Hdidouan and Stafell (2017) ((62))).

Es importante no confundir la nomenclatura de los parámetros que nos indican Hdidouan y Stafell (2017), los que nos da el paquete de Python *scipy* (mostrados en las gráficas) y los que se usan internacionalmente. En la Tabla 34 se destacan las diferencias.

> **Tabla 34:** Nomenclatura de los parámetros de distribución de *Weibull Minimum*

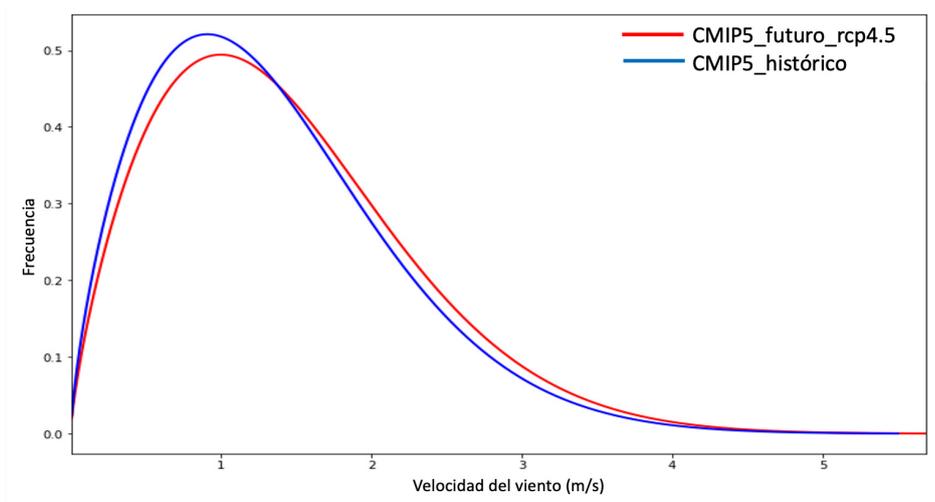
Parámetros	Fuente		
	Scipy	Hdidouan y Stafell 2017	Internacional
Shape (Forma)	C	k	k
Scale (Escala)	Scale	C	$\lambda$

> **Fuente:** elaboración propia

En las siguientes gráficas (Figura 68) podemos observar la distribución de Weibull de la serie de datos de CMIP5 históricos y los del periodo 2036-2055 en el escenario climático RCP4.5. Como se puede apreciar, el modelo apunta que en el futuro la frecuencia de los vientos de baja velocidad será menor, mientras que los vientos de mayor velocidad media serán más frecuentes. Cada una de estas dos distribuciones está caracterizada por unos parámetros de forma y escala. Comparando ambos conforme a la ecuación anterior se calcula un factor que puede ser aplicado a los datos de ERA5.

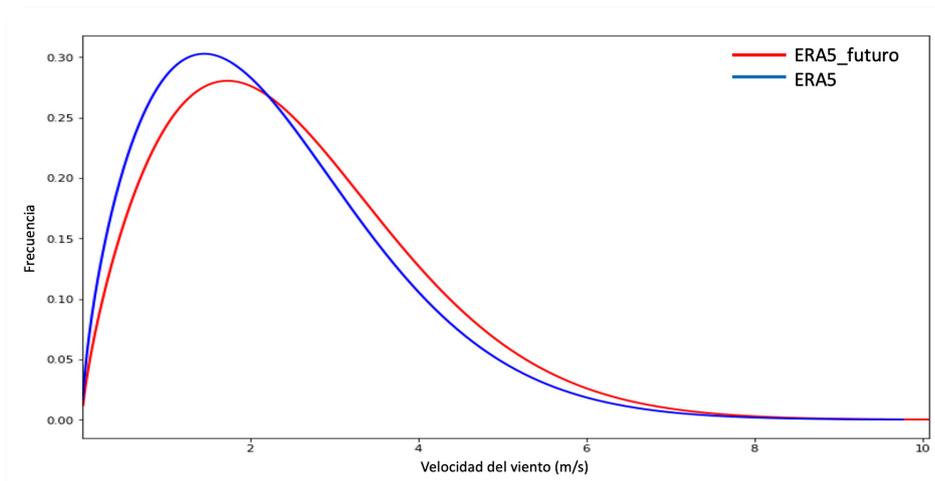
En la Figura 69 se aprecia el resultado de esta operación. Se muestra la distribución de los datos originales de ERA5 (en color azul), y la distribución de ERA5 tras aplicar cambios en los parámetros que determinan esta distribución (ERA5-futuro, de color rojo). El resultado es que, las velocidades bajas se ven menos representadas, mientras que la frecuencia de las velocidades medias se incrementa.

➤ **Figura 68:** Distribución probabilidad *Weibull Minimum* de los datos de velocidad de viento de CMIP5 históricos (1985-2005) y de futuro (2036-2055) en el escenario de cambio climático RCP4.5



➤ **Fuente:** elaboración propia

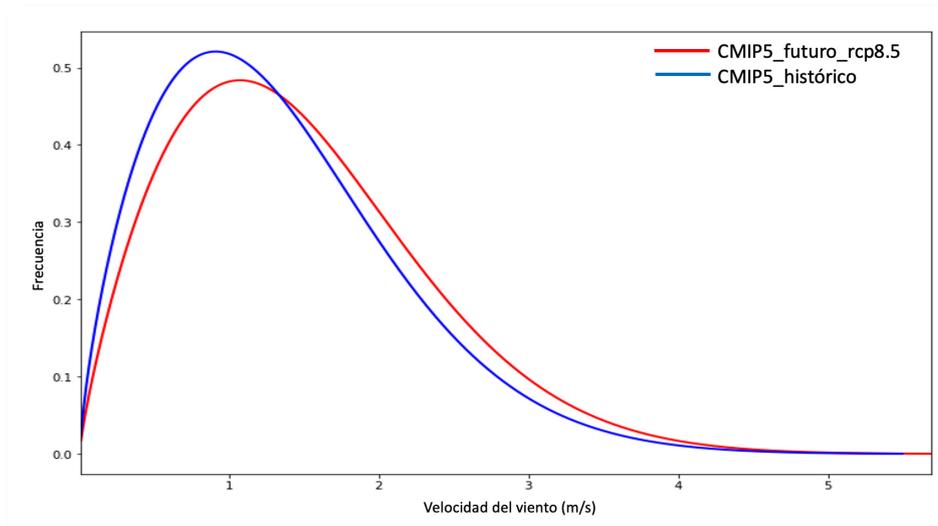
➤ **Figura 69:** Distribución de probabilidad de *Weibull Minimum* de los datos de velocidad de viento de ERA5 (1986-2005) y los datos de ERA5 tras aplicar la delta relativa con los datos CMIP5 históricos (1986-2005) y RCP4.5 (2036-2055)



➤ **Fuente:** elaboración propia

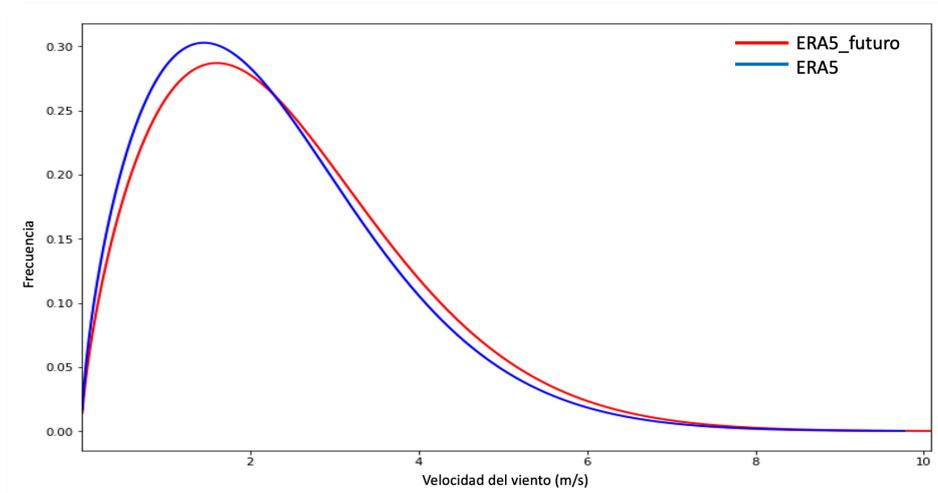
➤ A continuación, se muestran los resultados anteriores para el escenario RCP8.5 (Figura 70 y Figura 71).

**Figura 70:** Distribución probabilidad *Weibull Minimum* de los datos de velocidad de viento de CMIP5 históricos (1985-2005) y de futuro (2036-2055) en el escenario de cambio climático RCP8.5



➤ Fuente: elaboración propia

➤ **Figura 71:** Gráfica de la distribución de probabilidad de *Weibull Minimum* de los datos de velocidad de viento de ERA5 (1986-2005) y los datos de ERA5 tras aplicar la delta relativa con los datos CMIP5 históricos (1986-2005) y RCP8.5 (2036-2055)

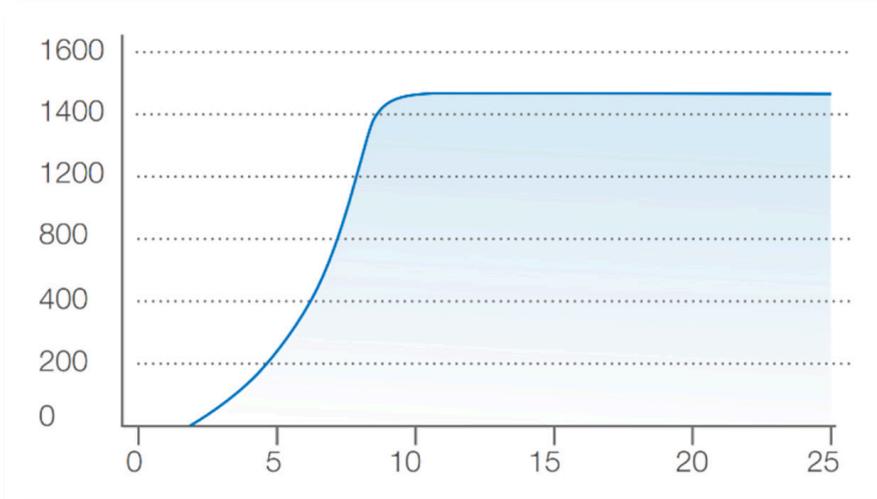


➤ Fuente: elaboración propia

### 4.2.5 Cálculo de la energía generada en escenarios futuros

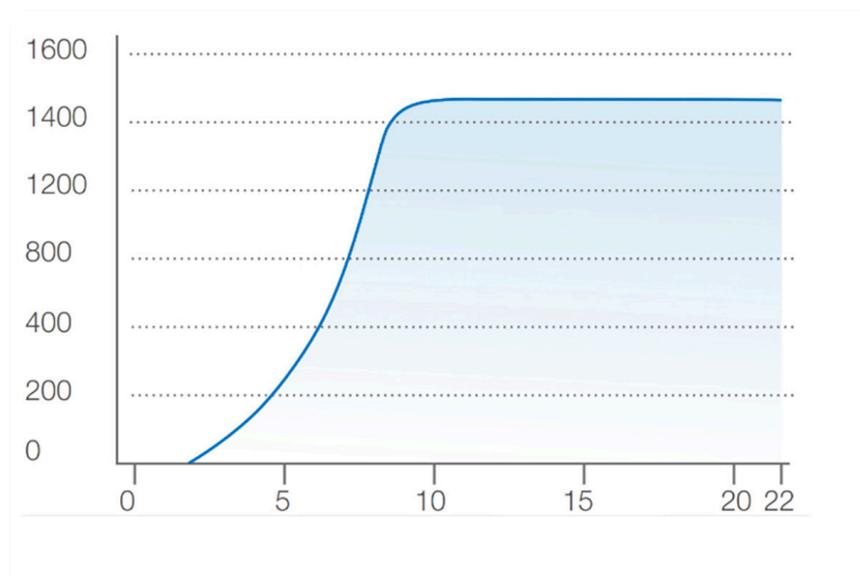
La curva de potencia de un aerogenerador indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades de viento. Las curvas de potencia de los aerogeneradores que estudiamos en este ejemplo se muestran en las Figura 72 y Figura 73.

➤ **Figura 72:** Curva de potencia del modelo de turbina GW 70/1500



➤ **Fuente:** 1.5 MW PMDD Wind Turbine specifications (Goldwin-Australia)(236)

➤ **Figura 73:** Curva de potencia del modelo de turbina GW 77/1500



➤ **Fuente:** 1.5 MW PMDD Wind Turbine specifications (Goldwin-Australia)(236)

De esta forma, con las gráficas de distribución de probabilidad y las curvas de potencia podemos calcular la energía total generada en un año en cada caso del modo que muestra la Tabla 35.

Como indicamos anteriormente la densidad del aire es una variable que debemos tener en cuenta en los cálculos de producción de energía eólica. Las especificaciones de estas turbinas presentan los datos a una densidad constante ( $1225 \text{ kg/m}^3$ ), pero en ocasiones las curvas de potencia nos indican las diferencias de producción a diferentes densidades. En el caso de que tengamos esta información debemos calcular la densidad en altura con la Ecuación 5.

➤ **Ecuación 5**

$$\rho = \frac{(P_{\text{dry}} \cdot M_{\text{dry}} + P_v \cdot M_v)}{z \cdot R \cdot T}$$

**Fuente:**  
(Gonçalves-Ageitos et al. 2015 (237))

Donde:  $\rho$  es la densidad en el tiempo y el nivel especificado;  $P_{\text{dry}}$  la presión parcial del aire seco en Pa;  $P_v$  la presión del vapor en Pa;  $M_{\text{dry}}$  y  $M_v$  la masa molecular del aire seco y el vapor de agua,  $2,897 \times 10^{-3}$  y  $1,8 \times 10^{-3}$  respectivamente, en  $\text{kg mol}^{-1}$ ;  $R$  la constante de los gases ideales,  $8,314$  en  $\text{Pa m}^3 \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;  $z$  el factor de compresibilidad considerado como aproximadamente 1; y  $T$  la temperatura del aire en K.

Para el cálculo de la producción anual en cada caso, realizamos los cálculos mostrados en la Tabla 35. Para cada velocidad de viento, a intervalos de 1 m/s, cogemos su potencia correspondiente de la curva de potencia y la frecuencia de las gráficas de distribución. Como queremos calcular la energía generada en un año, multiplicamos cada valor de frecuencia por las horas totales de un año (8 760 horas), para así obtener el valor de horas en un año con esa velocidad de viento. Finalmente, los productos de las horas por la potencia de cada velocidad de viento se suman y obtenemos la energía generada anual total. El resto de las tablas se pueden encontrar en el apartado 4.7.

Siguiendo la metodología descrita si queremos calcular la energía media anual generada para una velocidad de viento de 6 m/s para los datos de ERA5 (1986-2005) y el modelo GW 70/1500 (Tabla 35) seguiremos los siguientes pasos:

1. Observamos en la curva de potencia (Figura 72) que una velocidad de viento de 6 m/s se corresponde con una potencia de 385 (kW).
2. La distribución de probabilidad de los datos de ERA5 (Figura 67) nos muestra que la frecuencia de 6 m/s es de 0,02.
3. Sabemos que el año tiene 8.760 horas, por lo que una frecuencia de 0,02 en un año es igual a 175,2 horas.
4. Multiplicando la potencia (385 kW) por las horas con esa velocidad de viento (175,2 horas), obtenemos la energía generada en un año de media (67 452 kW h).
5. Debemos repetir estos cálculos para cada velocidad de viento.

➤ **Tabla 35:** Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento de ERA5 (1986-2005) y el modelo de turbina GW 70/1500

Velocidad viento (m/s)	Potencia (kW)	Frecuencia	Tiempo (h)	Energía generada (kW h)
0	0	0,050	438	0,0
1	0	0,299	2 619	0,0
2	0	0,282	2 470	0,0
3	70	0,192	1 682	117 734,4
4	145	0,105	920	133 371,0
5	245	0,047	412	100 871,4
6	385	0,020	175	67 452,0
7	755	0,005	44	33 069,0
8	1 240	0,000	0	0,0
9	1 440	0,000	0	0,0
10	1 475	0,000	0	0,0
				<b>452 497,80</b>

➤ **Fuente:** elaboración propia

## 4.3 Análisis de la vulnerabilidad

Frecuentemente asociamos al cambio climático consecuencias negativas, pero este es un ejemplo de cómo en ocasiones también presenta oportunidades. El modelo estudiado indica que el potencial eólico se verá incrementado. Aun así, por coherencia con otros apartados, vamos a seguir hablando de “vulnerabilidad”.

En la Tabla 36 mostramos los resultados de la energía media anual generada para los datos observados y los dos escenarios estudiados, y para cada modelo de turbina. En ambos escenarios la energía total producida aumenta, experimentando el mayor aumento en el escenario RCP8.5. Aunque el modelo de turbina escogido en el proyecto fue el GW70/1500, en este ejemplo observamos que el modelo de turbina que produce más energía para cada uno de los casos es el GW 77/1500.

➤ **Tabla 36:** Energía eólica generada en un año (kWh)

	MODELO DE TURBINA	
	GW 70/1500	GW 77/1500
Observados	452 497,80	486 267,6
RCP4.5	527 658,60	563 355,6
RCP8.5	580 831,80	617 755,2

➤ **Fuente:** elaboración propia

Es decir, cada una de las columnas de esta tabla nos da una estimación de la sensibilidad del parque eólico para las dos opciones que estamos analizando. Como se ha comentado anteriormente, los cambios son beneficiosos porque se aumentaría la producción en ambos escenarios.

## 4.4 Evaluación del riesgo

Para tomar decisiones en cualquier proyecto de inversión, es interesante llegar a cuantificar las vulnerabilidades en debe cuantificar en términos económicos. En este caso de estudio nos limitamos a evaluar la cantidad de energía generada y no tenemos en cuenta los aspectos económicos porque no disponemos del precio de la electricidad ni de los dos modelos de generadores.

En caso de disponer de esta información sería posible realizar un análisis de TIR y VAN que nos indique el impacto que exprese en términos económicos el riesgo asociado a los escenarios RCP 4.5 y RCP8.5 con el modelo inicialmente previsto (GW 70/1500). Esto nos daría una idea del riesgo climático para el planteamiento inicial del proyecto. Al igual que en la vulnerabilidad, este riesgo tendría un valor negativo, es decir, se espera que sea una oportunidad para generar más ingresos, y no al contrario.

Como se dijo anteriormente los datos usados provienen de ERA5 y no del proceso habitual de evaluación del recurso eólico, ya que solo es un ejemplo de la metodología que podríamos usar con los datos obtenidos del proceso habitual. Además, no solo deberíamos evaluar dos escenarios de cambio climático de un modelo, si no que para tomar decisiones robustas sería conveniente utilizar varios escenarios y modelos en la evaluación.

## 4.5 Evaluación de medidas de adaptación

En este caso, ante la mayor presencia de vientos de media velocidad y menor frecuencia de vientos de baja velocidad que apunta el modelo estudiado, sería posible plantear un modelo diferente de aerogenerador. Frente al modelo inicialmente previsto, el GW 77/1500 se comporta mejor en vientos medios, aunque tiene el inconveniente de que no llega a operar a vientos tan elevados como el GW 70/1500. Es por eso que parece que este generador, podría ser interesante en los escenarios de cambio climático.

Tras los resultados presentados, el modelo de turbina que finalmente escogeríamos, si ambos tuvieran el mismo coste, sería el GW 77/1500, ya que en todos los casos es el que más energía produce anualmente. No obstante, este modelo tiene un mayor diámetro y coste, y habría que realizar un análisis coste beneficio de si merece la pena invertir el mismo en escenarios de cambio climático. En este caso, lo que es conveniente estudiar es cada una de las filas de la Tabla 3, y si la mayor energía del modelo de más diámetro compensa la inversión adicional.

## 4.6 Conclusiones

La metodología presentada en este caso de estudio nos permite evaluar el cambio del recurso eólico a largo plazo y el impacto del cambio climático sobre la producción eléctrica en una instalación eólica concreta.

Las tablas de resultados nos muestran que, en ambos escenarios de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5), la producción de las turbinas eólicas en la zona estudiada aumentará, siendo mayor en el RCP8.5. El modelo de turbina que más produce en todos los escenarios de cambio climático es la GW77/1500, por lo que sería la escogida en este ejemplo, aunque en un caso real necesitamos tener en cuenta los aspectos económicos.

Aunque en nuestro estudio tomamos como datos de observación ERA5, debemos tener en cuenta que la metodología presentada se podría aplicar a los datos de observación que habitualmente se utilizan en este tipo de proyectos. Por último, hemos de apuntar que para un estudio riguroso se deben incluir más escenarios y una gama amplia de modelos climáticos para reducir la incertidumbre.

## 4.7 Resultados adicionales

➤ **Tabla 37:** Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento en el escenario RCP4.5 (2036-2055) y el modelo de turbina GW 70/1500

Velocidad viento (m/s)	Potencia (kW)	Frecuencia	Tiempo (h)	Energía generada (kW h)
0	0	0,050	438	0,0
1	0	0,265	2 321	0,0
2	0	0,278	2 435	0,0
3	70	0,202	1 770	123 866,4
4	145	0,118	1 034	149 883,6
5	245	0,056	491	120 187,2
6	385	0,022	193	74 197,2
7	755	0,009	79	59 524,2
8	1 240	0,000	0	0,0
9	1 440	0,000	0	0,0
10	1 475	0,000	0	0,0
				<b>527 658,60</b>

➤ **Fuente:** elaboración propia

➤ **Tabla 38:** Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento en el escenario RCP8.5 (2036-2055) y el modelo de turbina GW 70/1500

Velocidad viento (m/s)	Potencia (kW)	Frecuencia	Tiempo (h)	Energía generada (kW h)
0	0	0,030	263	0,0
1	0	0,248	2 172	0,0
2	0	0,279	2 444	0,0
3	70	0,212	1 857	129 998,4
4	145	0,135	1 183	171 477,0
5	245	0,060	526	128 772,0
6	385	0,027	237	91 060,2
7	755	0,009	79	59 524,2
8	1 240	0,000	0	0,0
9	1 440	0,000	0	0,0
10	1 475	0,000	0	0,0
				<b>580 831,80</b>

➤ **Fuente:** elaboración propia

➤ **Tabla 39:** Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento de ERA5 (1986-2005) y el modelo de turbina GW 77/1500

Velocidad viento (m/s)	Potencia (kW)	Frecuencia	Tiempo (h)	Energía generada (kW h)
0	0	0,05	438	0
1	0	0,299	2 619,24	0
2	10	0,282	2 470,32	24 703,2
3	70	0,192	1 681,92	117 734,4
4	150	0,105	919,8	137 970
5	250	0,047	411,72	102 930
6	390	0,02	175,2	68 328
7	790	0,005	43,8	34 602
8	1 295	0	0	0
9	1 445	0	0	0
10	1 465	0	0	0
				<b>486 267,6</b>

➤ **Fuente:** elaboración propia

➤ **Tabla 40:** Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento en el escenario RCP4.5 (2036-2055) y el modelo de turbina GW 77/1500

Velocidad viento (m/s)	Potencia (kW)	Frecuencia	Tiempo (h)	Energía generada (kW h)
0	0	0,05	438	0
1	0	0,265	2 321,4	0
2	10	0,278	2 435,28	24 352,8
3	70	0,202	1 769,52	123 866,4
4	150	0,118	1 033,68	155 052
5	250	0,056	490,56	122 640
6	390	0,022	192,72	75 160,8
7	790	0,009	78,84	62 283,6
8	1 295	0	0	0
9	1 445	0	0	0
10	1 465	0	0	0
				<b>563 355,6</b>

➤ **Fuente:** elaboración propia

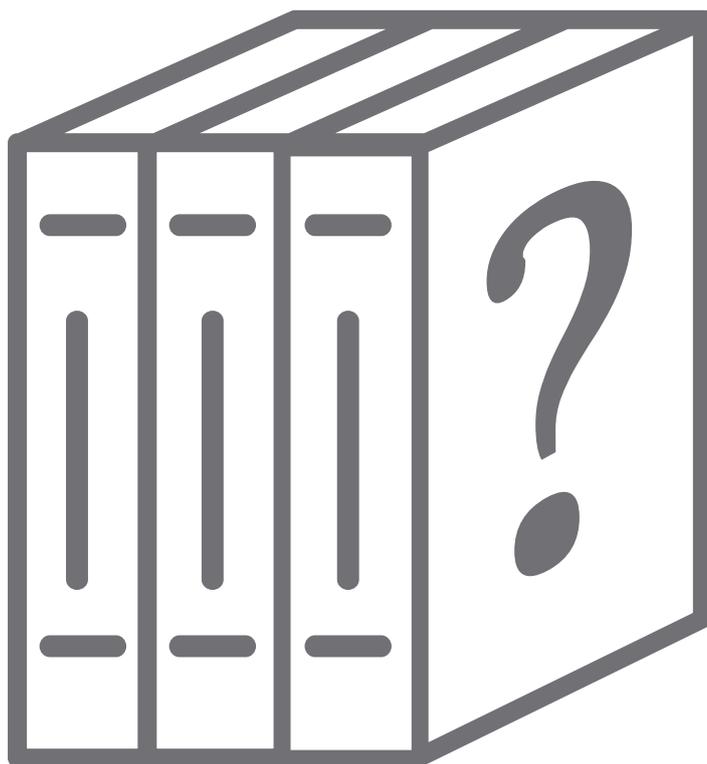
➤ **Tabla 41:** Energía media anual generada con los datos de velocidad de viento en el escenario RCP8.5 (2036-2055) y el modelo de turbina GW 77/1500

Velocidad viento (m/s)	Potencia (kW)	Frecuencia	Tiempo (h)	Energía generada (kW h)
0	0	0,03	262,8	0
1	0	0,248	2 172,48	0
2	10	0,279	2 444,04	24 440,4
3	70	0,212	1 857,12	129 998,4
4	150	0,135	1 182,6	177 390
5	250	0,06	525,6	131 400
6	390	0,027	236,52	92 242,8
7	790	0,009	78,84	62 283,6
8	1 295	0	0	0
9	1 445	0	0	0
10	1 465	0	0	0
				<b>617 755,2</b>

➤ **Fuente:** elaboración propia



## 5 > Referencias



1. IPCC. WGII AR5 Technical Summary. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* [Internet]. Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) [P. Aldunce, Ometto J.P., Raholijao N., Yasuhara K. (eds.)]; 2014. Disponible en: [http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-TS\\_FGDall.pdf](http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-TS_FGDall.pdf)
2. International Organization for Standardization. *ISO/Guide 73:2009(en) Risk management — Vocabulary* [Internet]. 2009. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:guide:73:ed-1:en>
3. GIZ. *The Vulnerability Sourcebook. Risk Supplement* [Internet]. 2017 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: [https://www.adaptationcommunity.net/?wfb\\_dl=203](https://www.adaptationcommunity.net/?wfb_dl=203)
4. Rome, Erich, et al. *IVAVIA. Guideline Impact and Vulnerability Analysis of Vital Infrastructures and built-up Areas* [Internet]. 2018. Disponible en: [http://www.resin-cities.eu/fileadmin/user\\_upload/IVAVIA\\_Guideline\\_v3\\_final\\_web.compressed.pdf](http://www.resin-cities.eu/fileadmin/user_upload/IVAVIA_Guideline_v3_final_web.compressed.pdf)
5. Senge PM. *La Quinta Disciplina: El Arte y la Practica de la Organizacion Abierta al Aprendizaje* [Internet]. Edición: 1. Argentina; México: Ediciones Granica, S.A.; 2012. 480 p. Disponible en: <https://www.univermedios.com/wp-content/uploads/2018/08/La-quinta-disciplina-Peter-Senge-.pdf>
6. GIZ, EURAC. *Suplemento de Riesgo del Libro de la Vulnerabilidad. Guía sobre cómo aplicar el enfoque del Libro de la Vulnerabilidad con el nuevo concepto de riesgo climático del IE5 del IPCC.* [Internet]. 2017. Disponible en: [https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2019/02/GIZ\\_Risk-Supplement\\_Spanish.pdf](https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2019/02/GIZ_Risk-Supplement_Spanish.pdf)
7. Gareth Harrison, Lucy Cradden, John P Chick. *Preliminary Assessment of Climate Change Impacts on the UK Onshore Wind Energy Resource* [Internet]. 2008 [citado 28 de marzo de 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/228662718\\_Preliminary\\_Assessment\\_of\\_Climate\\_Change\\_Impacts\\_on\\_the\\_UK\\_Onshore\\_Wind\\_Energy\\_Resource](https://www.researchgate.net/publication/228662718_Preliminary_Assessment_of_Climate_Change_Impacts_on_the_UK_Onshore_Wind_Energy_Resource)
8. Fundación Canal. *Agua, energía y cambio climático. Tecnologías de generación eléctrica a partir de la disponibilidad de recursos hídricos en escenarios de cambio climático* [Internet]. 2015. Disponible en: <http://www.fundacioncanal.com/libros-electronicos/agua-energia-cambio-climatico/index.html>
9. Rademaekers, Koen, Van der Laan, Jeroen. *Investment needs for future adaptation measures in EU nuclear power plants and other electricity generation technologies due to effects of climate change* [Internet]. 2011. Disponible en: [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2011\\_03\\_eur24769-en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2011_03_eur24769-en.pdf)
10. Carlos Tapia, Selma Guerreiro, Richard Dawson, Beñat Abajo, Chris Kilsby, Efrén Feliu, et al. *High level quantified assessment of key vulnerabilities and priority risks for urban areas in the EU* [Internet]. 2015 oct [citado 28 de marzo de 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/293619546\\_High\\_level\\_quantified\\_assessment\\_of\\_key\\_vulnerabilities\\_and\\_priority\\_risks\\_for\\_urban\\_areas\\_in\\_the\\_EU/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/293619546_High_level_quantified_assessment_of_key_vulnerabilities_and_priority_risks_for_urban_areas_in_the_EU/figures?lo=1)
11. Hai-Min Lyu, et al. *Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach.* *Sci Total Environ* [Internet]. 2018;626:1012-25. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718301608?via%3Dihub>
12. Sanne Muisa, et al. *Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data.* *Sci Total Environ* [Internet]. 2015;538:445-57. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715305714>
13. Enríquez de Salamanca Sánchez-Cámara, Alvaro, Díaz-Sierra, Ruben, Martín-Aranda, Rosa M., Santos, María J. *Environmental impacts of climate change adaptation.* *Environ Impact Assess Rev* [Internet]. 2017;64:87-96. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/315443341\\_Environmental\\_impacts\\_of\\_climate\\_change\\_adaptation](https://www.researchgate.net/publication/315443341_Environmental_impacts_of_climate_change_adaptation)
14. European Financing Institutions Working Group on Adaptation to Climate Change. *Integrating climate change information and adaptation in project development. Emerging Experience from Practitioners* [Internet]. 2016 [citado 7 de septiembre de 2018]. Disponible en: [https://www.nib.int/filebank/a/1464860521/1aa02d50b0d0a32744cc84e2a05b97a4/5497-2016\\_EUFIWACC\\_experience\\_for\\_practitioners.pdf](https://www.nib.int/filebank/a/1464860521/1aa02d50b0d0a32744cc84e2a05b97a4/5497-2016_EUFIWACC_experience_for_practitioners.pdf)
15. Olsen R, Ayyub B, Walker D, Barros A, Medina M, S. Vinson T, et al. *Adapting Infrastructure and Civil Engineering Practice to a Changing Climate.* 2015.
16. European Commission. *Guidelines for Project Managers: Making vulnerable investments climate resilient — Climate-ADAPT* [Internet]. 2013 [citado 17 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/publications/guidelines-for-project-managers-making-vulnerable-investments-climate-resilient>
17. Wilby, Robert L., Dessai, Suraje. *Robust adaptation to climate change.* *Weather* [Internet]. 2010;65(7):180-5. Disponible en: <https://rmet.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wea.543>
18. Dicovski Riobóo, Luis María. *Estadística Básica* [Internet]. 2008. Disponible en: [http://frq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/2101/mod\\_resource/content/0/DEPOSITO\\_DE\\_MATERIALES/estadistica1\\_1\\_.pdf](http://frq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/2101/mod_resource/content/0/DEPOSITO_DE_MATERIALES/estadistica1_1_.pdf)

19. Coles S, Pericchi LR, Sisson S. A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling. *J Hydrol* [Internet]. 1 de enero de 2003;273(1-4):35-50. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169402003530>
20. NOAA. Multivariate ENSO Index Version 2 [Internet]. 2019. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>
21. NOAA. Historical El Niño / La Niña episodes (1950-present) [Internet]. Climate Prediction Centre: Cold & Warm Episodes by Season. [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
22. Detlef P. van Vuuren, Edmonds, J., Kainuma, M., et al. The representative concentration pathways: an overview. *Clim Change* [Internet]. 2011; Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0148-z>
23. IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014 p. 32. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
24. ENES. CMIP5 Models and Grid Resolution [Internet]. CMIP5 Models and Grid Resolution. 2016 [citado 30 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://portal.enes.org/data/enes-model-data/cmip5/resolution>
25. Giorgi, Filippo, Gutowski Jr., William J. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annu Rev Environ Resour* [Internet]. 2015;40(467-490). Disponible en: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-environ-102014-021217>
26. UCAR. Network Common Data Form (NetCDF) [Internet]. [citado 19 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
27. World Meteorological Organization. Satellite Data Formats and Standards [Internet]. [citado 19 de agosto de 2019]. Disponible en: [http://www.wmo.int/pages/prog/sat/formatsandstandards\\_en.php](http://www.wmo.int/pages/prog/sat/formatsandstandards_en.php)
28. Knutti R, Masson D, Gettelman A. Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there. *Geophys Res Lett* [Internet]. 2013 [citado 27 de junio de 2019];40(6):1194-9. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/grl.50256>
29. Maraun D, Wetterhall F, Ireson AM, Chandler RE, Kendon EJ, Widmann M, et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev Geophys*. 24 de septiembre de 2010;48(3):RG3003-34.
30. Maraun D. Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue. *J Clim*. marzo de 2013;26(6):2137-43.
31. Maraun D, Widmann M, Gutiérrez JM, Kotlarski S, Chandler RE, Hertig E, et al. VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earths Future*. 1 de enero de 2015;3(1):1-14.
32. Maraun D. Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Curr Clim Change Rep*. 26 de octubre de 2016;1-10.
33. Maraun D, Shepherd TG, Widmann M, Zappa G, Walton D, Gutiérrez JM, et al. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nat Clim Change*. 2 de noviembre de 2017;7(11):664-773.
34. Maraun D, Huth R, Gutiérrez JM, Martín DS, Dubrovsky M, Fischer A, et al. The VALUE perfect predictor experiment: evaluation of temporal variability. *Int J Climatol* [Internet]. 2017 [citado 10 de noviembre de 2018];0(0). Disponible en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5222>
35. Charron, I., et al. Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions [Internet]. 2016 [citado 10 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/Guidebook-2016.pdf>
36. Yuan-Fong Su, et al. Bias Correction of MRI-WRF Dynamic Downscaling Datasets. *Terr Atmos Ocean Sci*. octubre de 2016;27(5):649-57.
37. Akaike, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans Autom Control* [Internet]. diciembre de 1974;19(6):716-23. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-1694-0\\_16](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-1694-0_16)
38. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Oceanic and Atmospheric Administration [Internet]. [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://www.noaa.gov/>
39. Jenner L. GPM - Global Precipitation Measurement [Internet]. NASA. 2015 [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/GPM/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/main/index.html)
40. Saha S, Moorthi S, Pan H-L, Wu X, Wang J, Nadiga S, et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull Am Meteorol Soc*. 23 de abril de 2010;91(8):1015-58.
41. National Aeronautics and Space Administration. MERRA-2 [Internet]. [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>
42. Guillory A. ERA5 [Internet]. ECMWF. 2017 [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

43. National Center for Atmospheric Research(Eds). Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) [Internet]. Climate Data. 2017 [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>
44. ESRL. NCEP/NCAR Reanalysis 1: Summary [Internet]. NCEP/NCAR Reanalysis 1: Summary. [citado 9 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>
45. Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. CMIP5 - Overview [Internet]. [citado 30 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://cmip.llnl.gov/cmip5/>
46. IPCC. IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,: Cambridge University Press,; 2014 p. 1-32.
47. Earth System Grid Federation. ESGF Home Page [Internet]. [citado 30 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://esgf.llnl.gov/>
48. World Climate Research Programme. CMIP Phase 6 [Internet]. CMIP Phase 6 (CMIP6). Disponible en: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>
49. Varios autores. Cordex – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment [Internet]. [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <http://www.cordex.org/>
50. National Aeronautics and Space Administration. Advancing Research and Applications with NASA Climate Model Data [Internet]. NASA Climate Data Services. [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://www.nas.nasa.gov/SC14/demos/demo30.html>
51. Copernicus Climate Change Service. The Climate Data Store [Internet]. [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://climate.copernicus.eu/climate-data-store>
52. IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Final Draft IPCC WGII AR5 [Internet]. 2014 p. 2593. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
53. IDEAM. 3ra Comunicación Cambio Climático - IDEAM [Internet]. 2017 [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <http://www.cambioclimatico.gov.co/3ra-comunicacion-cambio-climatico>
54. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático - Capítulo 3: Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones [Internet]. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación; 2016. Disponible en: <https://www.argentina.gov.ar/ambiente/sustentabilidad/cambioclimatico/comunicacionnacional/tercera/modelos>
55. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería Colombia. Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones– Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. [Internet]. 2015. Disponible en: [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento\\_nacional\\_departamental.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departamental.pdf)
56. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería de Colombia. Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. [Internet]. 2015. Disponible en: <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/escenarios-de-cambio-climatico-2015.pdf>
57. Ministerio del Ambiente (Perú). El Perú y el Cambio Climático - Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre Cambio Climático [Internet]. 2016. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/natc/pernc3.pdf>
58. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Fondo Mundial para el Medio Ambiente. Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela [Internet]. 2005. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/vennc01.pdf>
59. Ray, Patrick A., et al. Multidimensional stress test for hydropower investments facing climate, geophysical and financial uncertainty. *Glob Environ Change* [Internet]. 2017;48:168-81. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.013>
60. Jorge Paz, Manuel del Jesus, Rafael Kelman, Salvador Navas, Lucas Okamura, Efrén Feliu. Vulnerabilidad al cambio climático y medidas de adaptación de los sistemas hidroeléctricos en los países andinos [Internet]. Banco Interamericano de Desarrollo; 2019. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/vulnerabilidad-al-cambio-climatico-y-medidas-de-adaptacion-de-los-sistemas-hidroelectricos-en-los>
61. Shankar N. Chandramowli. Impact of Climate Change on Electricity Systems and Markets - A Review of Models and Forecasts. *Sustain Energy Technol Assess* [Internet]. 2014 [citado 3 de abril de 2019];5. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138813000805>
62. Hdidouan D, Staffell I. The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. *Renew Energy* [Internet]. 2017 [citado 9 de octubre de 2018];101:575-92. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116307856>

- 63.** Riahi, Keywan. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob Environ Change* [Internet]. 2017;42(January):153-68. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300681?via%3Dihub>
- 64.** O'Neill, Brian C., et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. 2015; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095937801500060?via%3Dihub>
- 65.** IIASA Energy Program. SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 1.1 [Internet]. Disponible en: <https://tntcat.iiasa.ac.at/>
- 66.** Schwartz MW. Using niche models with climate projections to inform conservation management decisions. *Biol Conserv* [Internet]. 2012 [citado 26 de noviembre de 2018];155:149-56. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320712002807>
- 67.** Garcia RA, Cabeza M, Rahbek C, Araújo MB. Multiple Dimensions of Climate Change and Their Implications for Biodiversity. *Science* [Internet]. 2014 [citado 26 de noviembre de 2018];344(6183):1247579. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/344/6183/1247579>
- 68.** Hughes L, Cawsey EM, Westoby M. Climatic Range Sizes of Eucalyptus Species in Relation to Future Climate Change. *Glob Ecol Biogeogr Lett* [Internet]. 1996 [citado 26 de noviembre de 2018];5(1):23-9. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/2997467>
- 69.** Ramirez-Villegas J, Salazar M, Jarvis A, Navarro-Racines CE. A way forward on adaptation to climate change in Colombian agriculture: perspectives towards 2050. *Clim Change* [Internet]. 1 de diciembre de 2012 [citado 26 de noviembre de 2018];115(3):611-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0500-y>
- 70.** Solano-Peralt, Mauricio. Estado actual de la energía solar fotovoltaica en Latinoamérica y el Caribe [Internet]. 2015. Disponible en: <http://expertosenred.olade.org/wp-content/uploads/sites/7/2015/04/ESTADO-ACTUAL-ENERGIA-SOLAR-LAC-ER.pdf>
- 71.** Roshen Tariq Ahmed Hamdi. Humidity impact on photovoltaic cells performance: A review. *Int J Recent Eng Res Dev IJREERD* [Internet]. 2018 [citado 20 de agosto de 2019];03(11):27-37. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/329425029\\_Humidity\\_impact\\_on\\_photovoltaic\\_cells\\_performance\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/329425029_Humidity_impact_on_photovoltaic_cells_performance_A_review)
- 72.** Julia A. Crook. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *ResearchGate* [Internet]. 2011 [citado 9 de octubre de 2018]; Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/255752213\\_Climate\\_change\\_impacts\\_on\\_future\\_photovoltaic\\_and\\_concentrated\\_solar\\_power\\_energy\\_output](https://www.researchgate.net/publication/255752213_Climate_change_impacts_on_future_photovoltaic_and_concentrated_solar_power_energy_output)
- 73.** Seth B. Darling, Fengqi You, Fengqi You, Thomas Veselka. Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics. *Energy Environ Sci* [Internet]. [citado 2 de abril de 2019]; Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/255748938\\_Assumptions\\_and\\_the\\_levelized\\_cost\\_of\\_energy\\_for\\_photovoltaics](https://www.researchgate.net/publication/255748938_Assumptions_and_the_levelized_cost_of_energy_for_photovoltaics)
- 74.** Jerez S, Tobin I, Vautard R, Montávez JP, López-Romero JM, Thais F, et al. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nat Commun* [Internet]. 2015 [citado 9 de octubre de 2018];6(1). Disponible en: <http://www.nature.com/articles/ncomms10014>
- 75.** Panagea IS, Tsanis IK, Koutroulis AG, Grillakis MG. Climate Change Impact on Photovoltaic Energy Output: The Case of Greece [Internet]. *Advances in Meteorology*. 2014 [citado 2 de abril de 2019]. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/amete/2014/264506/>
- 76.** K.Brunker, et al. A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. noviembre de 2011 [citado 2 de abril de 2019];15(9):4470-82. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/304090739\\_A\\_Review\\_of\\_Solar\\_Photovoltaic\\_Levelized\\_Cost\\_of\\_Electricity](https://www.researchgate.net/publication/304090739_A_Review_of_Solar_Photovoltaic_Levelized_Cost_of_Electricity)
- 77.** The European Wind Energy Association. Wind Energy. The facts [Internet]. Disponible en: <https://www.wind-energy-the-facts.org/best-practice-for-accurate-wind-speed-measurements.html>
- 78.** Danish Wind Industry Association. Conceptos de energía eólica [Internet]. 2003 [citado 3 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#roughness>
- 79.** Suad Hassan Danook. The impact of humidity on performance of wind turbine. 2019;14. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19300589>
- 80.** Paredes, J. Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: Complementariedad en Colombia [Internet]. 2017. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/17221/energias-renovables-variables-y-su-contribucion-la-seguridad-energetica>
- 81.** Olauson, Jon. ERA5: The new champion of wind power modelling? *Renew Energy* [Internet]. 2018;126. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/320084119\\_ERA5\\_The\\_new\\_champion\\_of\\_wind\\_power\\_modelling](https://www.researchgate.net/publication/320084119_ERA5_The_new_champion_of_wind_power_modelling)
- 82.** Stadler S, Dryden JM, Greene JS. Climate Change Impacts on Oklahoma Wind Resources: Potential Energy Output Changes. *Resources* [Internet]. junio de 2015 [citado 2 de abril de 2019];4(2):203-26. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-9276/4/2/203>

- 83.** Tobin I, Vautard R, Balog I, Bréon F-M, Jerez S, Ruti P, et al. Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections. *Clim Change* [Internet]. 2015;128(1-2):99-122. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/269468084\\_Assessing\\_climate\\_change\\_impacts\\_on\\_European\\_wind\\_energy\\_from\\_ENSEMBLES\\_high-resolution\\_climate\\_projections](https://www.researchgate.net/publication/269468084_Assessing_climate_change_impacts_on_European_wind_energy_from_ENSEMBLES_high-resolution_climate_projections)
- 84.** MacLeod D, Torralba V, Davis M, Doblas-Reyes F. Transforming climate model output to forecasts of wind power production: how much resolution is enough?: Transforming climate model output to wind power forecasts. *Meteorol Appl* [Internet]. 2018 [citado 2 de abril de 2019];25(1):1-10. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/met.1660>
- 85.** Alvarez Marivela, Nieves. Proyecto de diseño, construcción y explotación de un parque eólico [Internet]. 2009. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/190932972/PFC-Nieves-Alvarez-Marivela>
- 86.** Sara C Pryor, et al. Analyses of possible changes in intense and extreme wind speeds over Northern Europe under climate change scenarios. *Clim Dyn* [Internet]. 2012 [citado 26 de noviembre de 2018];38:189-208. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/227303071\\_Analyses\\_of\\_possible\\_changes\\_in\\_intense\\_and\\_extreme\\_wind\\_speeds\\_over\\_Northern\\_Europe\\_under\\_climate\\_change\\_scenarios](https://www.researchgate.net/publication/227303071_Analyses_of_possible_changes_in_intense_and_extreme_wind_speeds_over_Northern_Europe_under_climate_change_scenarios)
- 87.** Pryor SC, Barthelmie RJ. Climate change impacts on wind energy: A review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 1 de enero de 2010 [citado 9 de octubre de 2018];14(1):430-7. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001713>
- 88.** Mölter T, Schindler D, Albrecht AT, Kohnle U. Review on the Projections of Future Storminess over the North Atlantic European Region. *Atmosphere* [Internet]. abril de 2016 [citado 2 de abril de 2019];7(4):60. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4433/7/4/60>
- 89.** Holbein T. IEA Wind TCP Recommended Practice 13 2nd Edition: Wind Energy in Cold Climates. :49. Disponible en: <https://community.ieawind.org/publications/rp>
- 90.** MohamedAbbes, Jamel Belhadj. Development of a methodology for wind energy estimation and wind park design. *J Renew Sustain Energy* [Internet]. 2014 [citado 2 de abril de 2019];6(053103). Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/265685968\\_Development\\_of\\_a\\_methodology\\_for\\_wind\\_energy\\_estimation\\_and\\_wind\\_park\\_design](https://www.researchgate.net/publication/265685968_Development_of_a_methodology_for_wind_energy_estimation_and_wind_park_design)
- 91.** Agencia Andaluza de la Energía. Guía técnica: Energía Minieólica [Internet]. 2011 [citado 2 de abril de 2019]. Disponible en: [https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/guia\\_tecnica\\_energia\\_minieolica.pdf](https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/guia_tecnica_energia_minieolica.pdf)
- 92.** Nachtergaele FO, et al. Harmonized World Soil Database [Internet]. Harmonized World Soil Database. 2009 [citado 21 de agosto de 2019]. Disponible en: <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/8958/>
- 93.** International Food Policy Research Institute. Global high-resolution soil profile database for crop modeling applications [Internet]. [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: <http://www.ifpri.org/publication/global-high-resolution-soil-profile-database-crop-modeling-applications>
- 94.** Gayathri K.Devia, et al. A Review on Hydrological Models. *Aquat Procedia* [Internet]. 2015;4. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15001273>
- 95.** Biswas, Asit K. Some thoughts on estimating spillway design flood. *Hydrol Sci J* [Internet]. 1971;16(4):63-72. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02626667109493786>
- 96.** Leslie, Jacques. In an Era of Extreme Weather, Concerns Grow Over Dam Safety [Internet]. 2019 [citado 8 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://e360.yale.edu/features/in-an-era-of-extreme-weather-concerns-grow-over-dam-safety>
- 97.** Le Page, Michael. The world's ageing dams are not built for ever more extreme weather [Internet]. 2019 [citado 8 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.newscientist.com/article/2212427-the-worlds-ageing-dams-are-not-built-for-ever-more-extreme-weather/>
- 98.** Hari Prasad Neopane. Sediment erosion in Hydro Turbines [Internet]. Norwegian University of Science and Technology (NTNU).; 2010. Disponible en: [http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/233519/326677\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1](http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/233519/326677_FULLTEXT01.pdf?sequence=1)
- 99.** Biraj SinghThapa, BholaThapa, Ole G.Dahlhaug. Empirical modelling of sediment erosion in Francis turbines. *Energy* [Internet]. 2012;41(1):386-91. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212001806>
- 100.** Bajracharya, T.R., Acharya, B., Joshi, C.B., Saini, R.P., Dahlhaug, O.G. Sand erosion of Pelton turbine nozzles and buckets: A case study of Chilime Hydropower Plant. *Wear* [Internet]. 2008;264(3-4):177-84. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164807004279>
- 101.** Rai AKR, Kumar A. Analyzing hydro abrasive erosion in Kaplan turbine: A case study from India. *J Hydrodyn Ser B* [Internet]. 1 de octubre de 2016 [citado 8 de mayo de 2019];28(5):863-72. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100160581660687X>
- 102.** Lentini, Emilio. El futuro de los servicios de agua y saneamiento en América Latina. Desafíos de los operadores de áreas urbanas de más de 300.000 habitantes. [Internet]. Banco Interamericano de Desarrollo; 2015 [citado 22 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15452/el-futuro-de-los-servicios-de-agua-y-saneamiento-en-america-latina-desafios-de>

- 103.** McKee, T.B, et al. Eighth Conference on Applied Climatology. En Anaheim, California.; 1993. Disponible en: [ccc.atmos.colostate.edu/relationshipofdroughtfrequency.pdf](http://ccc.atmos.colostate.edu/relationshipofdroughtfrequency.pdf).
- 104.** Lloyd-Hughes, Benjamin, Saunders, Mark A. A drought climatology for Europe. *Int J Climatol* [Internet]. 17 de junio de 2002;22(13):1571-92. Disponible en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.846>
- 105.** Alexander, L.V, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Clim Dyn* [Internet]. 2006;111(D5). Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JD006290>
- 106.** Aiguo Dai. Drought Under Global Warming: A Review. *WIREs Clim Change* [Internet]. 2010;2(1):45-65. Disponible en: [http://www.cgd.ucar.edu/cas/ada/papers/Dai-drought\\_WIRES2010.pdf](http://www.cgd.ucar.edu/cas/ada/papers/Dai-drought_WIRES2010.pdf)
- 107.** Burke, Eleanor, Brown, Simon J. Evaluating Uncertainties in the Projection of Future Drought. *J Hydrometeorol* [Internet]. 2008;9(2):292-9. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/2007JHM929.1>
- 108.** Guerreiro, Selma, et al. Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environ Res Lett* [Internet]. 2018;13(3). Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/323296484\\_Future\\_heat-waves\\_droughts\\_and\\_floods\\_in\\_571\\_European\\_cities](https://www.researchgate.net/publication/323296484_Future_heat-waves_droughts_and_floods_in_571_European_cities)
- 109.** Angelos N. Findikakis, Kamal El kadi Abderrezzak. Reservoir sedimentation: challenges and management strategies. *hydrolink* [Internet]. 2018;3/2018:66. Disponible en: <https://iahr.org/PDF/Journals/Hydrolink/2018%20issue3%20free%20access/Editorial.pdf>
- 110.** Ahmed Moustafa A. Moussa. Solving the problem of sedimentation at water intake of Rowd El-Farag pump station using 2D model. *Ain Shams Eng J* [Internet]. 2010;1(2):103-14. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447911000037>
- 111.** Peréa Serrano, Rodrigo Otávio, et al. Case study: Effects of sediment concentration on the wear of fluvial water pump impellers on Brazil's Acre River. *Wear* [Internet]. agosto de 2018;408-409(15):131-7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164817317131?viewFullText=true>
- 112.** Zhengjing Shen, et al. Sediment erosion in the impeller of a double-suction centrifugal pump – A case study of the Jingtai Yellow River Irrigation Project, China. *Wear* [Internet]. 2019;269-79. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164818311657>
- 113.** Comisión Nacional del Agua (México). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos Para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado [Internet]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Desconocida [citado 22 de agosto de 2019]. Disponible en: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>
- 114.** Magalhaes, Antonio. Towards national drought policies in Latin America and the Caribbean Region. White paper. [Internet]. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD); 2018 [citado 23 de agosto de 2019]. Disponible en: [https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2018-04/LAC\\_drought\\_white\\_paper\\_0.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2018-04/LAC_drought_white_paper_0.pdf)
- 115.** Meza, Laura, Corso, Sandrine, Soza, Sebastián. Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile. Estudio Piloto sobre la Vulnerabilidad y la Gestión Local del Riesgo [Internet]. FAO; 2010. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-as447s.pdf>
- 116.** Reed, B., Shaw, R., Chatterton, K. Technical notes on drinking-water, sanitation and hygiene in emergencias. [Internet]. World Health Organization (WHO), Water, Engineering and Development Centre (WEDC); 2013 [citado 28 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/1825>
- 117.** Torres-Navarro, Carlos Alonso, Malta-Callegeri, Nelson, Arriagada-Vergara, Rocío, Rocío Arriagada-Vergara. Metodología para cuantificar costos de distribución de agua potable en zonas rurales. *Ing Ind* [Internet]. 2019 [citado 28 de agosto de 2019];40(1):88-96. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rii/v40n1/1815-5936-rii-40-01-88.pdf>
- 118.** European Environment Agency. Adaptation of transport to climate change in Europe [Internet]. 2014. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/adaptation-of-transport-to-climate>
- 119.** C40 Knowledge Hub. Reducing climate change impacts on mass transit [Internet]. 2019 [citado 11 de diciembre de 2019]. Disponible en: [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Reducing-climate-change-impacts-on-mass-transit?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Reducing-climate-change-impacts-on-mass-transit?language=en_US)
- 120.** RESIN-H2020 [Internet]. 2018. Disponible en: <http://www.resin-cities.eu>
- 121.** Agnew M., Goodess, C. RL11.2 Common Tools and Central Datasets: Developing a conceptual framework [Internet]. CIRCE project, <http://www.circeproject.eu/>; 2016 [citado 30 de noviembre de 2016]. Disponible en: [https://crudata.uea.ac.uk/projects/circe/concept\\_framework\\_2ndDRAFT.doc](https://crudata.uea.ac.uk/projects/circe/concept_framework_2ndDRAFT.doc)
- 122.** Gariano, Stefano Luigi. Landslides in a changing climate. *Earth-Sci Rev* [Internet]. 2016;162(Noviembre 2016):227-52. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825216302458?viewFullText=true>

- 123.** Escobar Potes, et al. Geotecnia para el trópico andino [Internet]. Universidad Nacional de Colombia; 2016. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>
- 124.** Crozier, M.J. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology* [Internet]. diciembre de 2010;124(3-4):260-7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10001881?via%3Dihub>
- 125.** Ouyang M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliab Eng Syst Saf* [Internet]. enero de 2014 [citado 12 de noviembre de 2015];121:43-60. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832013002056>
- 126.** Michelle Davis. Power Failure. How Climate Change Puts Our Electricity at Risk and What We Can Do [Internet]. 2014 [citado 12 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ucsus.org/resources/power-failure>
- 127.** University of Bath et al. The ECONADAPT Toolbox - Economics for adaptation and decision-making [Internet]. [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://econadapt-toolbox.eu/>
- 128.** David N. Bresch, Lea Mueller. Climada: The open-source Economics of Climate Adaptation (ECA) tool | PreventionWeb.net [Internet]. [citado 9 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://github.com/davidnbresch/climada/wiki>
- 129.** The European Climate Adaptation Platform (Climate-ADAPT). The Urban Adaptation Support Tool [Internet]. 2019. Disponible en: <http://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/urban-ast/step-0-0>
- 130.** Marjolijn Haasnoot, et al. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Glob Environ Change* [Internet]. 2013;23(2):485-98. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095937801200146X>
- 131.** The ECONADAPT consortium. ECONADAPT Toolbox: Methods [Internet]. [citado 11 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://econadapt-toolbox.eu/methods>
- 132.** Kwakkel JH, Haasnoot M, Walker WE. Comparing Robust Decision-Making and Dynamic Adaptive Policy Pathways for model-based decision support under deep uncertainty. *Environ Model Softw* [Internet]. 1 de diciembre de 2016 [citado 18 de septiembre de 2018];86:168-83. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216307186>
- 133.** Sherman, Peter, Chen, Xinyu, McElroy, Michael B. Wind-generated Electricity in China: Decreasing Potential, Inter-annual Variability and Association with Changing Climate Scientific Reports volume 7, Article number: 16294 (2017) | Download Citation. *Sci Rep* [Internet]. 2017;7. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-16073-2>
- 134.** Karnauskas, Kristopher B., et al. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. *Nat Geosci* [Internet]. 2017;11(2017):38-43. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41561-017-0029-9>
- 135.** International Energy Agency. Making the energy sector more resilient to climate change [Internet]. 2015. Disponible en: [www.iea.org](http://www.iea.org)
- 136.** Enríquez de Salamanca Sánchez-Cámara Á. Consideración del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras lineales de transporte. 2017 [citado 29 de agosto de 2019]; Disponible en: <http://e-spacio.uned.es/fez/view/tesisuned:ED-Pg-Ciencias-Aenriquez>
- 137.** IPCC. Annex II: Glossary In: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. [Internet]. Geneva, Switzerland: IPCC; 2014 [citado 19 de julio de 2018]. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_Glossary.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_Glossary.pdf)
- 138.** Feliu, E., García, G., Gutierrez, L., Abajo, B., Mendizabal, M., Tapia, C., et al. Guía para la elaboración de Planes Locales de Adaptación al Cambio Climático. Volumen II: Bloque 3. Herramientas y metodologías [Internet]. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid; 2015 [citado 26 de octubre de 2016]. Disponible en: [http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/guia\\_local\\_para\\_adaptacion\\_cambio\\_climatico\\_en\\_municipios\\_espanoles\\_vol\\_2\\_fcm7-430401.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/guia_local_para_adaptacion_cambio_climatico_en_municipios_espanoles_vol_2_fcm7-430401.pdf)
- 139.** IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014. 688 p.
- 140.** IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014 [citado 28 de enero de 2016]. Disponible en: [https://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIAR5-PartA\\_FINAL.pdf](https://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIAR5-PartA_FINAL.pdf)
- 141.** Naden, Clare. Building standards for the future we want [Internet]. 2018. Disponible en: <https://www.iso.org/news/ref2289.html>
- 142.** Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. [Internet]. Montreal; 2009 [citado 19 de julio de 2018] p. No. 41, 126 pages. (Technical Series). Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-41-en.pdf>

- 143.** International Organization for Standardization (ISO). Draft International Standard - ISO/DIS 14090. Adaptation to climate change. Principles, requirements and guidelines. 2018.
- 144.** GIZ. The Vulnerability Sourcebook. Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments [Internet]. 2014 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: [https://www.adaptationcommunity.net/?wpcf\\_d=203](https://www.adaptationcommunity.net/?wpcf_d=203)
- 145.** Lemos MC, Agrawal A, Eakin HC, Nelson, D.R., Engle NL, Johns O. Building Adaptive Capacity to Climate Change in Less Developed Countries [Internet]. In: G. R. Asrar and J. W. Hurrell (eds.). Climate Science for Serving Society: Research, Modeling and Prediction Priorities. Springer Netherlands. 2013 [citado 17 de julio de 2017]. pp. 437-457. Disponible en: [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/wcrp\\_2011-lemos.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/wcrp_2011-lemos.pdf)
- 146.** IPCC. Informe Especial del IPCC sobre Uso de la Tierra, Cambio de Uso y Silvicultura [Internet]. 2000 [citado 20 de julio de 2018]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-sp.pdf>
- 147.** IPCC, Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug T, Kruger, D., et al. Definitions and Methodological Options to Inventory Emissions from Direct Human-Induced Degradation of Forests and Devegetation of Other Vegetation Types. [Internet]. 2013 [citado 20 de julio de 2018]. Disponible en: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf\\_files/Task2/Degradation\\_cover.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/Task2/Degradation_cover.pdf)
- 148.** World Commission on Environment and Development. World Commission on Environment and Development, 1987 [Internet]. World Commission on Environment and Development; [citado 19 de julio de 2018]. Report No.: Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 1987. Disponible en: [http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/PoliticaExteriorCooperacion/Desarrollosostenible/Documents/Informe%20Brundtland%20\(En%20ingl%C3%A9s\).pdf](http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/PoliticaExteriorCooperacion/Desarrollosostenible/Documents/Informe%20Brundtland%20(En%20ingl%C3%A9s).pdf)
- 149.** Walter V. Reid, et al. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being [Internet]. Island Press (Washington, DC); 2005. Disponible en: <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>
- 150.** IPCC. Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones. Resumen para responsables de políticas. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC [Internet]. 2000. Disponible en: <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>
- 151.** ISO. ISO DIS 14090 [Internet]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/68507.html>
- 152.** Anónimo. Período de retorno. En: Wikipedia, la enciclopedia libre [Internet]. 2018 [citado 20 de julio de 2018]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Per%C3%ADodo\\_de\\_retorno&oldid=107147166](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Per%C3%ADodo_de_retorno&oldid=107147166)
- 153.** Annika E. Nilsson, Arctic Council. Arctic Resilience Interim Report 2013. [Internet]. Stockholm: Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre; 2013 [citado 19 de julio de 2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/146098796/ArcticResilienceInterimReport2013-LowRes>
- 154.** Richard Moss, Mustafa Babiker, Sander Brinkman, Eduardo Calvo, Tim Carter, Jae Edmonds, Ismail Elgizouli, Seita Emori, Lin Erda, Kathy Hibbard, Roger Jones, Mikiko Kainuma, Jessica Kelleher, Jean Francois Lamarque, Martin Manning, Ben Matthews, Jerry Meehl, Leo Meyer, John Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Brian O'Neill, Ramon Pichs, Keywan Riahi, Steven Rose, Paul Runci, Ron Stouffer, Detlef van Vuuren, John Weyant, Tom Wilbanks, Jean Pascal van Ypersele, and Monika Zurek, 2008. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies . Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 25 pp [Internet]. [citado 19 de julio de 2018]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios.pdf>
- 155.** Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature [Internet]. 11 de febrero de 2010;463:747. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nature08823>
- 156.** IPCC. Annex I: Glossary. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [Internet]. IPCC; 2018. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15\\_AnnexI\\_Glossary.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_AnnexI_Glossary.pdf)
- 157.** Swiss Re. Economics of Climate Adaptation | Swiss Re - Leading Global Reinsurer [Internet]. 2015 [citado 9 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.swissre.com/eca/>
- 158.** Hinkel, Jochen, Bharwani, Sukaina, Bisaro, Alexander, Carter, Timothy, Tracy Cull, Davis, Marion, et al. PROVIA Guidance on Assessing Vulnerability, Impacts and Adaptation to Climate Change | UNDP's Climate Change Adaptation Portal [Internet]. 2013 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: /resources/training-tools/provia-guidance-assessing-vulnerability-impacts-and-adaptation-climate
- 159.** Universidad de Los Andes (Colombia). CAPRA. Probabilistic Risk Assessment Platform [Internet]. 2018 [citado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://ecapra.org/>
- 160.** Partnership for Resilience and Preparedness (PREP). Visualizing data to build climate resilience [Internet]. 2016 [citado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.prepdata.org/>

- 161.** Agus Wibowo, Charlotte Morgan, Vivien Deparday, Tim Sutton. InaSAFE [Internet]. 2018 [citado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://inasafe.org/>
- 162.** Hamden, Rohan, Mallon, Karl, Lamb, Jackie. XDI - Home [Internet]. [citado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://xdi.systems/>
- 163.** UNFCCC. Cancun Adaptation Framework | United Nations System Chief Executives Board for Coordination [Internet]. [citado 10 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.unsystem.org/content/unfccc-cancun-adaptation-framework>
- 164.** Forzieri, Giovanni, Bianchi, Alessandra, Marín Herrera, Mario Alberto, Batista e Silva, Filipe, Feyen, Luc, Lavallo, Carlo. Resilience of large investments and critical infrastructures in Europe to climate change - EU Science Hub - European Commission [Internet]. EU Science Hub. 2015 [citado 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/resilience-large-investments-and-critical-infrastructures-europe-climate-change>
- 165.** Acclimatise, Four Twenty Seven, Climate Finance Advisors. Lenders guide for considering climate risk in infrastructure investments [Internet]. 2018 [citado 7 de septiembre de 2018]. Disponible en: [http://www.adaptationlearning.net/sites/default/files/resource-files/Investment%20Guide\\_1.8%20single%20hi-q\\_17012018.pdf](http://www.adaptationlearning.net/sites/default/files/resource-files/Investment%20Guide_1.8%20single%20hi-q_17012018.pdf)
- 166.** Luskova, Maria, Leitner, Bohus, Sventekova, Eva, Dvorak, Zdenek. Research of Extreme Weather Impact on Critical Infrastructure. 2018 [citado 7 de septiembre de 2018]; Disponible en: <http://bk.bgk.uniobuda.hu/index.php/BK/article/view/19/16>
- 167.** European Commission. Climate Change and Major Projects. Outline of the climate change related requirements and guidance for major projects in the 2014-2020 programming period [Internet]. 2016 [citado 10 de septiembre de 2018]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/major\\_projects\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/major_projects_en.pdf)
- 168.** Mazzacurati et al. Four Twenty Seven y Acclimatise para el European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). Advancing TCFD Guidance on Physical climate Risks and opportunities [Internet]. 2018 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: [http://427mt.com/wp-content/uploads/2018/05/EBRD-GCECA\\_final\\_report.pdf](http://427mt.com/wp-content/uploads/2018/05/EBRD-GCECA_final_report.pdf)
- 169.** European Commission. Adapting infrastructure to climate change — Climate-ADAPT [Internet]. 2013 [citado 11 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/publications/adapting-infrastructure-to-climate-change>
- 170.** United Nations Development Programme. Paving the Way for Climate-Resilient Infrastructure: Guidance for Practitioners and Planners [Internet]. 2011 [citado 12 de septiembre de 2018]. Disponible en: [https://www.uncclearn.org/sites/default/files/inventory/undp\\_paving\\_the\\_way.pdf](https://www.uncclearn.org/sites/default/files/inventory/undp_paving_the_way.pdf)
- 171.** Wilbanks TJ, Fernandez S, editores. Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and Vulnerabilities [Internet]. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics; 2014 [citado 13 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.5822/978-1-61091-556-4>
- 172.** USAID. Climate Risk Management for USAID Projects and Activities - A Mandatory Reference for ADS Chapter 201. 2017;25. Disponible en: <https://www.usaid.gov/ads/policy/200/201mal>
- 173.** Asian Development Bank. Climate Proofing: A Risk-based Approach to Adaptation. 2005;219. Disponible en: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/28796/climate-proofing.pdf>
- 174.** JASPERS Climate Change team. The Basics of Climate Change Adaptation, Vulnerability and Risk Assessment [Internet]. 2017 [citado 17 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.jaspersnetwork.org/plugins/servlet/documentRepository/displayDocumentDetails?documentId=381>
- 175.** UNFCCC. Assessing the Costs and Benefits of Adaptation Options. An Overview of Approaches. 2011.
- 176.** Grafakos, Stelios, Olivotto, Veronica. Choosing the right Adaptation Assessment Method. En 2012 [citado 18 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://docplayer.net/36742746-Choosing-the-right-adaptation-assessment-method.html>
- 177.** USAID. From Assessment to Implementation: Approaches for Adaptation Options Analysis [Internet]. 2013 [citado 18 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.climatelinks.org/resources/assessment-implementation-approaches-adaptation-options-analysis>
- 178.** Banco Interamericano de Desarrollo. Resumen ejecutivo de la Metodología de Evaluación del Riesgo de Desastres y Cambio Climático [Internet]. 2019. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/resumen-ejecutivo-de-la-metodologia-de-evaluacion-del-riesgo-de-desastres-y-cambio-climatico>
- 179.** CLIMsystems. Climate impact and adaptation software and services [Internet]. [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.climsystems.com/>
- 180.** Consorcio del proyecto RASOR. RASOR Platform [Internet]. [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.rasor.eu/rasor/>
- 181.** Cima Foundation, Athena Global, Acrotec, Sertit, Deltares, EUCentre, et al. RASOR Project [Internet]. [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.rasor-project.eu/>
- 182.** Ebinger J, Vergara W. Climate impacts on energy systems : key issues for energy sector adaptation [Internet]. The World Bank; 2011 [citado 10 de octubre de 2018] p. 1-224. Report No.: 60051. Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/580481468331850839/Climate-impacts-on-energy-systems-key-issues-for-energy-sector-adaptation>

- 183.** Copernicus Climate Change Service. European Climatic Energy Mixes (ECEM) [Internet]. Disponible en: <http://ecem.wemcouncil.org/>
- 184.** Copernicus Climate Change Service. CLIM4ENERGY [Internet]. Disponible en: <http://c4e-visu.ipsl.upmc.fr/>
- 185.** European Climate Foundation (ECF), World Energy Council (Consejo Mundial de la Energía, WEC), Universidad de Cambridge. Cambio Climático: Implicaciones para el Sector Energético [Internet]. Disponible en: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/06/Publicacion-Cambio-Climatico-implicaciones-para-el-sector-energetico-IPCCC-AR5.pdf>
- 186.** IPIECA. Addressing adaptation in the oil and gas industry [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.iecea.org/news/addressing-adaptation-in-the-oil-and-gas-industry/>
- 187.** Unidad de Planeación Minero Energética. Estudio para determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático. [Internet]. 2013 [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: [http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Documents/vulnerabilidad\\_opciones\\_adaptacion\\_sector\\_energetico\\_colombiano\\_frente\\_cambio\\_climatico.pdf](http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Documents/vulnerabilidad_opciones_adaptacion_sector_energetico_colombiano_frente_cambio_climatico.pdf)
- 188.** IFC. Hydroelectric Power: A Guide for Developers and Investors [Internet]. 2015 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/Topics\\_Ext\\_Content/IFC\\_External\\_Corporate\\_Site/Sustainability-At-IFC/Publications/Hydroelectric\\_Power\\_A\\_Guide\\_for\\_Developers\\_and\\_Investors](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/Topics_Ext_Content/IFC_External_Corporate_Site/Sustainability-At-IFC/Publications/Hydroelectric_Power_A_Guide_for_Developers_and_Investors)
- 189.** IFC-WBG. Environmental, Health, and Safety approaches for Hydropower projects. IFC-WBG. [Internet]. 2018 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/cefc36ec-9916-4ec4-b5ac-1d99602a3ef3/GPN\\_EHSHydropower.pdf?MOD=AJPERES](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/cefc36ec-9916-4ec4-b5ac-1d99602a3ef3/GPN_EHSHydropower.pdf?MOD=AJPERES)
- 190.** Brown C, King J, Hughes J. Good Practice Handbook on Environmental Flows for Hydropower Projects. 2018.
- 191.** Jha AK, Bloch R, Lamond J. Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. Washington, D.C: World Bank; 2012. 631 p.
- 192.** National Disaster Management Authority Government of India. National Disaster Management Guidelines. Management of floods [Internet]. 2008 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://ndma.gov.in/images/guidelines/flood.pdf>
- 193.** Herron H, Roy S, Bohn B, Courtney C, Hoagland-Grey H. Addressing Climate Change within Disaster Risk Management: A Practical Guide for IDB Project Preparation [Internet]. Inter-American Development Bank; 2015 abr [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://publications.iadb.org/handle/11319/6910>
- 194.** Defra/EnvironmentAgency. Flood and Coastal Defence R&D Programme. R&D OUTPUTS: FLOOD RISKS TO PEOPLE. FD2321/TR2 Guidance Document [Internet]. 2006. Disponible en: [http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=FD2321\\_3437\\_TRP.pdf](http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=FD2321_3437_TRP.pdf)
- 195.** IPCC. Scenario process for AR5 [Internet]. 2019 [citado 21 de agosto de 2018]. Disponible en: [http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5\\_scenario\\_process/RCPs.html](http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html)
- 196.** Mauri S, Peltó. North Cascade Glacier Climate Project [Internet]. NORTH CASCADE GLACIER CLIMATE PROJECT. [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://glaciers.nichols.edu>
- 197.** Wild M, Folini D, Henschel F, Fischer N, Müller B. Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. Sol Energy [Internet]. 2015 [citado 9 de octubre de 2018];116:12-24. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X15001668>
- 198.** Müller B, Wild M, Driesse A, Behrens K. Rethinking solar resource assessments in the context of global dimming and brightening. Sol Energy [Internet]. 2014 [citado 9 de octubre de 2018];99:272-82. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13004933>
- 199.** Gaetani, Marco, Vignati, Elisabetta, Monforti, Fabio, Huld, Thomas, Dosio, Alessandro, Raes, Frank. Climate modelling and renewable energy resource assessment [Internet]. JRC; 2015 [citado 9 de octubre de 2018]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/reqno\\_jrc95440\\_reqno\\_jrc95440\\_renew\\_gaetani\\_report\\_2015\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/reqno_jrc95440_reqno_jrc95440_renew_gaetani_report_2015_final.pdf)
- 200.** Fant C, Adam Schlosser C, Strzepek K. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. Appl Energy [Internet]. 2016 [citado 9 de octubre de 2018];161:556-64. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915003268>
- 201.** Dierauf T, Growitz A, Kurtz S, Cruz JLB, Riley E, Hansen C. Weather-Corrected Performance Ratio [Internet]. 2013 [citado 9 de octubre de 2018]. Report No.: NREL/TP-5200-57991, 1078057. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1078057/>
- 202.** Sailor DJ, Smith M, Hart M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. Renew Energy [Internet]. 1 de noviembre de 2008 [citado 9 de octubre de 2018];33(11):2393-406. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108000141>
- 203.** Pereira de Lucena AF, Szklo AS, Schaeffer R, Dutra RM. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. Renew Energy [Internet]. 2010 [citado 9 de octubre de 2018];35(5):904-12. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109004480>

- 204.** World Bank. Hydropower Sector Climate Resilience Guidelines [Internet]. 2017 [citado 11 de septiembre de 2018]. Disponible en: [https://www.hydropower.org/sites/default/files/hydropower\\_sector\\_climate\\_resilience\\_guidelines\\_-\\_beta\\_version.pdf](https://www.hydropower.org/sites/default/files/hydropower_sector_climate_resilience_guidelines_-_beta_version.pdf)
- 205.** Molly Hellmuth, et al. Addressing Climate Vulnerability for Power System Resilience and Energy Security: A Focus on Hydropower Resources [Internet]. USAID; 2017 [citado 25 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.climatelinks.org/resources/addressing-climate-vulnerability-power-system-resilience-and-energy-security-focus>
- 206.** Miralles F. Adaptación al Cambio Climático y Gestión de Riesgos [Internet]. CAF; 2015 [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/781>
- 207.** European Bank for Reconstruction and Development. Qairokkum Hydropower: Planning ahead for a changing climate [Internet]. 2014 [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: [https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif\\_enc/files/knowledge-documents/cs\\_qairokkum\\_web\\_0.pdf](https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif_enc/files/knowledge-documents/cs_qairokkum_web_0.pdf)
- 208.** Solaun K, Cerdá E, Solaun K, Cerdá E. The Impact of Climate Change on the Generation of Hydroelectric Power—A Case Study in Southern Spain. *Energies* [Internet]. 2017 [citado 10 de octubre de 2018];10(9):1343. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/9/1343>
- 209.** Ray, Patrick A. Confronting Climate Uncertainty in Water Resources Planning and Project Design: The Decision Tree Framework. [Internet]. World Bank; 2015. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22544>
- 210.** Kelly, C. Climate Risk Assessment Guide – Central Asia [Internet]. CAMO Alaroo; 2014 [citado 26 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://cdkn.org/project/developing-integrated-climate-risk-assessment-for-ccd-planning-in-central-asia/>
- 211.** Abeyasinghe, A., et al. National adaptation plans; Understanding mandates and sharing experiences [Internet]. IIED; 2017 [citado 26 de marzo de 2019]. Disponible en: <http://pubs.iied.org/10180IIED/>
- 212.** Rene D. Garreaud, et al. Present-day South American Climate. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* [Internet]. octubre de 2009 [citado 12 de diciembre de 2019];281:3-4. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/266843458\\_Present-day\\_South\\_American\\_Climate](https://www.researchgate.net/publication/266843458_Present-day_South_American_Climate)
- 213.** Giesecke J, Mosonyi E. *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb* [Internet]. 4.ª ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2005 [citado 13 de diciembre de 2018]. Disponible en: [//www.springer.com/de/book/9783540285618](http://www.springer.com/de/book/9783540285618)
- 214.** Zhang Z. *Pelton Turbines* [Internet]. Springer; 2016. 313 p. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9783319319087>
- 215.** Chiyembekezo S. Kaunda, et al. Potential of Small-Scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa. *Int Sch Res Netw Renew Energy* [Internet]. octubre de 2012;2012. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/258403445\\_Potential\\_of\\_Small-Scale\\_Hydropower\\_for\\_Electricity\\_Generation\\_in\\_Sub-Saharan\\_Africa](https://www.researchgate.net/publication/258403445_Potential_of_Small-Scale_Hydropower_for_Electricity_Generation_in_Sub-Saharan_Africa)
- 216.** United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. *National Engineering Handbook*. Part 630 Hydrology. Chapter 4: Storm rainfall depth and distribution. [Internet]. 2015. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=STELPRDB1043063>
- 217.** Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., Duffy, P. B. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrol Earth Syst Sci* [Internet]. 2012;16(9):3309-14. Disponible en: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3309/2012/>
- 218.** Taylor, K. E., R. J. Stouffer, G. A. Meehl. A summary of the CMIP5 experiment design. *Bull Am Meteorol Soc* [Internet]. 2007;93:485–498. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/253306617\\_A\\_Summary\\_of\\_the\\_CMIP5\\_experiment\\_design](https://www.researchgate.net/publication/253306617_A_Summary_of_the_CMIP5_experiment_design)
- 219.** Gleckler, P.J., Taylor, K.E., Doutriaux, C. Performance metrics for climate models. *J Geophys Res Atmospheres* [Internet]. 2008;113(6). Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JD008972>
- 220.** Coles, S., et al. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values* [Internet]. Springer-Verlag London; 2001. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9781852334598>
- 221.** Hannah Nissan, et al. On the use and misuse of climate change projections in international development. *WIREs Clim Change* [Internet]. 14 de marzo de 2019; Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wcc.579>
- 222.** Alejandro Di Luca. Challenges in the Quest for Added Value of Regional Climate Dynamical Downscaling. *Curr Clim Change Rep* [Internet]. 12 de febrero de 2015;1:10-21. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40641-015-0003-9>
- 223.** Reto Knutti. Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *J Clim* [Internet]. marzo de 2010; Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2009JCLI3361.1>
- 224.** Comisión Económica para América Latina y el Caribe. *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: una visión gráfica* [Internet]. CEPAL; 2009. Disponible en: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2974/1/S2010992\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2974/1/S2010992_es.pdf)
- 225.** Thrasher B, Maurer EP, McKellar C, Duffy PB. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2012;16(9):3309-14.

- 226.** US Army Corps of Engineers. HEC-HMS [Internet]. HEC-HMS. [citado 12 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- 227.** Schneider PJ, Schauer BA. HAZUS-its development and its future. *Nat Hazards Rev.* 2006;7(2):40-4.
- 228.** ERN-LA. Vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura. *Inf Téc ERN-CAPRA T1-5.* 2009;48.
- 229.** Jonkman SN, Vrijling JK, Vrouwenvelder ACWM. Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method. *Nat Hazards.* 2008;46(3):353-89.
- 230.** Banco Interamericano de Desarrollo. Guía Metodológica Programa de Ciudades Emergentes y Sostenibles: Tercera edición [Internet]. 2016. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/guia-metodologica-programa-de-ciudades-emergentes-y-sostenibles-tercera-edicion>
- 231.** Carta, J.A., et al. A review of measure-correlate-predict (MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site. *Renew Sustain Energy Rev [Internet].* 2013;27(Noviembre 2013):362-400. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004498>
- 232.** CELEC EP – CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR. Project design document form for CDM project activities: Villonaco Windpower. [Internet]. 2014 [citado 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/T6QNGI9J10MVYUCR87LDB2F54XWEOA>
- 233.** Chang, T.P. Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Appl Energy [Internet].* 88(1):272-82. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910002321>
- 234.** Costa-Rocha, P.A., de Sousa, R.C., de Andrade, C.F., & da Silva, M.E.V. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Appl Energy [Internet].* 2012;89(1):395-400. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.003>
- 235.** Elliot, D.L. Adjustment and analysis of data for regional wind energy assessments. En: Adjustment and analysis of data for regional wind energy assessments [Internet]. Asheville, Nort Carolina, EEUU; 1979. Disponible en: No localizado en Internet
- 236.** Goldwind-Australia. 1.5 MW PMDD Wind Turbine specifications. [Internet]. Sin fecha. Disponible en: [http://www.goldwindaustralia.com/wp-content/uploads/Goldwind-Australia-1.5MW-Brochure-2017\\_opt.pdf](http://www.goldwindaustralia.com/wp-content/uploads/Goldwind-Australia-1.5MW-Brochure-2017_opt.pdf)
- 237.** Gonçalves-Ageitos, M., Barrera-Escoda, A., Baldasano, J.M., Cunillera, J. Modelling wind resources in climate change scenarios in complex terrains. *Renew Energy [Internet].* 2015;76:670-8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.066>

