Manual de entrenamiento sobre cambio climático e hidroenergía

Joerg Hartmann

junio de 2020

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y AGUA

Lenín

Toda una Vida

EL GOBIERNO DE TODOS

Manual de entrenamiento sobre cambio climático e hidroenergía

Este manual es una adaptación para América Latina del manual “Training Manual Climate Change and Hydropower Development, Network for Sustainable Development Hydropower Development in the Mekong Countries (NSHD-M)”, documento encargado por la Cooperación Técnica Alemana (GIZ, por sus siglas en alemán) en 2014, para apoyar el desarrollo de capacidades en energía hidroeléctrica en la región del Mekong como parte de una serie de manuales que cubrieron aspectos económicos, sociales, ambientales, de recursos hídricos y de gobernanza de la energía hidroeléctrica.

La adaptación del presente documento es una iniciativa liderada por el Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador en el marco del Proyecto AICCA, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM/GEF), implementado por el banco de desarrollo de América Latina (CAF) y ejecutado por el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN).

Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador
Subsecretaría de Cambio Climático

Global Environmental Facility GEF
banco de desarrollo de América Latina CAF
Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina CONDESAN
Proyecto Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en Recursos Hídricos en los Andes AICCA

Autor:
Joerg Hartmann

Revisión:
Equipo técnico proyecto AICCA
Dirección Nacional de Adaptación, Subsecretaría de Cambio Climático, MAAE

Corrección de estilo, diseño, diagramación e impresión:
Manthra Comunicación · www.manthra.ec

Traducción:
Sonia Chávez

Este documento debe citarse así:
Hartmann J. 2020. Manual de Entrenamiento sobre Cambio Climático e Hidroenergía. Proyecto AICCA, Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador - CONDESAN, Quito – Ecuador.

Fecha de publicación:
Junio, 2020

Contenido

Introducción 13

Módulo 1. Antecedentes **16**

Sesión 1.1 Desarrollo hidroeléctrico a nivel regional y mundial 17

Sesión 1.2 Mitigación del cambio climático 26

Sesión 1.3 Adaptación al cambio climático 34

Módulo 2. Conceptos Básicos **42**

Sesión 2.1 Clima 43

Sesión 2.2 Hidrología 51

Sesión 2.3 Ingeniería hidroeléctrica 64

Sesión 2.4 Cambios en el clima y la hidrología 74

Modulo 3. Ubicación, diseño y operaciones de energía hidroeléctrica en un clima cambiante **82**

Sesión 3.1 Rango de opciones de ubicación, diseño y opciones 83

Sesión 3.2 Cantidad de agua 92

Sesión 3.3 Calidad del agua 105

Sesión 3.4 Hidroelectricidad ante la incertidumbre 115

Modulo 4. Energía hidroeléctrica y adaptación **128**

Sesión 4.1 Adaptación a los cambios en la demanda de agua y electricidad 129

Sesión 4.2 Adaptación a los cambios en el contexto comercial 139

Sesión 4.3 La hidroelectricidad como instrumento de adaptación 147

Modulo 5. Hidroelectricidad y mitigación **158**

Sesión 5.1 Emisiones evitadas por la hidroenergía 159

Sesión 5.2 Emisiones provenientes de la hidroenergía 171

Modulo 6. Implicaciones para el desarrollo sostenible en la Región Andina **180**

Sesión 6.1 Sistema de energías sostenibles 181

Sesión 6.2 Sociedades y ecosistemas sostenibles 190

Anexos: **198**

Anexo 1: Lecturas recomendadas 199

Anexo 2: Ejemplos de medidas de adaptación estructural y funcional 201

Lista de Figuras

Figura 1.
Proporción de las fuentes de electricidad en el mundo (TNC 2019) 18

Figura 2.
Capacidad instalada de energía hidroeléctrica en el 2018 18

Figura 3.
Consumo por región de energía hidroeléctrica 19

Figura 4.
Capacidad hidroeléctrica y potencial por región 20

Figura 5.
Algunas proyecciones de crecimiento en la capacidad global de recursos renovables..... 21

Figura 6.
Capacidad y generación de energía hidroeléctrica en la Región Andina..... 22

Figura 7.
Proyectos de energía hidroeléctrica existentes y potenciales en la Región Andina..... 23

Figura 8.
Índice del estado de conectividad de los ríos del mundo 25

Figura 9.
Ciclo global del carbono 27

Figura 10.
Emisiones de CO_2 promedio per cápita, medidas en toneladas por año, 2017..... 28

Figura 11.
Estados Parte y signatarios del Acuerdo de Paris 30

Figura 12.
Potencial de mitigación económica por sectores en 2030..... 31

Figura 13.
Emisiones de efecto invernadero en la producción de electricidad..... 31

Figura 14.
Número de países alrededor del mundo con diferentes políticas de mitigación..... 32

Figura 15.
Gráfico de IPCC sobre riesgos del clima 35

Figura 16.
Vulnerabilidad de los países de América Latina 36

Figura 17.
Impacto de las actividades humanas en las fuentes de agua fresca y su manejo..... 39

Figura 18.
Retos del manejo de fuentes de agua..... 39

Figura 19.
Inconvenientes de las presas bajo el cambio climático..... 41

Figura 20.
Componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones..... 44

Figura 21.
Ejemplos del pronóstico del clima 45

Figura 22.
Evolución de los modelos del clima 46

Figura 23.
Esquema para el modelo atmosférico global 46

Figura 24.
Zonas de clima Köppen-Geiger para América del Sur 48

Figura 25
Mapa de los climas Köppen-Geiger para Ecuador (1980-2016) 49

Figura 26.
Precipitación anual en Seúl, Corea (arriba), y en Charleston, Estados Unidos (abajo) 50

Figura 27.
Flujos y almacenamiento de agua 52

Figura 28.
Equilibrio de agua en la cuenca baja del Mekong 54

Figura 29.
Relación entre precipitación y descarga....56

Figura 30.
Hidrografía típica del rio Mekong, en función de las temporadas climáticas....56

Figura 31.
Descarga máxima anual durante 106 años en el río Colorado, cerca de Austin, Texas 57

Figura 32.
Clasificación de las cuencas del Ecuador....58

Figura 33.
Susceptibilidad de la infraestructura eléctrica a inundaciones baja, media y alta 59

Figura 34.
Eventos de inundación del Mekong 60

Figura 35.
CDF de la situación actual (desarrollada) y virgen (natural) 61

Figura 36.
Ciclo del proyecto 65

Figura 37.
Proyectos de filo de río....65

Figura 38.
Proyectos de reservorios 66

Figura 39.
Flujos del río Green antes y después de la construcción de la presa Flaming Gorge (1964)....67

Figura 40.
Regulación de un reservorio multipropósito: Valle Damodar, India 67

Figura 41.
Ejemplo de CDF para optimizar la capacidad de la planta 68

Figura 42.
CDF de línea de base (negro) y CDF modificada (rojo) para desviaciones 70

Figura 43.
CDF de línea de base (negro) y CDF modificada (rojo) para un flujo ambiental mínimo....70

Figura 44.
CDF de línea de base (negro) y CDF modificada (rojo) para cambios de almacenamiento....70

Figura 45
CDF de línea de base (negro) y CDF modificado (rojo) para transferencias 70

Figura 46.
Conversión de variables naturales en flujos continuos 71

Figura 47.
Influencia del almacenamiento en los CDF....72

Figura 48.
Utilizar el embalse para proveer la máxima energía 72

Figura 49.
Curva de duración de generación y CDF 73

Figura 50.
Temperatura y concentración de CO_2 en la atmósfera en los últimos 400.000 años 75

Figura 51.
Forzamiento radiativo relativo a 1750 (W m^2) 76

Figura 52.
RCP (Caminos de concentración representativa) 77

Figura 53.
Predicciones del cambio de temperatura global bajo escenarios de RCP 77

Figura 54.
Cambios regionales proyectados en temperatura y precipitación bajo RCP 2.6 y 8.5 78

Figura 55.
Predicciones del cambio de temperatura regional en escenarios RCP 79

Figura 56.
Temperatura regional, precipitación y predicciones de cambio de temporada bajo RCP 8.5 80

Figura 57.
Relación entre la elevación y el aumento de la temperatura en los Andes tropicales 81

Figura 58.
Opción A de asentamiento de energía hidroeléctrica 84

Figura 59.
Opción B de asentamiento de energía hidroeléctrica 84

Figura 60.
Ejemplo de las opciones de cascada: cascada del río Paute 85

Figura 61.
Proceso de diseño para una sola estación hidroeléctrica 86

Figura 62.
Opciones de diseño 87

Figura 63.
Opciones de diseño: capacidad de almacenamiento requerida para un rendimiento constante 88

Figura 64.
Opciones de diseño: incremento de la capacidad de almacenamiento 88

Figura 65.
Opciones de diseño: diseño y elección de turbinas 89

Figura 66.
Curva guía de almacenamiento y entradas mensuales promedio de Lake Madden, Panamá 90

Figura 67.
Entrada total reducida (izquierda) y aumentada (derecha) 93

Figura 68.
CDF con flujos más extremos 93

Figura 69.
Modelo de los cambios en el volumen de descarga y el potencial hidroeléctrico europeo a futuro 95

Figura 70.
Cambios porcentuales de la generación global de energía hidroeléctrica, por país y estado/provincia 96

Figura 71.
Máximo de días secos consecutivos proyectados anualmente de 2081-2100, bajo el escenario RCP 8.5 97

Figura 72.
Variaciones relativas de flujo, generación de energía y pago real de EGAT 97

Figura 73.
Estimación e interpretación de inundaciones 1-en-x-años 98

Figura 74.
Precipitación máxima de 5 días pronosticada del 2081 al 2100 en un escenario RCP 8.5 99

Figura 75.
Probabilidad de inundaciones para el río Big Piney, cerca de Big Piney, MO, Estados Unidos.....100

Figura 76.
Entradas mensuales de agua esperadas para un proyecto hidroeléctrico en Ecuador 101

Figura 77.
Variabilidad de ingresos netos para 2008 (millones dólares canadienses).....101

Figura 78.
Escorrentía de glaciares en los Andes 103

Figura 79.
Distribución de lagos por latitud.....106

Figura 80.
Zonificación longitudinal de las condiciones de la calidad de agua en embalses.....107

Figura 81.
Estratificación termal en un embalse.....108

Figura 82.
Regímenes de mezcla típicos de lagos en función de la latitud y la profundidad.....109

Figura 83.
Déficit de oxígeno en las capas del embalse de Riogrande II, Colombia 109

Figura 84.
Cianobacteria creciente (Microcystis aeruginosa) en embalses japoneses.....110

Figura 85.
Eutrofización en climas calientes.....111

Figura 86.
Niveles de temperatura y clorofila modelados para el embalse Tuni, Bolivia.....111

Figura 87.
Futura eutrofización de embalses en Japón 112

Figura 88.
Predicción de la pérdida de tierra en Tailandia de 2016-2045 113

Figura 89.
Vulnerabilidad ante la erosión hídrica 114

Figura 90.
Planificación para un futuro incierto 116

Figura 91.
Enfoque de la evaluación de sensibilidad climática (IHA 2019).....118

Figura 92.
Sensibilidad de la generación hidroeléctrica a la elección del escenario climático: proyecto Sabana Yegua, modelado con escenarios B2 y A2 119

Figura 93.
Secuencias metodológicas para análisis de vulnerabilidad (MAE 2017) 120

Figura 94.
Las entradas en las principales centrales hidroeléctricas de Ecuador, con la línea de base histórica y las proyecciones para 2071-2100 para cada conjunto de GCM y CMIP5 bajo el escenario RCP 4.5.....122

Figura 95.
Métodos de planificación.....123

Figura 96.
Enfoque orientado a la predicción para adaptación.....125

Figura 97.
Enfoque de resiliencia orientado a la adaptación 126

Figura 98.
Sensibilidad de la demanda de energía al cambio climático. Ciudades de Estados Unidos 130

Figura 99.
Elasticidad de la demanda de electricidad frente a la temperatura (España) 131

Figura 100.
Tailandia: demanda máxima de electricidad versus temperatura (a corto plazo).....132

Figura 101.
Evaporación de embalses a escala mundial, comparada con el consumo industrial y doméstico de agua.....133

Figura 102.
Huella hídrica en relación con el área inundada en una muestra de embalses.....135

Figura 103.
Mapa de tierras irrigadas.....136

Figura 104.
Cobertura Nacional potencialmente irrigable en Ecuador, SENAGUA 2018 138

Figura 105.
Implementación del mecanismo de desarrollo limpio (CDM)F 142

Figura 106.
Porcentaje de proyectos de MDL, por tipo.....143

Figura 107.
Porcentaje de todos los proyectos MDL por país/región 143

Figura 108.
La dependencia de los precios de la electricidad en el mercado clave de las energías renovables intermitentes 144

Figura 109.
Generación de energía renovable a lo largo del tiempo 145

Figura 110.
Efectos del precio de la generación renovable a lo largo del tiempo.....145

Figura 111.
Producción de energía durante una semana 146

Figura 112.
Clasificación de los enfoques posibles para adaptarse al cambio climático en el nivel del proyecto 149

Figura 113.
Opciones de almacenamiento 151

Figura 114.
Lago Nasser, Egipto, niveles entre 1964 y 2003 156

Figura 115.
Flujos históricos del río Nilo 156

Figura 116.
Vulnerabilidad relativa de poblaciones en deltas.....157

Figura 117.
Expansión del sistema, antes del proyecto de MDL.....161

Figura 118.
Posible impacto de un pequeño proyecto hidroeléctrico.....162

Figura 119.
Cambios en el margen operativo a lo largo de un día.....162

Figura 120.
Cambios en el margen operativo a lo largo de una semana 16

Figura 121.
Exportaciones e importaciones de electricidad canadiense en el 2008 164

Figura 122.
Cuatro escenarios de expansión Manitoba Hydro 165

Figura 123.
Reducción de emisiones de GEI relacionadas con la generación térmica a lo largo del tiempo (´000 t de CO_2).....166

Figura 124.
Producción de energía eólica durante una semana en dos parques eólicos en el medio oeste de Estados Unidos (CEATI 2011).....168

Figura 125.
Consumo de electricidad per cápita en América Latina y el Caribe (OLADE) 169

Figura 126.
Emisiones del ciclo de vida de la hidroenergía: datos empíricos 173

Figura 127.
Emisiones del ciclo de vida para diversas tecnologías de generación.....174

Figura 128.
Desglose de las emisiones del ciclo de vida de Keeyask.....175

Figura 129.
Emisiones del ciclo de vida de la nueva línea de transmisión Manitoba Hydro 175

Figura 130.
Vías de emisión de GEI en un embalse con un hipolimnion anóxico 176

Figura 131.
Emisiones de GEI de embalses en Canadá a lo largo del tiempo.....177

Figura 132.
Densidad de potencia e intensidad de emisiones de GEI de una muestra de embalses (WB 2017) 178

Figura 133.
Análisis de riesgos para emisiones de GEI 179

Figura 134.
Relación entre el uso de energía y la prosperidad económica.....184

Figura 135.
Uso de energía y PIB per cápita en América Latina.....185

Figura 136.
Costos directos actuales de las tecnologías de energía, caso de Australia.....185

Figura 137.
Tres proyecciones para América Latina para el 2030.....187

Figura 138.
Proyecciones para Ecuador al 2030 188

Figura 139.
Objetivos de desarrollo sostenible, muchos de los cuales están relacionados con el desarrollo hidroeléctrico.....191

Figura 140.
Comparación entre bienestar humano y huella ecológica.....192

Figure 141.
Curva del costo de reducción de carbono en Brasil para el 2030 193

Figure 142.
Relaciones entre el clima, la economía y los ecosistemas. 194

Figura 143.
Índice Planeta Vivo de la WWF para especies de agua dulce.....195

Lista de Tablas

Tabla 1.
Barreras y factores habilitantes para el desarrollo de la hidroenergía 24

Tabla 2.
Temas de sostenibilidad 25

Tabla 3.
Responsabilidad y potencial de mitigación 28

Tabla 4.
Políticas de mitigación en Ecuador: Extracto de tabla general, REN21 (2019) 33

Tabla 5.
Vulnerabilidad de la región Andina en una perspectiva comparativa 36

Tabla 6.
Opciones de adaptación por sector 38

Tabla 7.
Estrategias de adaptación 40

Tabla 8.
Tiempo versus clima 44

Tabla 9.
Sistema de clasificación Köppen-Geiger 47

Tabla 10.
Datos hidrológicos de ejemplos de cuencas 53

Tabla 11.
Equilibrio de agua corriente para tierra boscosa y abierta 55

Tabla 12.
Información para optimizar la capacidad de la planta 69

Tabla 13.
Capacidad de planta óptima con embalse 71

Tabla 14.
Capacidad óptima de planta de operaciones con embalse y pico de máxima energía 73

Tabla 15.
Cambios pronosticados de la descarga anual en ríos con presas: descarga promedio de los años 1960 a 1990 vs. 2050 in km3/año y cambio porcentual 94

Tabla 16.
Características de los lagos y embalses tropicales 107

Tabla 17.
Elasticidad de la demanda de electricidad frente a los cambios de temperatura 131

Tabla 18.
Precipitación, evaporación y evapotranspiración para varios climas 132

Tabla 19.
Uso actual (izquierda) y futuro (2025; derecha) del agua en la cuenca del río Zambeze 134

Tabla 20.
Impacto del cambio climático en requerimientos mundiales de riego 137

Tabla 21.
Impactos del clima en el sector de la electricidad, según tipos de cambio climático 140

Tabla 22.
Comparación de opciones de almacenamiento 154

Tabla 23.
Opciones para manejo de riesgos de inundaciones 155

Tabla 24.
Ejemplos de inversiones para la reducción de GEI en el sector de energía 160

Tabla 25.
Emisiones evitadas por dos proyectos hidroeléctricos MDL pare el mercado ecuatoriano 163

Tabla 26.
Costo externo de las emisiones de GEI relacionadas con la generación térmica de Manitoba (en millones de dólares canadienses) 167

Tabla 27.
Características de las diferentes energías renovables para la integración en la red 167

Tabla 28
Generación de energía en 2018 en Dinamarca y Noruega (TWh) 168

Tabla 29
Posibles emisiones evitadas de la hidroenergía en los países andinos 169

Tabla 30.
Emisiones de GEI durante el ciclo de vida de las tecnologías de generación en gCO2e/kWh 172

Tabla 31.
Emisiones de GEI del embalse Nam Theun 2 178

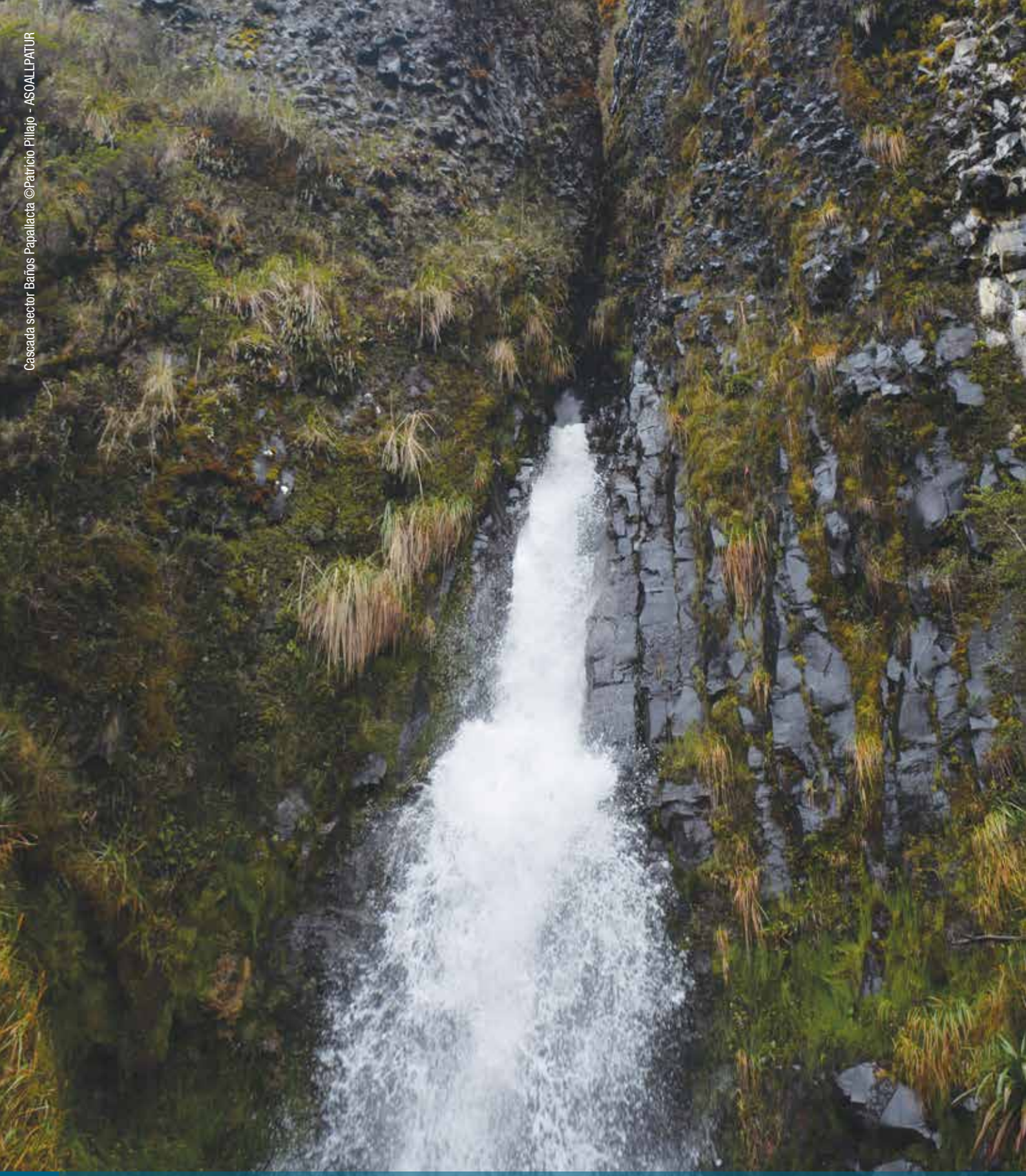
Tabla 32.
Pasos hacia la transformación a un sector energético bajo en carbono 183

Tabla 33.
Costos indirectos de las tecnologías de energía (centavos/kWh) 186

Tabla 34.
Posibles cambios importantes a largo plazo en los sistemas de energía 189

Tabla 35.
Rutas de impactos climáticos en la biodiversidad acuática 197

Tabla 36.
Ejemplos de medidas de adaptación estructural y funcional para proyectos hidroeléctricos nuevos y existentes 201



Cascada sector Baños Papallacta ©Patricio Pillajo - ASOALLPATUR

Introducción

Introducción

La energía hidroeléctrica es un recurso importante en los países de América Latina, así como en muchas otras regiones en desarrollo. También es un recurso muy complejo, ya que su desarrollo presenta múltiples dificultades y desafíos durante largos períodos de tiempo. El cambio climático lo hará aún más complicado. Este manual de capacitación está diseñado para presentar a los interesados la energía hidroeléctrica en el contexto del cambio climático, ayudarlos a navegar por las complejidades y, en última instancia, contribuir a tomar mejores decisiones sobre la ubicación, el diseño y las operaciones de la energía hidroeléctrica.

Actualmente existe un amplio consenso científico sobre el cambio climático, el cual está resumido en el 5º Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), que se publicó en 2014.0F[1] El próximo informe de evaluación (AR6) se finalizará en 2022.

Este manual fue encargado por el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN), en el marco de su proyecto Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en Recursos Hídricos en los Andes (AICCA). Fue actualizado y adaptado regionalmente de una versión anterior, comisionada por la Cooperación Técnica Alemana (GIZ, por sus siglas en alemán) en 2014, para apoyar el desarrollo de capacidades en energía hidroeléctrica en la región del Mekong como parte de una serie de manuales que cubrieron aspectos económicos, sociales, ambientales, de recursos hídricos y de gobernanza de la energía hidroeléctrica.1F[2]

El cambio climático con frecuencia modificará aspectos existentes de la energía hidroeléctrica. Por ejemplo, donde un reservorio sirve como almacenamiento tanto para energía hidroeléctrica como para control de inundaciones, incluso sin el cambio climático, se deben tomar decisiones sobre la asignación del espacio de almacenamiento. En el futuro, los reservorios existentes pueden funcionar de manera diferente, y los reservorios nuevos pueden construirse con diferentes diseños.

Una entrega completa del material de este manual puede demorar hasta 5 días. Esto permitiría el desarrollo totalmente participativo del contenido del curso, el uso completo de los documentos de respaldo y las discusiones grupales. Dependiendo de las limitaciones de tiempo y los intereses de audiencias particulares, los usuarios podrían querer modificar los materiales

1 http://www.ipcc.ch/report/ar5/

2 https://alliance4water.org/blog/files/2015_ix_28.php

del curso[3]. Hay un conjunto de presentaciones de PowerPoint que cubren todo el material del manual y que los usuarios pueden personalizar libremente. Se recomienda, en particular, modificar las discusiones grupales de acuerdo con los intereses y antecedentes de cada audiencia. Las preguntas para las discusiones en cada sesión deben verse solo como sugerencias, y los usuarios deben tener claros los objetivos para el trabajo grupal.

Los módulos 1 y 2 básicamente proporcionan información de contexto y antecedentes, que pueden o no ser necesarios para una audiencia en particular. Los módulos 3 a 5 presentan el material clave, y el módulo 6 analiza las implicaciones políticas. Si existen limitaciones de tiempo, se recomienda enfocarse en los módulos 3 a 5. Incluso dentro de estos módulos hay algún material (por ejemplo, la sesión 5.2. sobre emisiones de gases de efecto invernadero de la energía hidroeléctrica) que es relativamente especializado y no es necesario para comprender otros temas. La única parte que parece esencial y que no debe descartarse es la cuestión de cómo lidiar con las incertidumbres en la toma de decisiones, que se trata especialmente en la sesión 3.4. Este es y seguirá siendo el principal desafío del cambio climático.

En lo posible, se han utilizado ejemplos de la región latinoamericana, y en particular de Ecuador. Sin embargo, muchos ejemplos en el manual son de otros países. Una parte importante de la capacitación será que los usuarios aprecien cómo las lecciones de los proyectos existentes pueden aplicarse a nuevas inversiones. A menudo hay mejor documentación de proyectos en otros países, especialmente para un tema bastante nuevo, como es el cambio climático. No obstante, podría ser factible vincular la capacitación a una cuenca o a un proyecto en América Latina y discutir todos los temas en el contexto de ese estudio de caso. También se podría crear un ejemplo hipotético y seguirlo durante toda la capacitación. En algunos casos, una audiencia puede estar interesada en un nivel particular de análisis (regional, país, cuenca o nivel de proyecto) y la capacitación podría personalizarse para ese nivel de interés.

En el centro de la relación entre la energía hidroeléctrica y el cambio climático se encuentran los cambios continuos y esperados en hidrología. Por lo tanto, este manual pone cierto énfasis en comprender la hidrología y sus implicaciones para la ubicación, el diseño y las operaciones. Algunos usuarios que no posean antecedentes técnicos podrían encontrar que el nivel de las sesiones con énfasis en hidrología es relativamente alto. En principio, hay varias formas de abordar esto: asegurándose de que los participantes entiendan que habrá algunos requisitos técnicos, o seleccionándolos de manera apropiada; proponiendo alguna lectura preparatoria antes del curso de capacitación; repasando el material técnico de manera lenta y metódica y/o en grupos más pequeños; omitiendo o simplificando algún material. Una forma de hacerlo es omitir las partes de las sesiones 2.3. y 3.2. que cubren las curvas de duración del flujo y la optimización del diseño de la planta, aunque estas herramientas gráficas generalmente se consideran una forma muy intuitiva de comprender los vínculos entre hidrología, ingeniería y caudales ambientales.

Sobre el proyecto AICCA: Tiene como objetivo en Ecuador contribuir a la gestión de la adaptación al cambio climático del subsector hidroeléctrico, integrando el manejo ecosistémico y de la biodiversidad como pilares de la sostenibilidad energética con la finalidad de contribuir a la producción de energía eficiente del país y aportar a su desarrollo sostenible, por medio de intervenciones estratégicas de adaptación en las cuencas de los ríos Victoria (Napo) y Machángara (Azuay).

El proyecto AICCA es financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM/GEF por sus siglas en inglés), con CAF banco de desarrollo de América Latina como Agencia Implementadora, El Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN) como agencia ejecutora y el Ministerio del Ambiente y Agua en el caso de Ecuador, como autoridad ambiental y punto focal ante el GEF.

3 Material del curso disponible en el siguiente enlace: https://condesan.org/recursos/manual-entrenamiento-cambio-climatico-e-hidroenergia/

Zona de páramo en la cabecera de la cuenca del Río Machángara ©Francisco Clavijo

Módulo I.
Antecedentes

Sesión 1.1 Desarrollo hidroeléctrico a nivel regional y mundial

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión proporciona una visión general de las tendencias actuales en el desarrollo de la energía hidroeléctrica, tanto en América Latina como en el resto del mundo, además de una visión general de los impulsores y problemas del desarrollo hidroeléctrico. Los participantes podrán poner en contexto sus propias experiencias con la energía hidroeléctrica y el capacitador obtendrá una visión general del conocimiento que poseen los participantes.
Contenido	• ¿Dónde está la energía hidroeléctrica hoy? • ¿Dónde estará la energía hidroeléctrica en el futuro? • ¿Qué hace que la energía hidroeléctrica sea atractiva? • ¿Cuáles son los desafíos de desarrollo? Opcional: ¿Cómo se desarrolla la energía hidroeléctrica y quién participa en ella (desarrolladores, contratistas, financiadores)?
Aspectos clave	Los impulsores clave del desarrollo de la energía hidroeléctrica son los bajos costos de operación, la flexibilidad operativa, la seguridad nacional de la energía y el agua, el potencial de exportación y las políticas e incentivos del cambio climático. Las regiones más dinámicas para el desarrollo de la energía hidroeléctrica son los países en desarrollo con hidrología y topografía apropiadas, incremento de la demanda y disponibilidad de capital de inversión. La energía hidroeléctrica puede ser una fuente sostenible de energía y puede contribuir al desarrollo sostenible si se desarrolla de manera adecuada.
Temas de discusión y ejercicios	Dependiendo del número de participantes, en plenaria o en grupos: • Revisar las experiencias personales y las opiniones de los usuarios sobre la energía hidroeléctrica. • Discutir por qué los países generan más o menos energía hidroeléctrica. • Discutir cómo los impulsores globales del desarrollo hidroeléctrico se aplican a la región latinoamericana. • Opcional: discutir cómo y por medio de quién se desarrolla la energía hidroeléctrica en América Latina.
Lecturas clave	Documento 1.1.1 - IEA (2012). Key Findings, en *Technology Roadmap Hydropower* (p. 5). Documento 1.1.2 - BP (2019). Sección sobre hidroenergía en *Statistical Review of World Energy*.

La energía hidroeléctrica es una tecnología de energía limpia y renovable que puede proporcionar beneficios adicionales, como el suministro de agua, el control de inundaciones y la recreación.

Todas las energías renovables juntas proporcionan actualmente alrededor del 25% de la electricidad mundial, con la energía hidroeléctrica como la mayor fuente renovable.

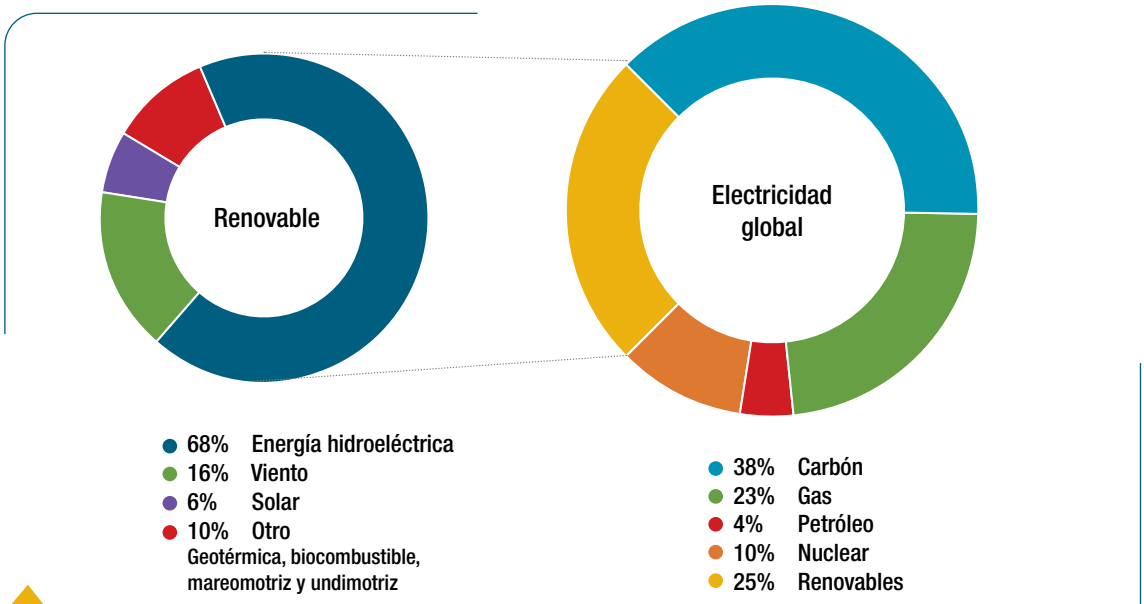


Figura 1.
Proporción de las fuentes de electricidad en el mundo (TNC 2019)

En la Figura 2 (IHA 2019) se indican las veinte principales naciones productoras de energía hidroeléctrica en el 2018.

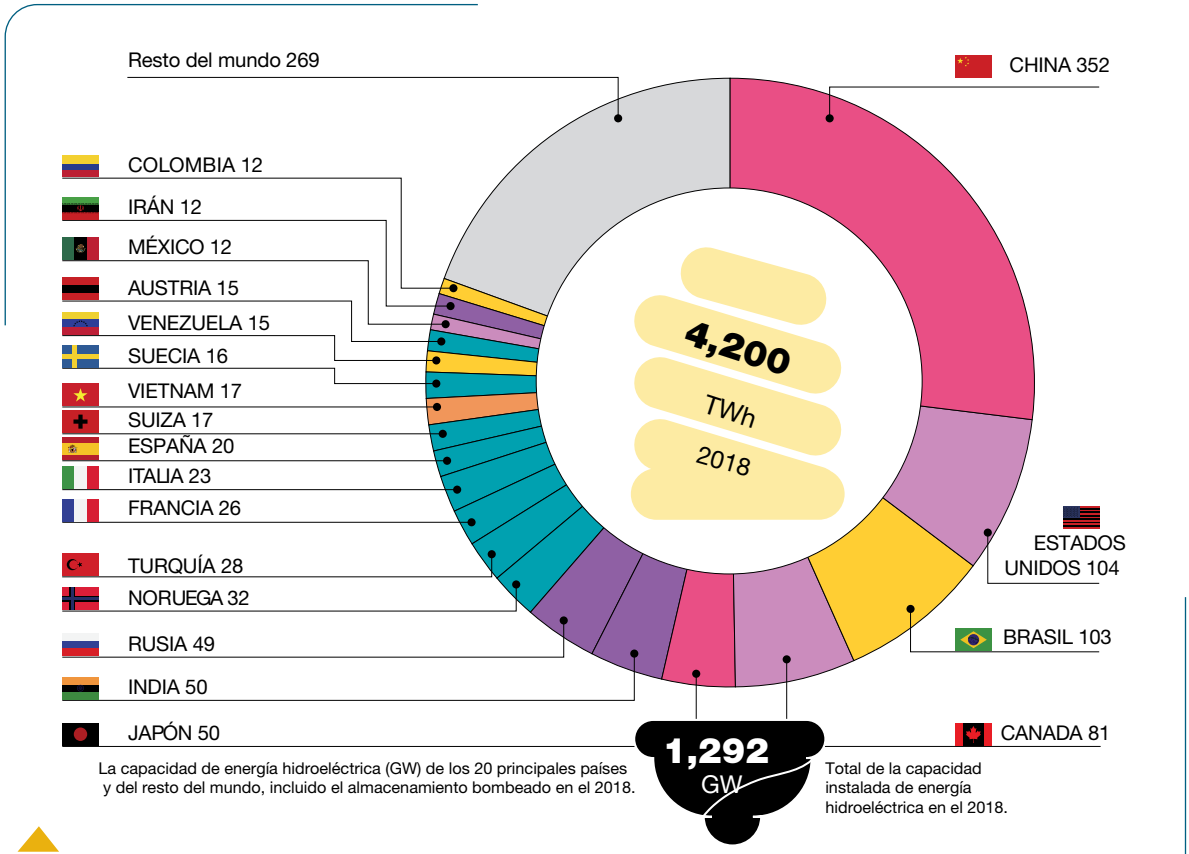


Figura 2.
Capacidad instalada de energía hidroeléctrica en el 2018

La generación en teravatios-hora (TWh) en un país y año determinados depende de: (a) la capacidad instalada, (b) la hidrología, y (c) las operaciones. Es posible tener una alta capacidad instalada con relativamente poca generación; por ejemplo, donde la energía hidroeléctrica se utiliza para generación en momentos pico (períodos de alta demanda de energía) o cuando ocurre un mal año hidrológico. Un ejemplo de esto último serían los apagones a escala nacional en Brasil en el 2001. Cabe señalar que los países desarrollados en esta lista están siendo reemplazados gradualmente por economías emergentes.

En la Figura 3 (BP 2019) se puede observar el consumo hidroeléctrico mundial por región. La región de Asia y el Pacífico consume la mayor cantidad de electricidad generada por energía hidroeléctrica, una tendencia que se ha acelerado desde 2003, mientras que los mercados de Europa, la Comunidad de Estados Independientes (CEI) y América del Norte se mantuvieron estables. América del Sur continúa aumentando constantemente su consumo, mientras que el Medio Oriente y África muestran un crecimiento lento (debido a la falta de agua y a la falta de demanda efectiva y capital, respectivamente).

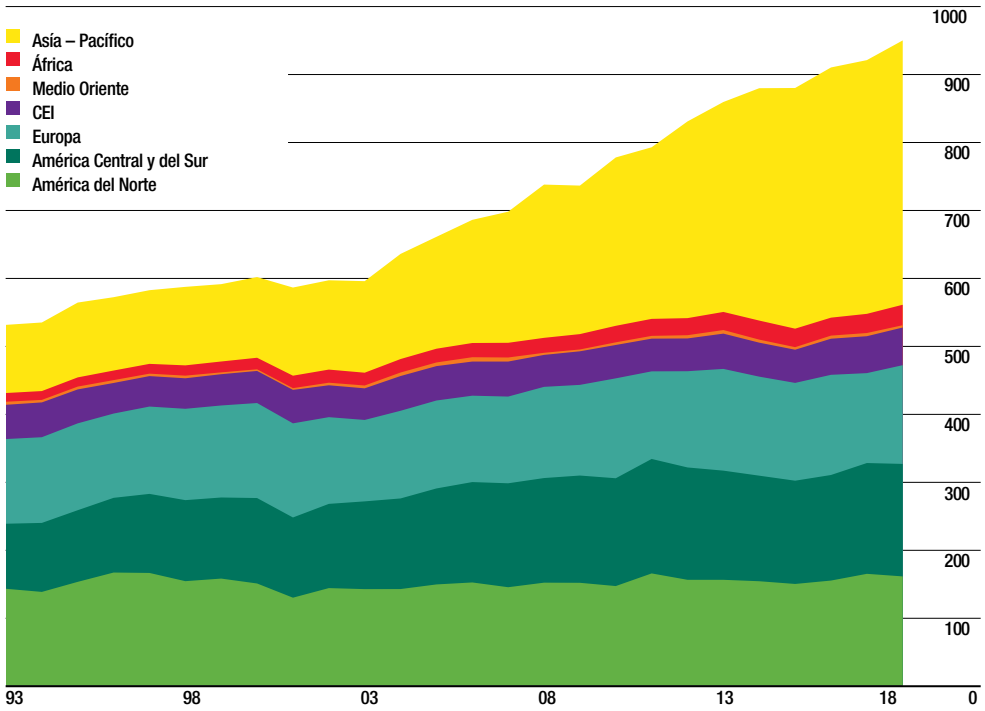


Figura 3.
Consumo por región de energía hidroeléctrica

Esta figura también muestra que el impacto de la hidrología se puede sentir incluso a escala continental. Se observa un descenso significativo en la generación en América del Norte alrededor del año 2000. El descenso debe ser un efecto de los cambios hidrológicos y no, por ejemplo, de una recesión. La razón es que los sistemas hidroeléctricos operan de manera continua mientras haya agua disponible, en comparación con las plantas de combustibles fósiles, que se apagarían primero en una recesión.

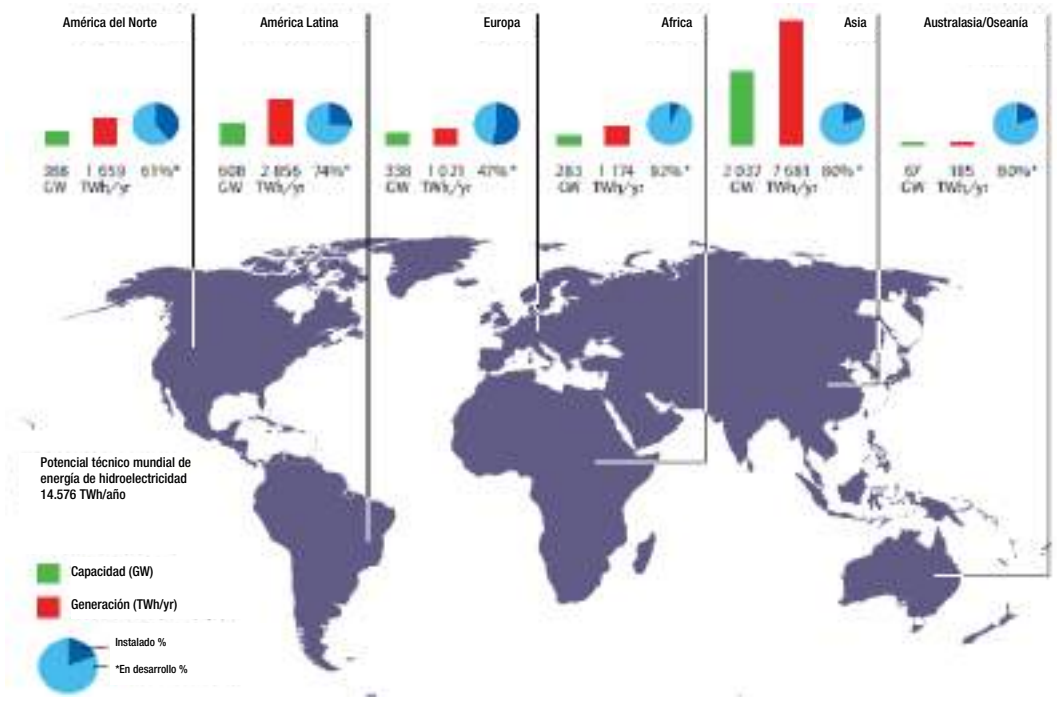


Figura 4.
Capacidad hidroeléctrica y potencial por región

¿Dónde estará la energía hidroeléctrica en el futuro? La Figura 4 (IEA 2012) representa el potencial técnico mundial de la energía hidroeléctrica por región (tenga en cuenta que las regiones aquí no son idénticas a las de la Figura 3). También muestra cuánto de ese potencial ya se había desarrollado en el 2009. Entre el 74% y el 92% del potencial en las regiones en desarrollo aún no se había construido, e incluso con el desarrollo continuo de los últimos 10 años (principalmente en Asia y América Latina), la mayor parte de la capacidad potencial del mundo no se ha construido. Para dar una idea de escala: en el 2012, la generación mundial de energía hidroeléctrica fue de 3.670 TWh, pero el potencial técnico global es de aproximadamente cuatro veces esa cantidad.

Si bien el potencial técnico puede estimarse con base en análisis de sitios factibles, solo un subconjunto de esos lugares es económicamente factible. El potencial económico es más un objetivo móvil, porque depende de factores múltiples y en constante cambio, como los costos de las fuentes de energía competidoras.

Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE 2012), la generación de energía hidroeléctrica podría casi duplicarse para 2050, logrando una capacidad global de aproximadamente 2.000 GW y una generación de electricidad global de más de 7.000 TWh. Existen otros escenarios previstos por la AIE y otras organizaciones, con tasas de crecimiento más altas o más bajas para el sector hidroeléctrico. Dos de estos escenarios se muestran en la Figura 5, los cuales concuerdan en que, en última instancia, la energía solar y eólica serán fuentes mucho más importantes que la energía hidroeléctrica. Sin embargo, tales proyecciones deben considerarse con cautela, ya que dependen de múltiples parámetros inciertos, como el crecimiento económico, el grado de ambición de las políticas climáticas, y los costos futuros de las diferentes tecnologías.

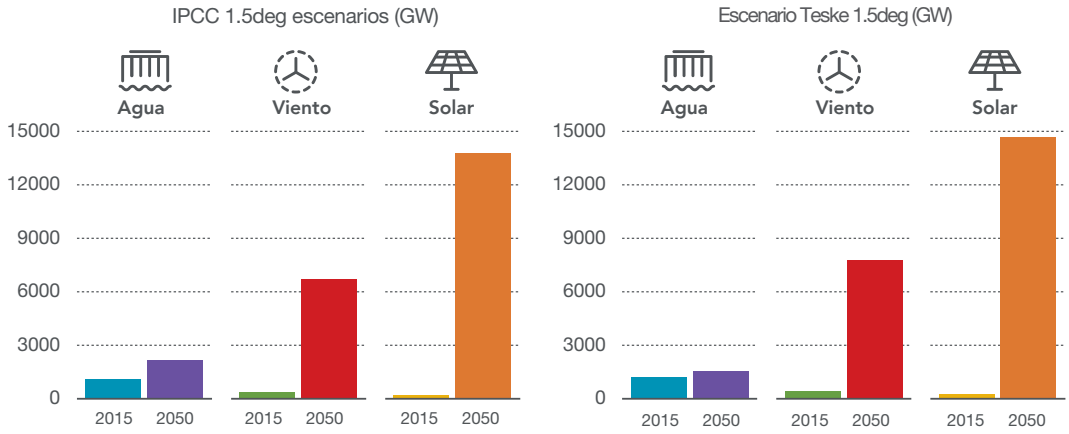


Figura 5.
Algunas proyecciones de crecimiento en la capacidad global de recursos renovables[4]

4 WWF & TNC (2019)

Ecosistema de páramo Parque Nacional Cayambe Coca. ©Patricio Pillajo

En la Región Andina, la energía hidroeléctrica juega un papel muy importante en el suministro de electricidad en todos los países, como se puede ver en la Figura 6.

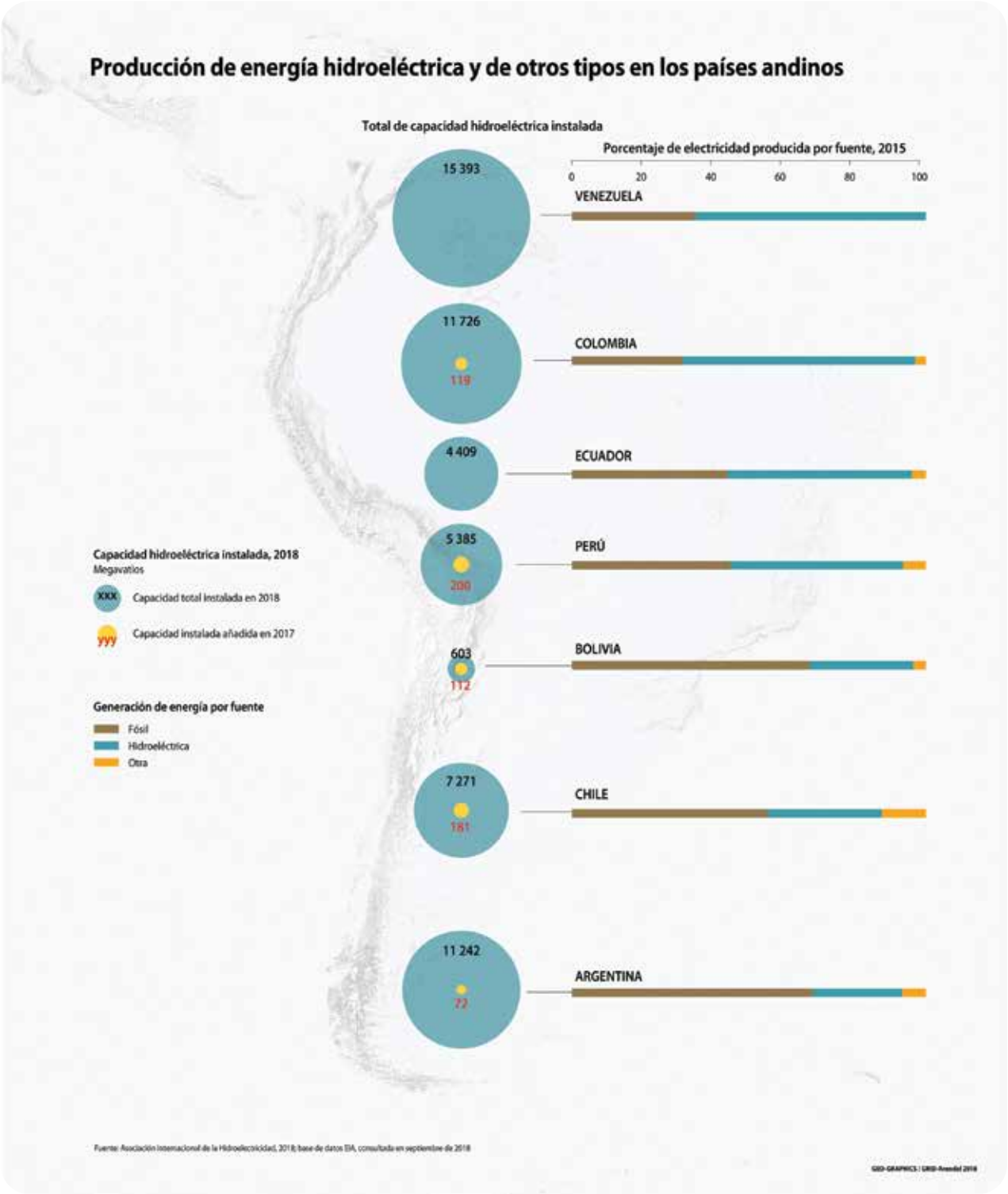


Figura 6.
Capacidad y generación de energía hidroeléctrica en la Región Andina

También existe un importante potencial de energía hidroeléctrica no desarrollada, particularmente en las regiones de los Andes tropicales (Figura 7[5]).

El potencial restante en Ecuador se estima en 13 GW, con la mayor parte de este en la cuenca del río Santiago.

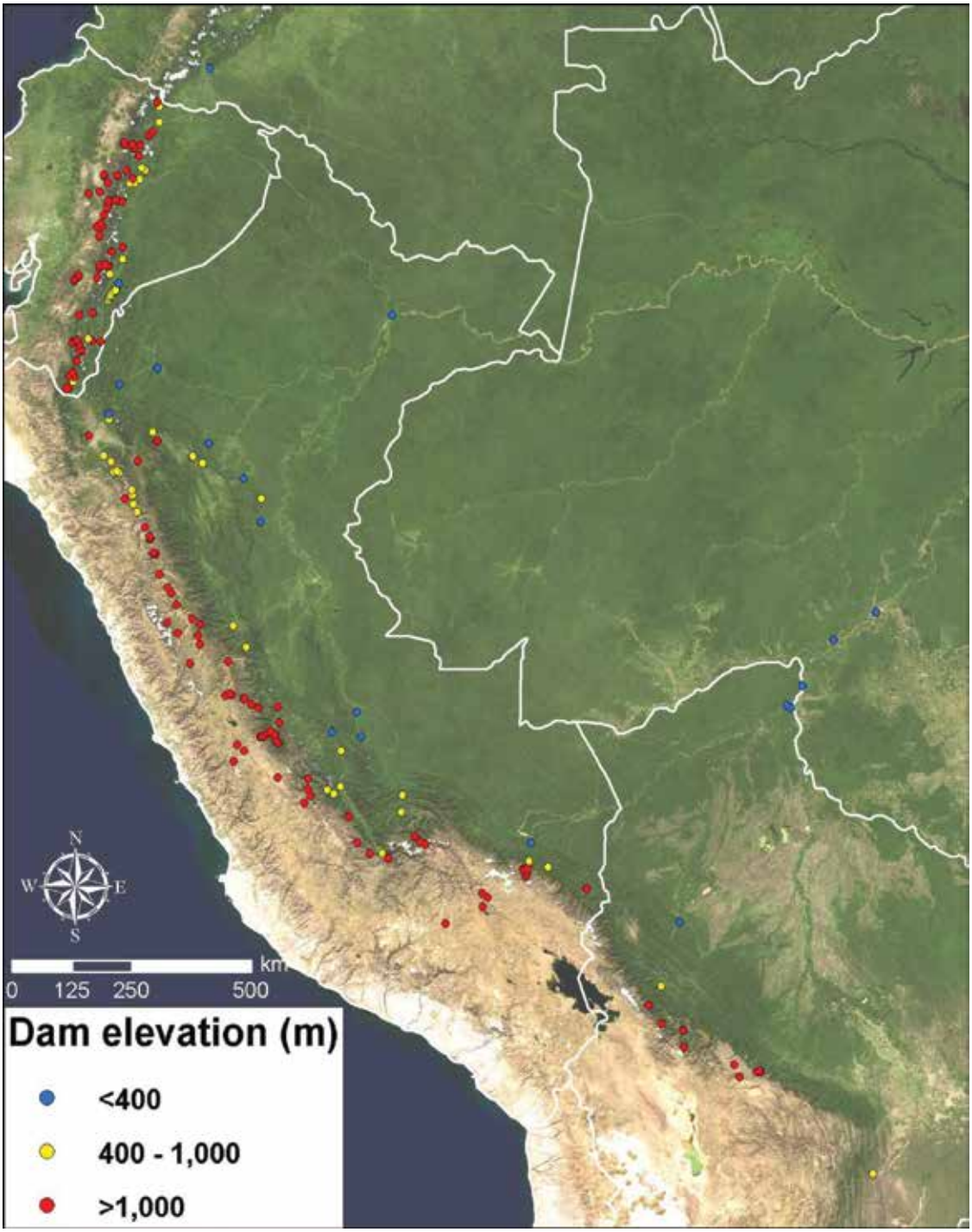


Figura 7.
Proyectos de energía hidroeléctrica existentes y potenciales en la Región Andina

5 Finer & Jenkins

A corto plazo, la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA, por sus siglas en inglés) informa anualmente sobre la capacidad adicional (hidroenergía convencional y de bombeo). En el 2018, China agregó 8,5 GW de capacidad y Brasil agregó 3,9 GW.[6] Aunque es notable, la concentración de crecimiento de China en los últimos 15 años será temporal, un crecimiento acelerado que es el resultado de las decisiones políticas tomadas hace unos 20 años.

El intenso interés y crecimiento del sector hidroeléctrico puede atribuirse a varios factores. Primero, la energía hidroeléctrica es la fuente de electricidad menos costosa en muchos países. Por lo tanto, su implementación puede facilitar el acceso a la electricidad para los mil millones de personas que aún no tienen acceso a la electricidad. La energía hidroeléctrica también ofrece oportunidades de desarrollo económico, tales como las exportaciones de energía o de productos que requieren un uso intensivo de energía, como el aluminio. También es una fuente local de energía, lo que reduce la necesidad de importación de combustible y aumenta la seguridad energética nacional. La hidroenergía también es una tecnología despachable , de alto valor, es decir que permite el almacenamiento de energía y puede integrarse con la energía eólica y solar. También es una fuente de energía baja en carbono. Si toda la energía hidroeléctrica reemplazara al carbón, las emisiones de CO2 se reducirían en cerca de 3.800 millones de toneladas por año. Esto es equivalente a 152.000 millones de dólares, a un costo social del carbón de USD 40/t.[7]

A pesar de lo atractivo de la energía hidroeléctrica, permanecen varias barreras y las preocupaciones ambientales y sociales representan quizás los mayores desafíos para una mayor utilización de esta (Tabla 1; IEA 2012, Kumar et al. 2011).

Barrera	**Posibles factores habilitantes**
Cuestiones ambientales	Desarrollo basado en la aplicación de enfoques o protocolos internacionalmente aceptados; enfoque integrado de cuenca fluvial
Cuestiones socioeconómicas	Valoración de beneficios, reformas de mercado
Aceptación pública	Ampliar el alcance de la energía hidroeléctrica para incluir beneficios multipropósito
Financiación	Planes de financiación innovadores con instrumentos públicos de mitigación de riesgos
Competitividad de costos	Movimientos favorables en los precios relativos de tecnologías y combustibles, así como impuestos y subsidios para diferentes fuentes
Disponibilidad de agua	Control efectivo de la competencia por los cambios en el uso del agua y la tierra, y mitigación del cambio climático

Tabla 1. Barreras y factores habilitantes para el desarrollo de la hidroenergía

Una de las preocupaciones ambientales es la rápida pérdida de la biodiversidad y la vida silvestre. El rápido crecimiento del sector hidroeléctrico va en paralelo con el deterioro de los ríos que fluyen libremente en todo el mundo. El cambio más dramático se registró durante el auge de la construcción de presas desde la década de 1950 hasta la década de 1980. Un estudio reciente ha documentado el grado en que la fragmentación, la regulación, la captura de sedimentos y la extracción de agua, todo esto por lo menos parcialmente relacionado con las represas, ha afectado la conectividad de los ríos y los hábitats de agua dulce. Solo las cuencas del Amazonas y el Congo, algunas partes del sur de Asia y el Ártico todavía tienen un mayor número de ríos que fluyen libremente (Figura 8).

6 IHA (2019) Hydropower Report.

7 Cálculo propio. Fuente del costo social del carbón: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/social_cost_of_carbon_fact_sheet.pdf. Este costo es para una tasa de descuento promedio de 3% y para emisiones en 2015.

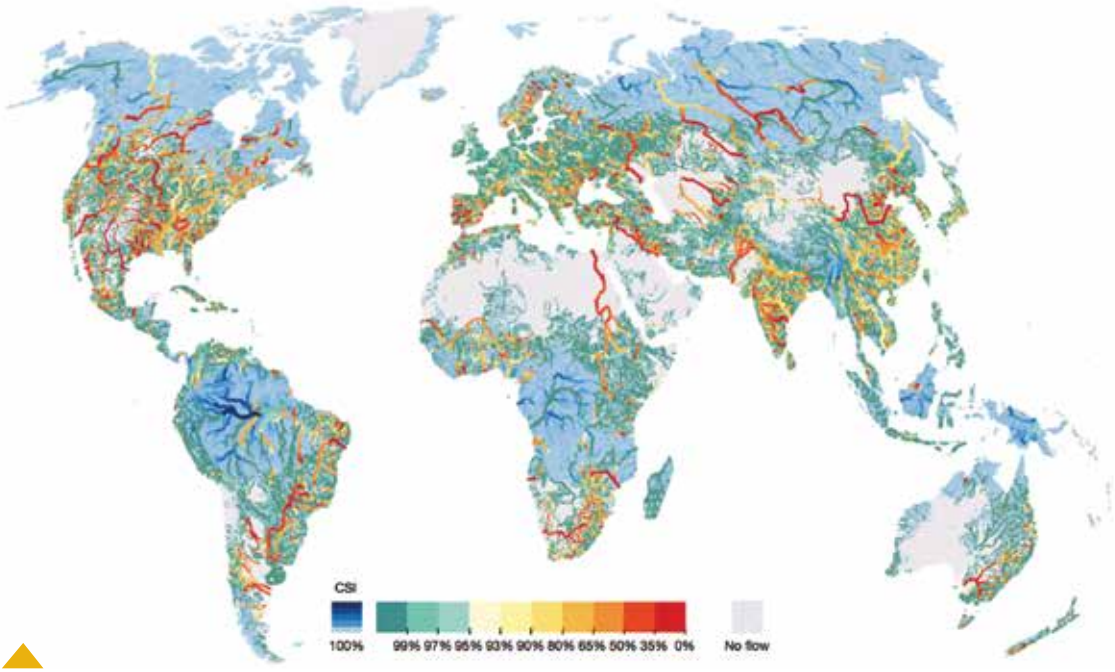


Figura 8.
Índice del estado de conectividad de los ríos del mundo[8]

La Tabla 2 detalla los problemas de sostenibilidad que deben considerarse en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos (IHA 2018).

Existe un amplio consenso sobre esta lista, que se ha desarrollado a partir de un proceso con múltiples partes interesadas.

Técnico	**Ambiental**	**Social**	**Económico y financiero**	**Integrador**
Ubicación y diseño	Caudal aguas abajo	Comunidades y medios de vida afectados	Viabilidad económica	Necesidad demostrada y ajuste estratégico
Recurso hidrológico	Erosión y sedimentación	Reasentamiento	Viabilidad financiera	Comunicaciones y consultas
Planificación, llenado y gestión del embalse	Calidad del agua	Pueblos indígenas	Beneficios del proyecto	Gobernanza
Seguridad de la infraestructura	Biodiversidad y especies invasoras	Patrimonio cultural	Adquisiciones	Gestión integrada del proyecto
Confiabilidad y eficiencia de los activos	Residuos, ruido y calidad del aire	Salud pública		Gestión de problemas ambientales y sociales
				Cambio climático

Tabla 2. Temas de sostenibilidad

8 Grill et al. (2019). De todos los tramos fluviales en la base de datos, el 48,2% (por número) se ve afectado por la disminución de la conectividad fluvial en varios grados (índice <100%). Las sombras azules representan la magnitud de la descarga del río para alcances de ríos con índice = 100% (es decir, las sombras más oscuras corresponden a ríos más grandes).

Sesión I.2 Mitigación del cambio climático

Propósito y objetivos de aprendizaje	La sesión presenta los marcos de política climática en el ámbito internacional y en la región. Se revisará el papel de la generación de electricidad en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de la energía hidroeléctrica en los sistemas eléctricos. Los participantes se harán una idea acerca de la escala del desafío de la mitigación y de la contribución potencial de la energía hidroeléctrica.
Contenido	• ¿De dónde provienen la mayoría de las emisiones de GEI? • ¿Qué acuerdos internacionales existen para la mitigación? • ¿Cómo se incorporan estos acuerdos a los marcos de políticas nacionales? • ¿Qué opciones hay para la mitigación? • ¿Cuáles son las emisiones de diversas fuentes de electricidad?
Aspectos clave	Los combustibles fósiles usados para generar electricidad son una fuente importante de GEI y, por lo tanto, una opción importante para las medidas de mitigación. La energía hidroeléctrica es una fuente de energía con una baja huella de GEI. Las emisiones actuales e históricas per cápita varían drásticamente entre países, y los marcos de política climática, como el Protocolo de Kioto, se basan en el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas.
Temas de discusión y ejercicios	Discutir en plenario: ¿Los países latinoamericanos tienen la responsabilidad (¿moral? ¿legal?) de participar en la mitigación del cambio climático? Incluso si no tienen una responsabilidad, ¿tienen un interés propio?
Recursos adicionales	http://www.carbonmap.org/ : Explorar la contribución de los países latinoamericanos a la extracción mundial actual de combustibles fósiles y las reservas de estos combustibles, las emisiones actuales e históricas de CO2 y la huella de carbono. Comparar con otras regiones.
Lecturas clave	Documento 1.2.1 - Bruckner et al. (2013) Executive Summary of Chapter 7 (Energy Systems) in Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the AR5 of the IPCC. Documento 1.2.2 - Kumar et al. (2011) Executive Summary of Chapter 5 (Hydropower) in IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (pp. 441-442).

El efecto invernadero es el proceso por el cual parte del calor que se libera como radiación infrarroja desde la superficie de la Tierra es absorbido por los GEI. Esta absorción da como resultado una elevación de la temperatura atmosférica. Cuantos más GEI estén presentes, mayor será la temperatura. Varios de estos GEI son moléculas de carbono. El carbono es el cuarto elemento más abundante en el planeta y se almacena en las rocas, el océano, la atmósfera, las plantas, el suelo y los combustibles fósiles. El movimiento del carbono entre estas áreas de almacenamiento se denomina “ciclo del carbono”. Tiene componentes lentos, como reservorios geológicos, componentes de velocidad media, como el sumidero oceánico, y componentes rápidos, como la biosfera (Figura 9)[9].

9 https://www.tsolar.com/es/noticias/incremento-global-del-co2-coyuntural-o-estructural.html

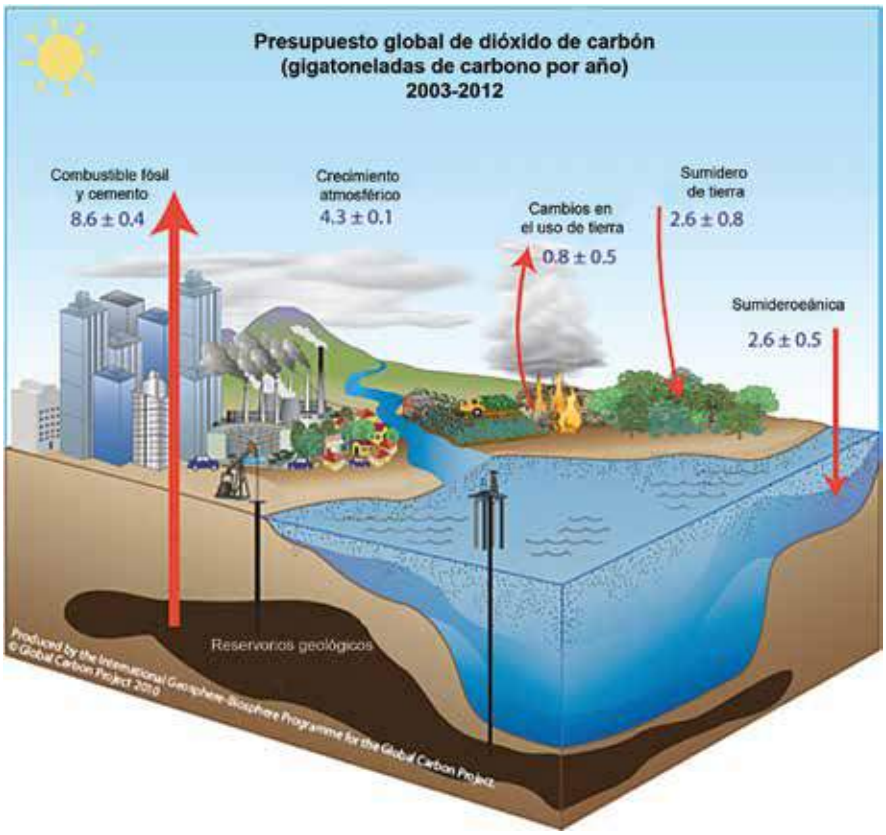


Figura 9.
Ciclo global del carbono

El dióxido de carbono (CO_2) es el GEI más importante, ya que origina el 76% del efecto invernadero, seguido del metano (16%), el óxido de nitrógeno (6%) y los gases fluorados (2%). La cantidad de estos gases está aumentando debido a la actividad humana. La Figura 10 muestra los mayores emisores de CO_2 per cápita a causa de la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento en 2017.[10]

10 https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions

Figura 10.
Emisiones de CO_2 promedio per cápita, medidas en toneladas por año, 2017

El CO_2 existe naturalmente en la atmósfera; sin embargo, las fuentes artificiales están aportando cantidades adicionales de este y de otros tipos de gases. Para simplificar el cálculo y el análisis, las cantidades de esos otros gases se equiparan a una cantidad de CO_2 que tendría el mismo potencial de calentamiento global.

La Tabla 3 muestra cuán diferentes son las emisiones históricas y actuales por país, comparando los países andinos de economía emergente y una altamente industrializada. También muestra que las importaciones y exportaciones de combustibles, así como otros bienes y servicios, pueden influir de manera importante en el balance de carbono.

	Ecuador	Perú	Bolivia	Colombia	Alemania	China
Población (millones de personas)	16	30	11	48	81	1.357
CO_2 de los combustibles fósiles extraídos (millones de toneladas)	11	24	31	215	402	7.423
CO_2 de los combustibles fósiles quemados (millones de toneladas)	36	65	18	88	763	8.241
CO2 de bienes / servicios consumidos (millones de toneladas)	40	67	15	90	1.015	5.993
CO_2 acumulado del uso de energía, 1850–2011 (millones de toneladas)	771	1.438	316	2.522	84.124	140.860
Potencial de CO_2 en reservas de combustibles fósiles (millones de toneladas)	3.430	597	n. d.	8.769	40.548	129.898

Tabla 3. Responsabilidad y potencial de mitigación

La reducción de las emisiones de CO_2 es una acción esencial para limitar el cambio climático global. La mitigación se define como el "cambio y sustitución tecnológica que reduce los insumos de recursos y las emisiones por unidad de producto"[11]. Muchas políticas sociales, económicas y tecnológicas diferentes podrían ocasionar una reducción de las emisiones. Sin embargo, con respecto al cambio climático, la mitigación significa implementar políticas específicas para reducir las emisiones de GEI y mejorar los sumideros de carbono. (Un sumidero de carbono es, por ejemplo, un bosque que absorbe carbono mientras crece).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se negoció en Río de Janeiro en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1992 y entró en vigor en 1994. El tratado proporciona un marco para negociar protocolos específicos que pueden establecer límites vinculantes con respecto a los GEI.

El principio 7 de la Declaración de Río de 1992 sobre Medio Ambiente y Desarrollo establece que:

> Los Estados cooperarán en un espíritu de asociación global para conservar, proteger y restablecer la salud y la integridad del ecosistema de la Tierra. En vista de que han contribuido en distinta medida a la degradación ambiental mundial, los Estados tienen responsabilidades comunes pero diferenciadas. Los países desarrollados reconocen la responsabilidad que les cabe en la búsqueda internacional del desarrollo sostenible, en vista de las presiones que ejercen sus sociedades sobre el medio ambiente mundial y de las tecnologías y los recursos financieros de que disponen[12].

Este principio ha sido importante en las negociaciones climáticas. Las partes de la CMNUCC se han reunido anualmente desde 1995 en las Conferencias de las Partes (COP) para evaluar el progreso en la lucha contra el cambio climático. En 1997, se adoptó el Protocolo de Kioto y entró en vigor en el 2005. Las normas detalladas para la implementación del Protocolo se adoptaron en la COP7 en Marrakech, en 2001. Durante el primer período de compromiso (2008 a 2012), un grupo de países llamados "Partes del Anexo I" se comprometieron a reducir los gases de efecto invernadero en un promedio del 5% frente a los niveles de 1990. En la COP16, realizada en Cancún, las partes se comprometieron a un aumento máximo de la temperatura en 2 °C. En 2012, en la COP18 en Doha, se adoptó la Enmienda de Doha al Protocolo de Kioto. Esta incluye nuevos compromisos para la mayoría de las partes del Anexo I que participarían en un segundo período de compromiso (es decir, 2013 a 2020), para reducir los gases de efecto invernadero en al menos un 18% por debajo de los niveles de 1990[13].

Pared de Hielo Nevado Cayambe ©Werner Barrera PNCCza MAEPNCCza MAE

11 IPCC (2007) AR4: Climate Change.

12 http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-1annex1.htm

13 http://en.wikipedia.org/wiki/Kioto_Protocol

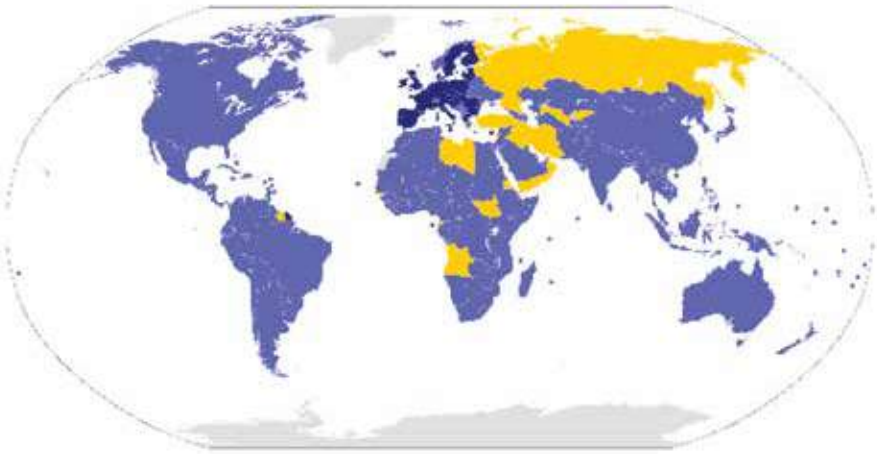


Figura II.
Estados Parte y signatarios del Acuerdo de Paris

El Acuerdo de París 2015 (COP21) marca el último paso en la evolución del régimen de cambio climático de la ONU. Su objetivo central es fortalecer la respuesta global a la amenaza del cambio climático manteniendo un aumento de la temperatura global en este siglo muy por debajo de 2 °C por encima de los niveles preindustriales y continuar los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura aún más a 1,5 °C. Los mecanismos clave de implementación son contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés); también hay importantes acuerdos sobre adaptación y finanzas.

Los Estados Parte de la CMNUCC pueden aplicar medidas de mitigación en cualquier sector. Se esperaría que las opciones de bajo costo se exploren primero y, solo si es necesario, se adopten opciones con costos más elevados. La Figura 12 del AR4 del IPCC muestra el costo potencial de la mitigación por sector, previsto para el 2030[14]. Por ejemplo, en el sector de suministro de energía, si tan solo se tomaran aquellas medidas que cuestan menos de 100 USD por tonelada de CO_2e, las emisiones globales podrían reducirse entre 2,4 y 4,7 gigatoneladas de CO_2e cada año. Esto se puede comparar con el potencial de reducción con diferentes niveles de costo en otros sectores.

Los principios detrás de tales comparaciones de costos aún se mantienen, incluso si los costos reales están cambiando con el tiempo. De hecho, algunos de los desarrollos de costos más dramáticos han sido en el sector energético. En este, así como en otros sectores, en realidad existen medidas de mitigación con costos negativos, es decir, medidas que no solo reducen las emisiones de GEI, sino que al mismo tiempo disminuyen los costos. Volveremos a tales ejemplos en el módulo 6.2.

14 Notas: a) Los rangos de los potenciales económicos mundiales evaluados en cada sector se muestran mediante líneas verticales. Los rangos se basan en las asignaciones de uso final de emisiones. b) Los potenciales estimados se han visto limitados por la disponibilidad de estudios, particularmente a niveles altos del precio del carbono. c) Los sectores utilizaron diferentes líneas de base. d) Solo se muestran los totales globales para el transporte porque se incluyen los vuelos internacionales. e) Categorías excluidas: emisiones sin CO2 en edificios y transporte, parte de las opciones de eficiencia de materiales, producción de calor y cogeneración en el suministro de energía, vehículos pesados, transporte marítimo y transporte de pasajeros con alta ocupación, la mayoría de las opciones de alto costo para edificios, tratamiento de aguas residuales, reducción de emisiones en minas de carbón y gasoductos, y gases fluorados por el suministro y transporte de energía. La subestimación del potencial económico total de estas emisiones es del orden del 10 al 15% (IPCC 2007; AR4: Cambio climático).

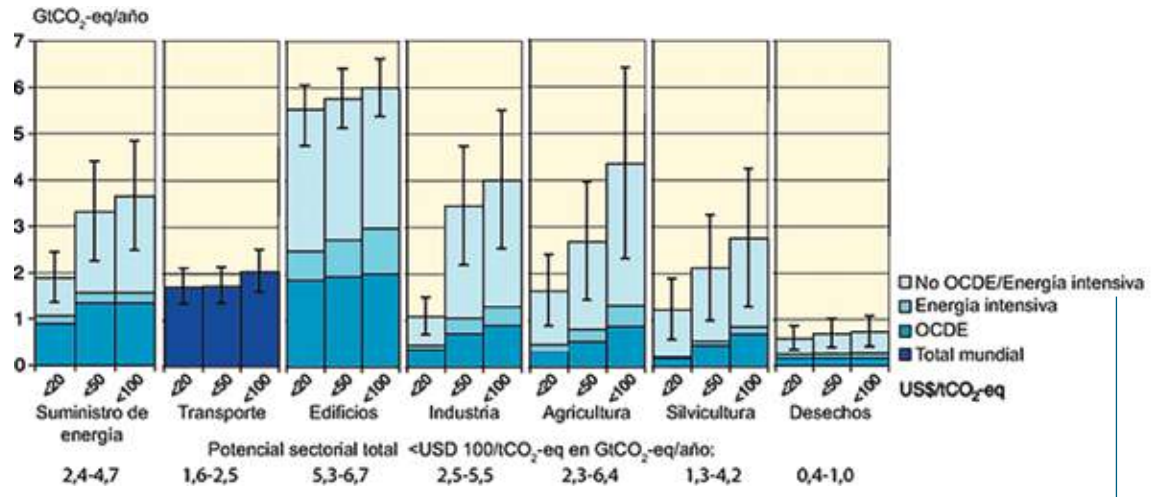


Figura 12.
Potencial de mitigación económica por sectores en 2030

La Figura 13 muestra estimaciones sobre la cantidad de CO_2e liberado a partir de la producción de electricidad utilizando diversas tecnologías. Esta información generalmente se proporciona como un rango de datos porque las tecnologías energéticas pueden ser bastante variables dependiendo de los sitios, la calidad de los combustibles, la edad de las plantas y otros factores.

La energía hidroeléctrica generalmente se considera una fuente de energía baja en carbono. Estos primeros estudios mostraron una amplia gama de emisiones potenciales y luego han sido refinados (ver el módulo 5.2.). Es importante tener en cuenta que las opciones de inversión para nuevas centrales eléctricas determinarán las emisiones de GEI durante toda la vida útil de las plantas.

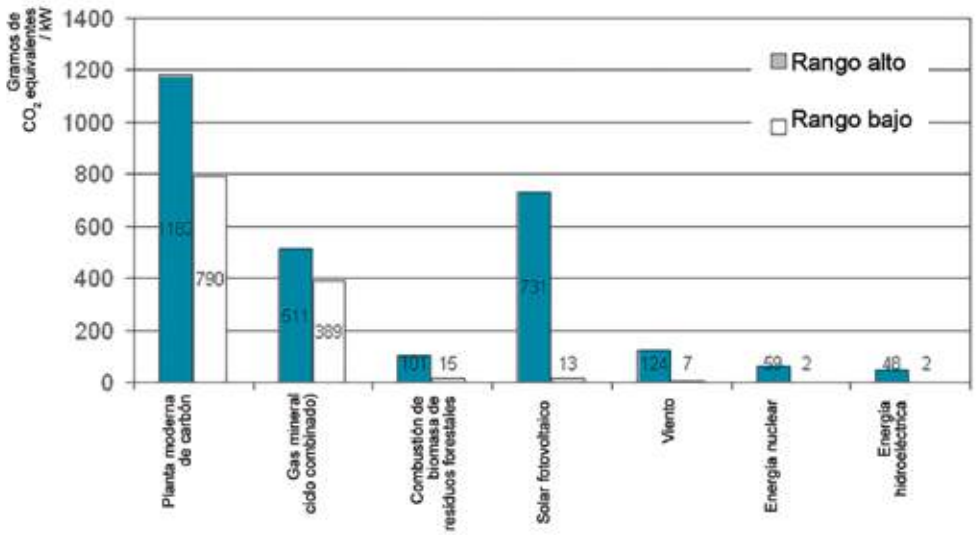


Figura 13.
Emisiones de efecto invernadero en la producción de electricidad

Las políticas de mitigación varían ampliamente entre países, pero están aumentando a escala mundial (Figura 14), y están más avanzadas en los países que han asumido la obligación de reducir las emisiones, especialmente en Europa. Países latinoamericanos, tales como Ecuador, también han comenzado a introducir una serie de políticas relevantes (Tabla 6).[15] El progreso con respecto a las políticas de mitigación se documenta anualmente en el Informe del Estado Global de la red REN21. Esto también permite hacer comparaciones regionales, por ejemplo, entre países de América Latina.

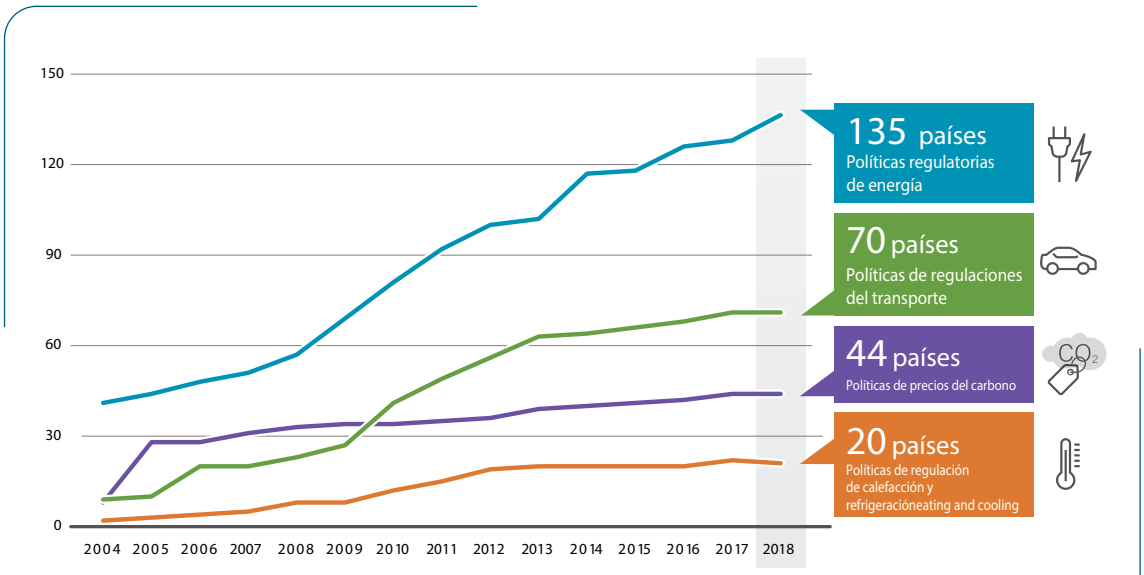


Figura 14.
Número de países alrededor del mundo con diferentes políticas de mitigación

Ecosistema de Páramo ©Patricio Pillajo - ASOALLPATUR

15 REN 21 (2019)

País	Meta de energía renovable[7]	Energía renovable en INDC o NDC	POLÍTICAS REGULATORIAS							INCENTIVOS FISCALES Y FINANCIAMIENTO PÚBLICO				
			Tarifa de pago premium	Cuota obligatoria de servicios eléctricos	Medición neta / facturación	Obligación/mandato de mezcla de biogasolina	Obligación/mandato calor renovable	TREC comercializable	Licitación	Incentivos fiscales	Créditos fiscales para producción o inversión	Reducción en ventas, energía, CO_2, VAT u otros impuestos	Pago de producción de energía	Inversión pública, préstamos, créditos, subsidios de capital o rebajas
PAÍSES CON INGRESOS MEDIOS-ALTOS														
Albania	E, T		●	●	●	●		●	○		●	●	●	●
Algeria	E, P	●	●						○				●	●
Armenia	P	●	●		●				○					●[6]
Azerbaiyán	P	●												●
Bielorusia	E, P		●	●								●		●
Belice	P	●							●					
Bosnia y Herzegovina	E, P	●	●						●					
Botsuana									●	●		●		●
Brszil	E, P	●			●	☆			○	●	●	●		●
Bulgaria	E, P, HC, T		●			●								●[6]
China	E, **P(R)**, HC, **T**	●	☆	☆		◖	●		◗	●	●	●	●	●
Colombia	P					☆				●	●	●		●
Costa Rica	P	●	●		●	●			●	●		●		
Cuba	P													
Dominica	P													
República Domincana	P		●		●				●	●	●	●		●
Ecuador		●	●			●			●	●		●		●
Guinea Ecuatorial														

Tabla 4. Políticas de mitigación en Ecuador: Extracto de tabla general, REN21 (2019)

Sesión I.3 Adaptación al cambio climático

Propósito y objetivos de aprendizaje	La sesión proporciona una visión general de la adaptación al cambio climático, con un enfoque en los recursos hídricos y la Región Andina. Revisa los conceptos de vulnerabilidad, resiliencia, capacidad de adaptación y el papel de las medidas de adaptación "blandas" y "duras". Los participantes se familiarizarán con la terminología de adaptación y comenzarán a ver las implicaciones generales para la energía hidroeléctrica en los países andinos.
Contenido	• ¿Cuál es la terminología estándar sobre adaptación? • ¿Cómo se ven afectados los recursos hídricos, tanto por el uso humano como por el cambio climático? • ¿Cuáles son algunas opciones y limitaciones para la adaptación? • ¿Pueden las represas dificultar la adaptación?
Aspectos clave	Grandes grupos de población en los países andinos son vulnerables al cambio climático. El cambio climático está afectando a las personas principalmente a través de los recursos hídricos, que ya están presionados en muchos lugares. Hay opciones para adaptarse al cambio climático, pero no son fáciles, baratas ni aceptadas universalmente.
Temas de discusión y ejercicios	Trabajo grupal: Discutir cómo se usa el cambio climático como argumento a favor y en contra de la energía hidroeléctrica. (Esto debería cubrir tanto la mitigación como la adaptación). Dividir a los participantes en un máximo de 8 grupos. Todos los grupos reciben un folleto. Los grupos primero separan los argumentos de mitigación y adaptación, luego eligen un argumento, lo discuten e informan al plenario sobre sus conclusiones. Folleto: Artículo 1.1.1 - Página de hallazgos clave de la AIE.
Recursos adicionales	http://www.carbonmap.org/ : Explorar la vulnerabilidad de los países andinos en términos de personas en riesgo de desastres naturales, aumento del nivel del mar y pobreza. Comparar con otras regiones. Ver el video de IR: http://www.internationalrivers.org/campaigns/wrong-climate-for-damming-rivers
Lecturas clave	Documento 1.3.1 - UN Water (n. d.) Climate change adaptation is mainly about water. Documento 1.3.2 - Jiménez Cisneros et al. (2014) Freshwater resources. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the AR5 of the IPCC. Documento 1.3.3 - Magrin et al. (2013) Chapter 27 (Central and South America) in Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the 5th Assessment Report of the IPCC.

La discusión sobre la adaptación al cambio climático requiere el uso de una terminología estándar[16]. En términos generales, las sociedades humanas intentan evitar y mitigar los riesgos y tratan de aprovechar y mejorar las oportunidades.

Cualquier cambio en su entorno (por ejemplo, a causa de la tecnología, la demografía, la cultura y también el clima) trae nuevos riesgos y oportunidades, y requiere que las sociedades se adapten.

16 IPCC (2014) AR5.

Exposición: la presencia de personas, medios de vida, especies o ecosistemas, funciones ambientales, servicios y recursos, infraestructura o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían ser afectados negativamente.

Vulnerabilidad: la propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacerle frente y adaptarse. Un amplio conjunto de factores, como la riqueza, el estatus social y el género, determinan la vulnerabilidad y la exposición al riesgo relacionado con el clima.

Impactos: los efectos en los sistemas naturales y humanos de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a los efectos sobre la vida, los medios de vida, la salud, los ecosistemas, las economías, las sociedades, las culturas, los servicios y la infraestructura debido a la interacción de los cambios del clima o de eventos climáticos peligrosos que ocurren dentro de un período de tiempo específico, y la vulnerabilidad de una sociedad o sistema expuesto. Los impactos también se conocen como "consecuencias" y "resultados". Los impactos del cambio climático en los sistemas geofísicos, incluidas las inundaciones, las sequías y el aumento del nivel del mar, son un subconjunto de los impactos, denominados "impactos físicos".

Peligro: la posible ocurrencia de un evento o una tendencia física, natural o inducida por el ser humano, o un impacto físico que puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, infraestructura, medios de vida, prestación de servicios, ecosistemas y recursos ambientales. El término peligro generalmente se refiere a eventos o tendencias físicas relacionadas con el clima o sus impactos físicos.

Estresores: eventos y tendencias, a menudo no relacionados con el clima, que tienen un efecto importante en el sistema expuesto y pueden aumentar la vulnerabilidad al riesgo relacionado con el clima.

Riesgo: el potencial de consecuencias cuando algo de valor está en juego y donde el resultado es incierto, reconociendo la diversidad de valores. El riesgo a menudo se representa como la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos o tendencias, multiplicadas por los impactos, si ocurren estos eventos o tendencias.

Riesgo = (probabilidad de eventos o tendencias) × consecuencias

El riesgo es el resultado de la interacción entre la vulnerabilidad, la exposición y el peligro.

Gráficamente, las relaciones entre estos conceptos se pueden representar de la siguiente manera:

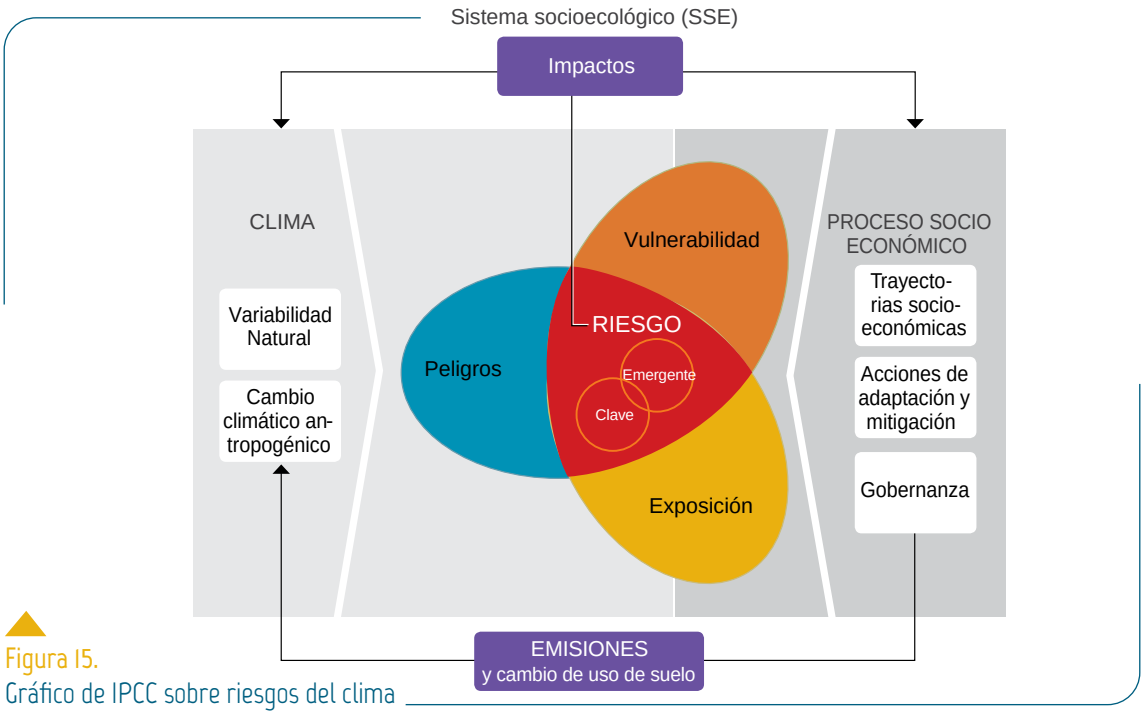


Figura 15.
Gráfico de IPCC sobre riesgos del clima

Las naciones que serán potencialmente más afectadas por el cambio climático a menudo no son las más responsables de los cambios en curso. Existen varios métodos para evaluar y cuantificar los conceptos como vulnerabilidad, resiliencia, exposición o sensibilidad. Como ejemplo, la Figura 16 muestra la vulnerabilidad de los países latinoamericanos, basada en un índice que resume múltiples indicadores sobre exposición, fragilidad y resiliencia.

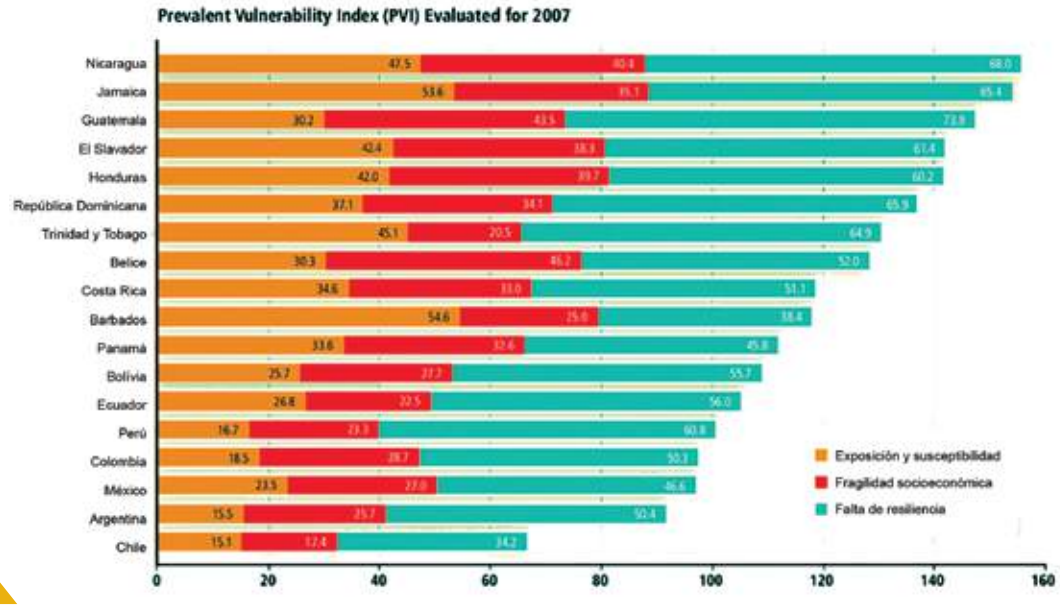


Figura 16.
Vulnerabilidad de los países de América Latina[17]

Millones de personas en todo el mundo son altamente vulnerables a los efectos actuales y esperados del cambio climático. A menudo, los pobres, que son los más vulnerables, también son los que tienen más probabilidades de verse afectados. La Tabla 5 da una idea del número de personas potencialmente expuestas al cambio climático.[18]

	Ecuador	Perú	Bolivia	Colombia	Alemania	China
Población (m)	16	30	11	48	81	1.357
Población que ya sufre sequías, inundaciones o temperaturas extremas (m)	0,053	0,593	0,138	0,318	0,026	107,925
Población que vive a menos de 5 m sobre el nivel del mar (m)	1,149	0,521	0	0,968	3,561	109,394
Personas que viven con menos de 1,25 dólares al día (m)	0,726	1,491	1,666	3,943	0	160,170
PIB a PPA (miles de millones de dólares)	165	358	65	598	3.493	16.157

Tabla 5. Vulnerabilidad de la región Andina en una perspectiva comparativa

17 https://www.researchgate.net/figure/1-Aggregate-Prevalent-Vulnerability-Index-PVI-for-19-countries-of-the-Americas-for_fig1_244062037

18 http://www.carbonmap.org

Para reducir esta vulnerabilidad, las personas, comunidades, empresas, sectores y países enteros pueden aplicar estrategias de adaptación. La Tabla 6 muestra las opciones de adaptación para varios sectores.[19] Estos pueden requerir marcos de políticas de apoyo y pueden estar sujetos a barreras, pero también presentan nuevas oportunidades.

Sector	**Opción / Estrategia de adaptación**	**Marco de política subyacente**	**Limitaciones y oportunidades clave para la implementación** **(Normal = restricciones; cursiva = oportunidades)**
Agua	Recolección amplia de agua de lluvia; técnicas de almacenamiento y conservación de agua; reutilización del agua; desalinización; eficiencia en el uso del agua y el riego	Políticas nacionales del agua y gestión integrada de los recursos hídricos; gestión de riesgos relacionados con el agua	Recursos financieros y humanos y barreras físicas Gestión integrada de recursos hídricos; sinergias con otros sectores
Agricultura	Ajuste de las fechas de siembra y la variedad de cultivos; reubicación de cultivos; gestión mejorada de la tierra (por ejemplo, control de la erosión y protección del suelo plantando árboles)	Políticas de investigación y desarrollo (I + D); reforma institucional; tenencia de la tierra y reforma agraria; capacitación; desarrollo de capacidades; seguro de cultivos; incentivos financieros (por ejemplo, subsidios y créditos fiscales).	Restricciones tecnológicas y financieras; acceso a nuevas variedades; mercados Temporada de crecimiento más larga en latitudes más cercanas a los polos; ingresos económicos por productos “nuevos”
Infraestructura / asentamiento (incluidas las zonas costeras)	Reubicación; diques y barreras contra marejadas; refuerzo de dunas; adquisición de tierras y creación de marismas / humedales como amortiguadores contra el aumento del nivel del mar e inundaciones; protección de las barreras naturales existentes	Estándares y regulaciones que integran consideraciones sobre el cambio climático en el diseño; políticas de uso del suelo; construcción de códigos; seguros	Barreras financieras y tecnológicas; disponibilidad de espacios de reubicación Políticas y gestiones integradas; sinergias con los objetivos de desarrollo sostenible
Salud humana	Planes de acción sanitaria durante olas de calor; servicios médicos de emergencia; mejor vigilancia y control de enfermedades sensibles al clima; agua segura y saneamiento mejorado	Políticas de salud pública que reconocen el riesgo climático; servicios de salud fortalecidos; cooperación regional e internacional	Límites de tolerancia humana (grupos vulnerables); limitaciones de conocimiento; capacidad financiera Servicios de salud mejorados; mejor calidad de vida

19 IPCC (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change.

Turismo	Diversificación de atractivos e ingresos por turismo (por ejemplo, cambio de pistas de esquí a altitudes y glaciares más altos o producción de nieve artificial)	Planificación integrada (por ejemplo, capacidad de carga; vínculos con otros sectores); incentivos financieros (por ejemplo, subsidios y créditos fiscales)	Atractivo / mercadeo de nuevos destinos turísticos; desafíos financieros y logísticos; impacto adverso potencial en otros sectores (por ejemplo, la fabricación de nieve artificial puede aumentar el uso de energía) Ingresos por "nuevos" atractivos turísticos; participación de un grupo más amplio de partes interesadas
Transporte	Realineamiento / reubicación; normas de diseño y planificación de carreteras, ferrocarriles y otras infraestructuras para hacer frente al calentamiento y al drenaje	Integrar las consideraciones del cambio climático en la política nacional de transporte; inversión en I + D para situaciones especiales (por ejemplo, en áreas de permafrost)	Barreras financieras y tecnológicas; disponibilidad de rutas menos vulnerables Tecnologías mejoradas e integración con sectores clave (por ejemplo, energía)
Energía	Fortalecimiento de la infraestructura de transmisión y distribución aérea; cableado subterráneo para servicios públicos; eficiencia energética; uso de fuentes renovables; menor dependencia de fuentes únicas de energía	Políticas energéticas nacionales, regulaciones, incentivos fiscales y financieros para alentar el uso de fuentes alternativas; incorporación del cambio climático en los estándares de diseño	Acceso a alternativas viables; barreras financieras y tecnológicas; aceptación de nuevas tecnologías Estímulo para nuevas tecnologías; uso de recursos locales

Tabla 6. Opciones de adaptación por sector

El agua es un componente fundamental de la adaptación al cambio climático. El cambio climático alterará las temperaturas y, por lo tanto, afectará las tasas de precipitación, el derretimiento de la nieve y de los glaciares, los flujos y evaporación y, en última instancia, también afectará la calidad del agua. El ciclo natural del agua ya se ve afectado por las actividades humanas a través de varias vías directas e indirectas (Figura 17).[20] Todas estas actividades determinan la complejidad de la gestión de los recursos hídricos (es decir, la planificación, el desarrollo, la distribución y la gestión para un uso óptimo de los recursos hídricos). Idealmente, la gestión de los recursos hídricos considera todas las demandas competitivas por agua y busca asignar este recurso de manera equitativa para satisfacer todos los usos y demandas, incluidas las necesidades ambientales de agua.

Incluso antes de que se reconociera el cambio climático, la gestión de los recursos hídricos estaba sujeta a los diferentes climas regionales, que causaban estrés hídrico, y a la variabilidad climática natural que provoca perturbaciones temporales como inundaciones y sequías. La Figura 18 muestra algunos ejemplos.[21] El cambio climático dificulta aún más los desafíos preexistentes de gestión de los recursos hídricos, pero la atribución del impacto progresivo del cambio climático es difícil.

20 IPCC (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change.

21 IPCC (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change.

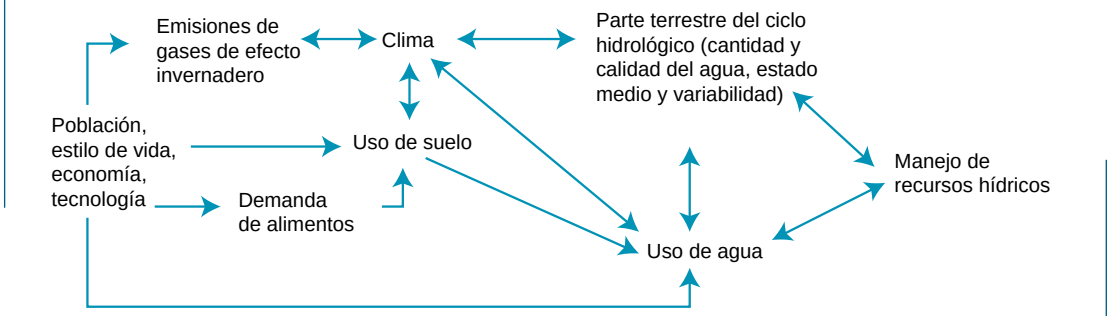


Figura 17.
Impacto de las actividades humanas en las fuentes de agua fresca y su manejo

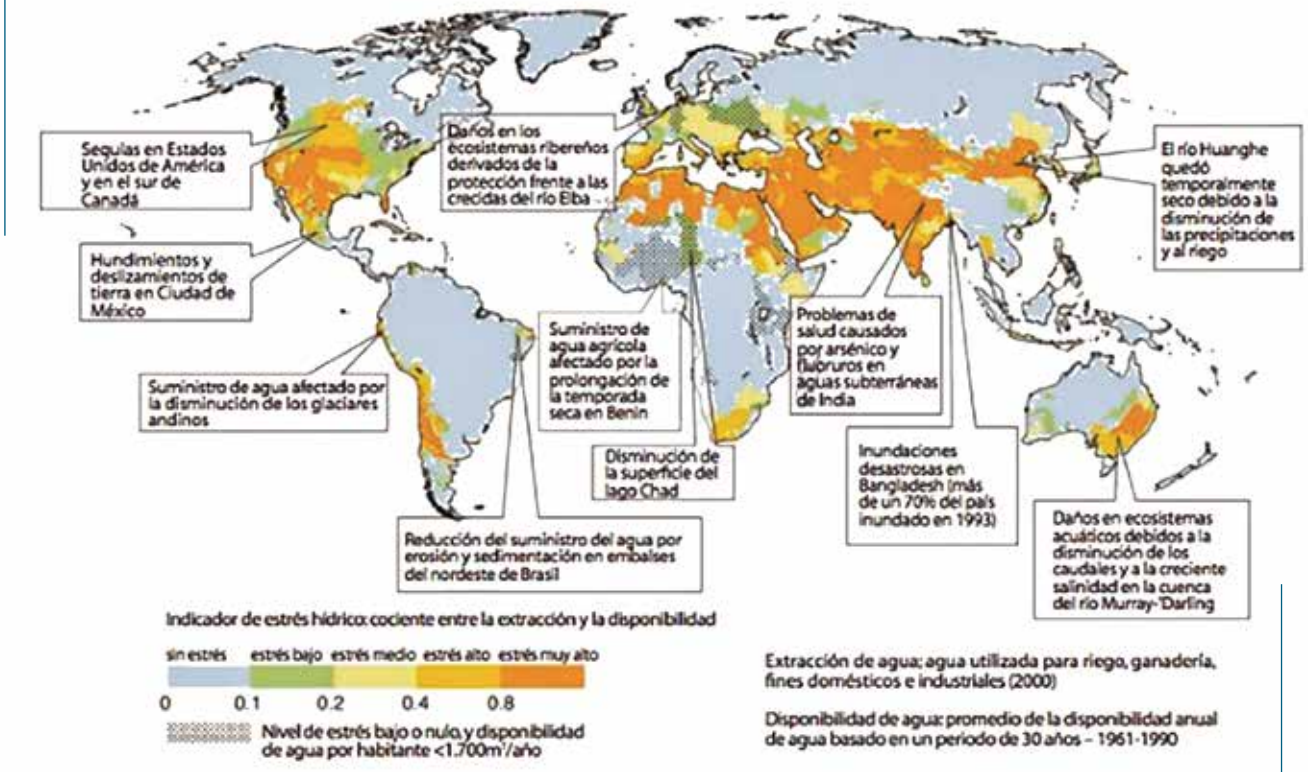


Figura 18.
Retos del manejo de fuentes de agua

La adaptación es una característica necesaria y duradera de las sociedades humanas. Siempre nos hemos adaptado y seguimos adaptándonos a múltiples cambios estructurales en nuestro entorno. La adaptación requiere una planificación creativa y, a menudo, la implementación de estrategias multifacéticas; todas las posibilidades deben ser consideradas. La Tabla 7 muestra que muchas opciones de gestión de los recursos hídricos pueden ser vistas también como opciones de adaptación.[22]

LADO DE LA OFERTA	LADO DE LA DEMANDA
Prospección y extracción de agua subterránea	Mejoramiento de la eficiencia en el uso del agua mediante el reciclaje de esta
Ampliar la capacidad de almacenamiento mediante la construcción de reservorios y presas	Reducción en la demanda de agua para irrigación por cambios en el calendario de siembra, diversificación de cultivos, método de irrigación y áreas plantadas
Desalinización del agua del mar	Reducción de la demanda de agua para irrigación por importación de productos agrícolas (“agua virtual”)
Expansión del almacenamiento del agua de lluvia	Promoción de prácticas ancestrales para el uso sostenible de agua
Remoción de vegetación invasiva no nativa en las zonas ribereñas	Ampliación del uso de mercados de agua para reubicarla hacia usos altamente valorados
Transferencia de agua	Incremento de los incentivos económicos, incluidos la medición y el precio, para fomentar la conservación del agua

Tabla 7. Estrategias de adaptación

Sin embargo, la capacidad de implementar estrategias de adaptación de manera oportuna puede verse limitada por factores físicos, económicos, políticos, sociales e institucionales. Los factores físicos incluyen restricciones tales como el diseño de la infraestructura existente de recursos hídricos. Los grandes proyectos de infraestructura o la reubicación de una comunidad debido al aumento del nivel del mar pueden no ser prácticos en términos económicos. Algunas estrategias pueden no ser política o socialmente aceptables; por ejemplo, la construcción de un embalse o la disminución de la confiabilidad de los servicios públicos. También existen barreras institucionales debido a la falta de atención, capacidad, coordinación o conocimiento de los problemas.

Algunos opositores de las represas enfatizan que estas presentan múltiples inconvenientes como una opción de adaptación y mitigación (Figura 19).[23] Es necesario tener en cuenta estos inconvenientes, así como las desventajas de otras opciones de adaptación y mitigación.

22 Ibid.

23 http://www.internationalrivers.org/campaigns/wrong-climate-for-damming-rivers

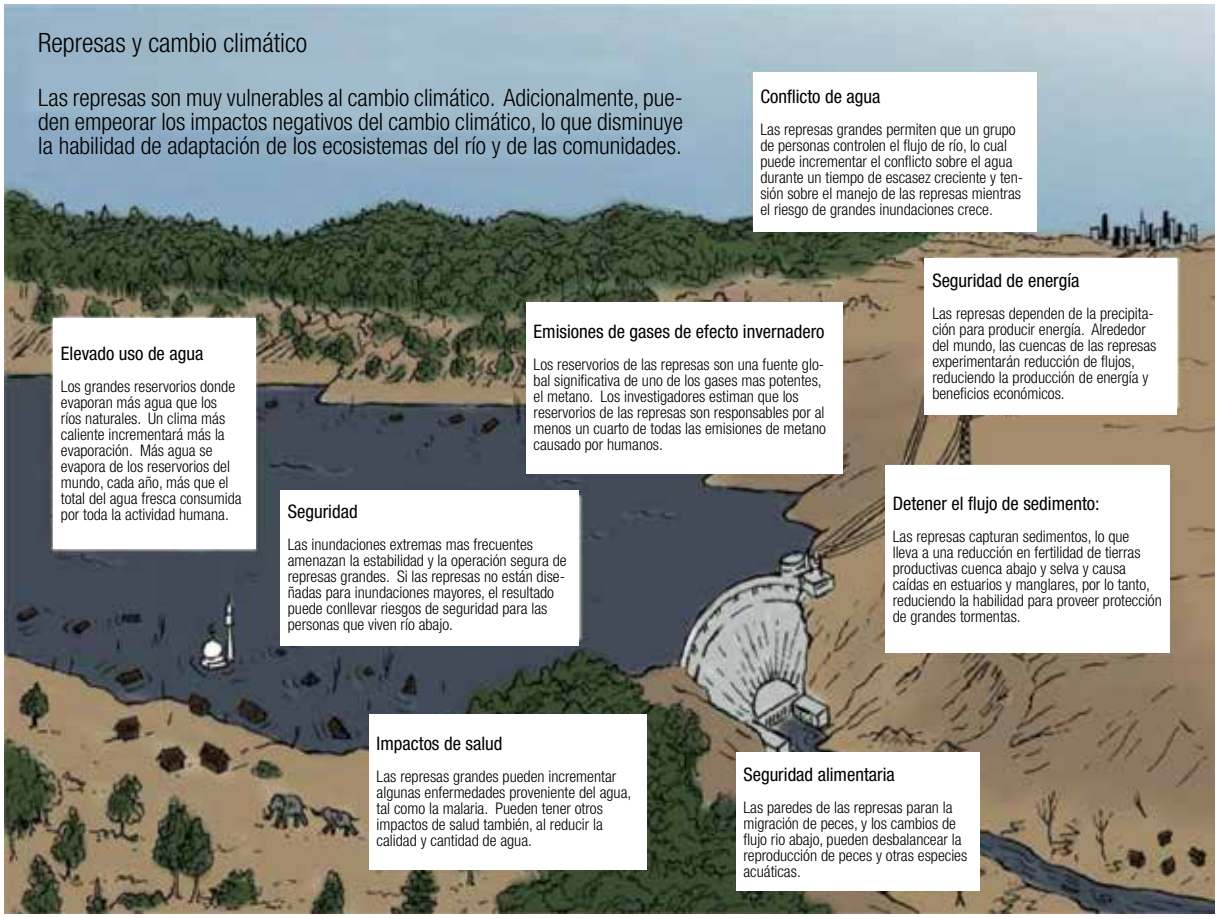


Figura 19.
Inconvenientes de las presas bajo el cambio climático

Venado de páramo ©Patricio Pillajo - ASOALLPATUR

Módulo 2.
Conceptos Básicos

Sesión 2.1 Clima

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión proporciona una visión general de las definiciones de tiempo y clima. Se revisarán los sistemas climáticos, las clasificaciones, la variabilidad y los pronósticos / modelos, en el ámbito mundial y para la región Andina. Los participantes podrán actualizar su comprensión de los problemas climáticos básicos y convertirse en usuarios seguros de la terminología climática.
Contenido	• ¿Cuál es la diferencia entre tiempo y clima? • ¿Cómo se pronostica el tiempo y cómo se modela el clima? • ¿Cómo podemos describir y clasificar el clima en la Región Andina? • ¿Cuán variable es el clima?
Aspectos clave	El tiempo es la variable a corto plazo y el clima el estado promedio a largo plazo de la atmósfera. El tiempo y el clima se pronostican por medio de modelos similares. Ecuador tiene varios regímenes climáticos regionales diferentes. El clima es muy variable en diversas escalas temporales, incluidas las tendencias a largo plazo.
Temas de discusión y ejercicios	Explore y discuta el pronóstico del tiempo actual para la Región Andina en https://www.weather-forecast.com/maps/Ecuador
Recursos adicionales	Cursos en línea sobre ciencia climática en http://www.climate.be/textbook/index.html https://www.e-education.psu.edu/meteo469/node/31
Lectura clave	Documento 2.1.1 - Organización Meteorológica Mundial (2011) El clima y tú.

El sistema climático incluye mecanismos externos (principalmente, el sol) que "fuerzan" o influyen en sus componentes (Figura 20).[24] Los componentes no vivos consisten en la litósfera (tierra sólida), la atmósfera (envoltura gaseosa), la hidrósfera (agua líquida) y la criósfera (agua congelada), junto con la geósfera. Los componentes vivos son la biósfera. Las variaciones climáticas son el resultado de cambios en los componentes del sistema climático.

24 Baede, A.P.M, E. Ahlonsou, Y. Ding, D. Schimel (2001) The Climate System: An Overview. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

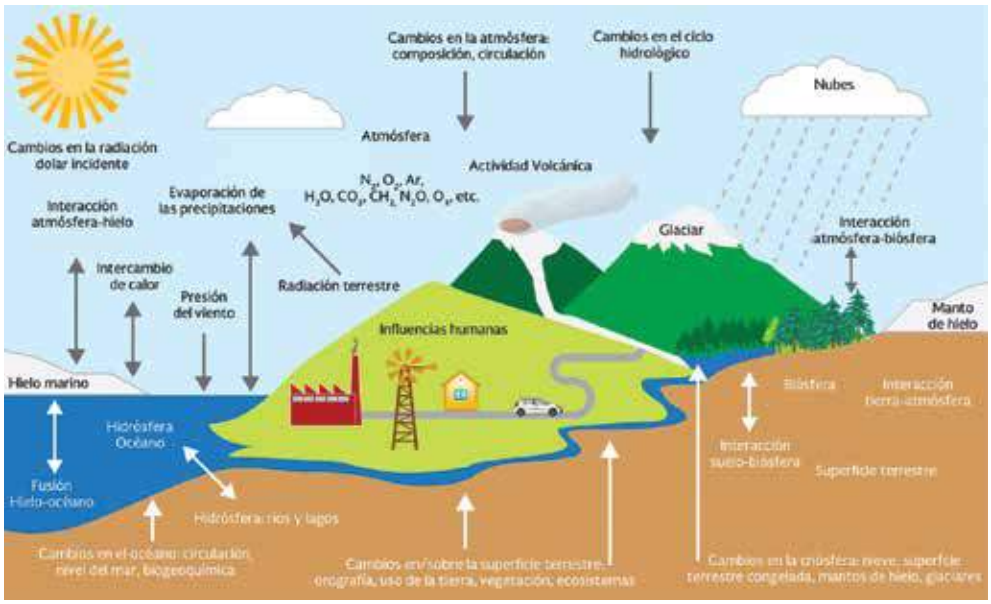


Figura 20.
Componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones

El clima se refiere al estado fluctuante de la atmósfera. El clima, en sentido estricto, generalmente se define como el "clima promedio" o, más rigurosamente, como la descripción estadística de la media y la variabilidad de las cantidades relevantes durante un período que va desde meses hasta miles o millones de años. Estas cantidades suelen ser variables, como la temperatura, la precipitación y el viento. En un sentido más amplio, el clima es el estado (descrito estadísticamente) del sistema climático.[25]

Tiempo	**Clima**
Condición atmosférica instantánea	Condición atmosférica media
Puede cambiar rápidamente, en menos de una hora	durante un período de 30 años, según lo definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM)
Prevalece sobre un área pequeña	Prevalece sobre una gran región
Tiene una previsibilidad limitada más allá de unos pocos días (naturaleza caótica de la atmósfera)	Casi constante
Depende principalmente de las diferencias de densidad (temperatura y humedad) entre lugares	Depende de la latitud, distancia al mar, vegetación, presencia de montañas y factores geográficos

Tabla 8. Tiempo versus clima

25 IPCC (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change. También, como ejemplo, ver http://www.nasa.gov/mission_pages/noaa-n/climate/climate_weather.html.

Los pronósticos del tiempo, como en la Figura 21,[26] se realizan mediante la recopilación de datos cuantitativos sobre el estado actual de la atmósfera y utilizando la comprensión científica de los procesos atmosféricos, para proyectar cómo evolucionará el clima. La naturaleza caótica de la atmósfera, errores cometidos en la medición de las condiciones iniciales y una comprensión incompleta de los procesos atmosféricos significa que los pronósticos se vuelven menos precisos a medida que aumenta su rango de tiempo. Sin embargo, las mejoras recientes en este campo significan que un pronóstico del tiempo de cinco días de hoy es tan confiable como un pronóstico del tiempo de dos días hace 20 años.[27]

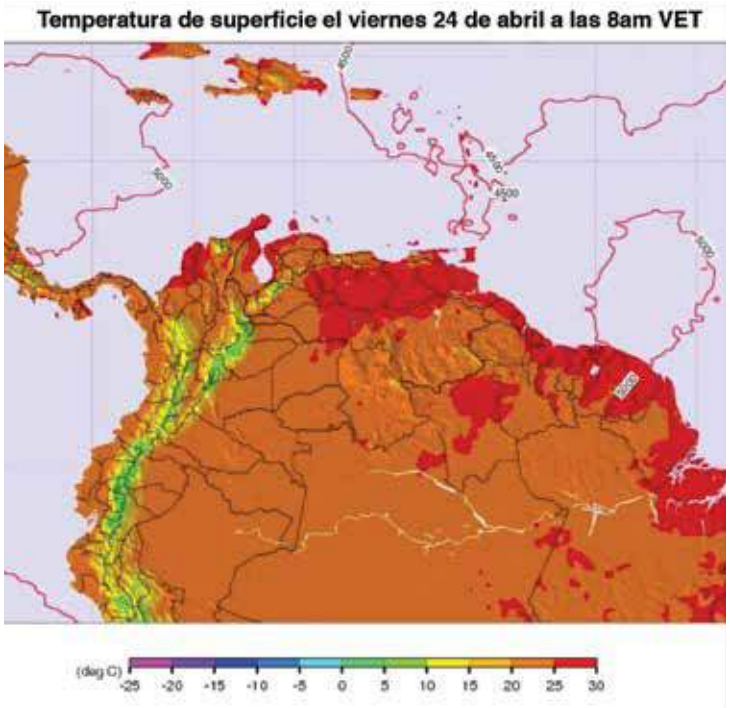


Figura 21.
Ejemplos del pronóstico del clima

Los modelos climáticos utilizan métodos cuantitativos para simular las interacciones dentro de la atmósfera, la tierra, los océanos y el hielo. Se utilizan para estudiar la dinámica del sistema climático y proyectar climas futuros. A medida que el conocimiento y la potencia informática aumentaron, los modelos climáticos se volvieron mucho más complejos con el tiempo (Figura 22). Los modelos climáticos dividen la Tierra en cuadrículas espaciales y celdas interrelacionadas y calculan los cambios en períodos de tiempo. En general, se incluyen menos detalles que en los pronósticos del tiempo, para minimizar la intensidad computacional (Figura 23).[28] [29]

26 http://www.weather-forecast.com/maps/Ecuador

27 World Meteorological Organization http://www.wmo.int/pages/index_en.html

28 PCC Third Assessment Report, Technical Summary of Working Group I Report, 2001; http://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling, http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_models.php

29 http://www.metoffice.gov.uk/climate-guide/science/science-behind-climate-change/hadley

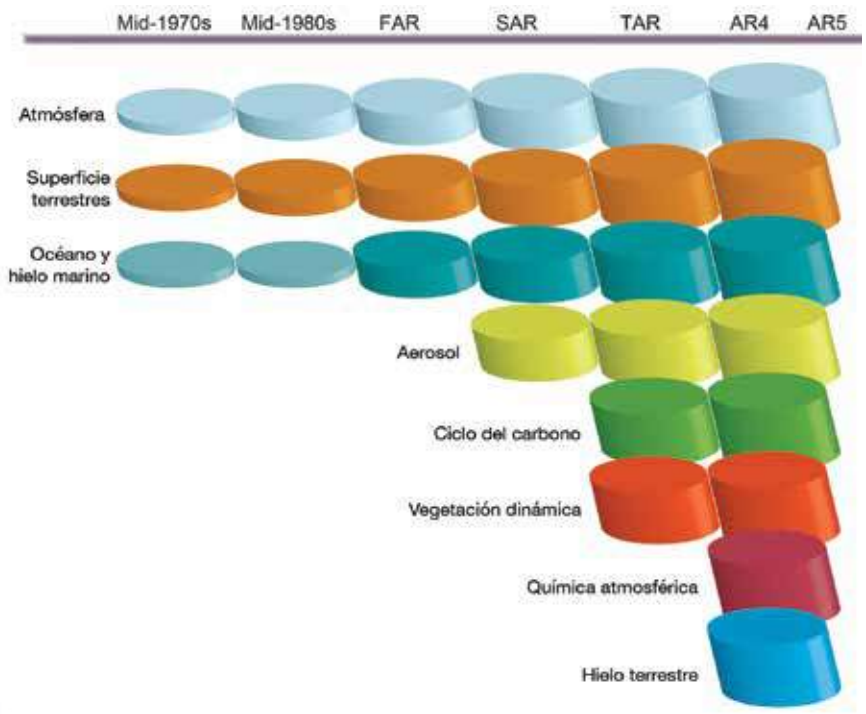


Figura 22.
Evolución de los modelos del clima

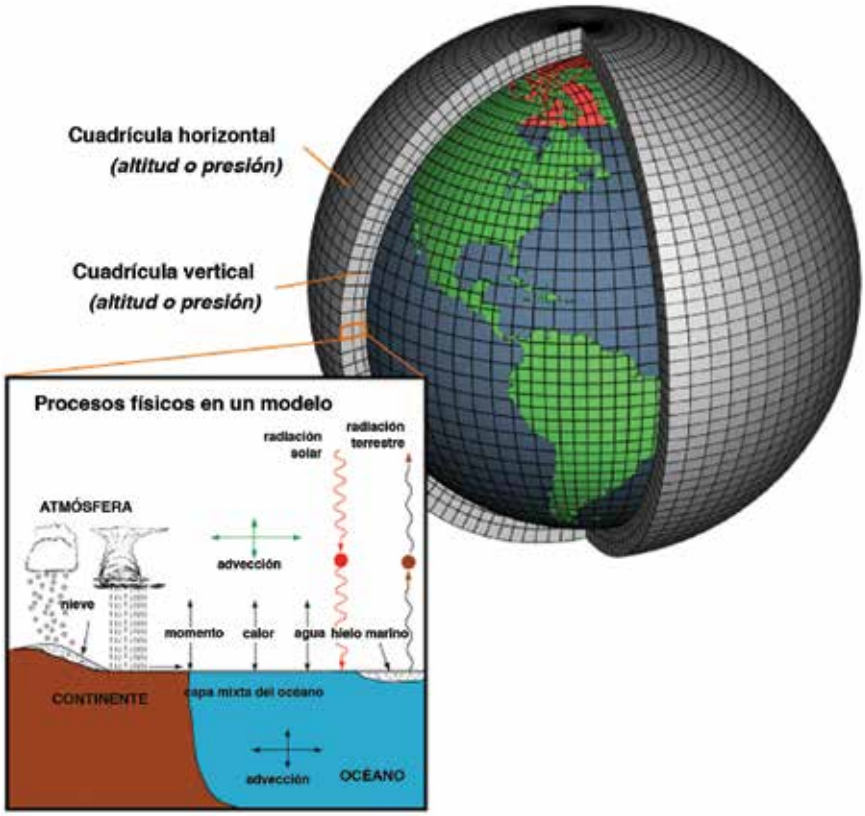


Figura 23.
Esquema para el modelo atmosférico global

Las zonas climáticas son regiones espaciales con patrones climáticos generalmente similares. Existen varios sistemas de clasificación, algunos de los cuales usan los términos *tropical* y *subtropical*. La zona tropical se define como la región entre los Trópicos de Cáncer y Capricornio (23,45° de latitud norte y sur) y se caracteriza por tener un clima generalmente húmedo, en el que los doce meses tienen temperaturas medias de al menos 18 °C. La zona subtropical se define como la región entre los trópicos y los 35° de latitud norte o sur, donde generalmente hay al menos ocho meses con una temperatura media de por lo menos 10 °C, y que generalmente es árida en el lado oeste de los continentes y húmeda en el lado este.

El sistema de clasificación climática de Köppen-Geiger se basa en el principio de que la vegetación es la mejor expresión del clima.[30] Incorpora conjuntos de datos que incluyen: temperatura media anual, precipitación media anual y precipitación estacional. No utiliza el término subtropical.

1ra	2do	3ro	Descripción	Criterios*
A			Tropical	Tcold ≥ 18
	f		- Bosque pluvial	Pdry ≥ 60
	m		- Monzón	Not (Af) & Pdry ≥ 100-MAP25
	w		- Sabana	Not (Af) & Pdry < 100-MAP25
B			Árido	MAP < 10 x Pthreshold
	W		- Desierto	MAP < 5 x Pthreshold
	S		- Estepa	MAP ≥ 5 x Pthreshold
		h	- Caliente	MAT ≥ 18
		k	- Frío	MAT < 18
C			Temperatura	Thot > 10 & 0 < Tcold < 18
	s		- Verano seco	Psdry < 40 & Psdry < Pwwet /3
	w		- Invierno seco	Pwdry < Pswet/10
	f		- Sin temporada seca	Not (Cs) or (Cw)
		a	- Verano caliente	T hot ≥ 22
		b	- Verano cálido	Not (a) & Tmon10 ≥ 4
		c	- Verano frío	Not (a or b) & 1 ≤ Tmon10 < 4
D			Frío	Thot >10 & T cold ≤ 0
	s		- Verano seco	Psdry < 40 & Psdry < Pwwet/3
	w		- Invierno seco	Pwdry < Pswet/10
	f		- Sin temporada seca	Not (Ds) or (Dw)
		a	-Verano caliente	Thot ≥ 22
		b	- Verano calido	Not (a) & T mon10 ≥ 4
		c	- Verano frio	Not (a,b or d)
		d	- Verano muy muy frío	Not (a or b) & Tcold < -38
E			Polar	Thot < 10
	T		- Tundra	Thot > 0
	F		- Helada	Thot ≤ 0

Tabla 9. Sistema de clasificación Köppen-Geiger

Los mapas a continuación muestran las aplicaciones de las zonas de Köppen-Geiger a América del Sur y, con más detalle, a Ecuador.

30 Peel et al. (2007) at http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/30/50/98/PDF/hess-11-1633-2007.pdf

Figura 24.
Zonas de clima Köppen-Geiger para América del Sur

HIDRONACIÓN © CELEC EP

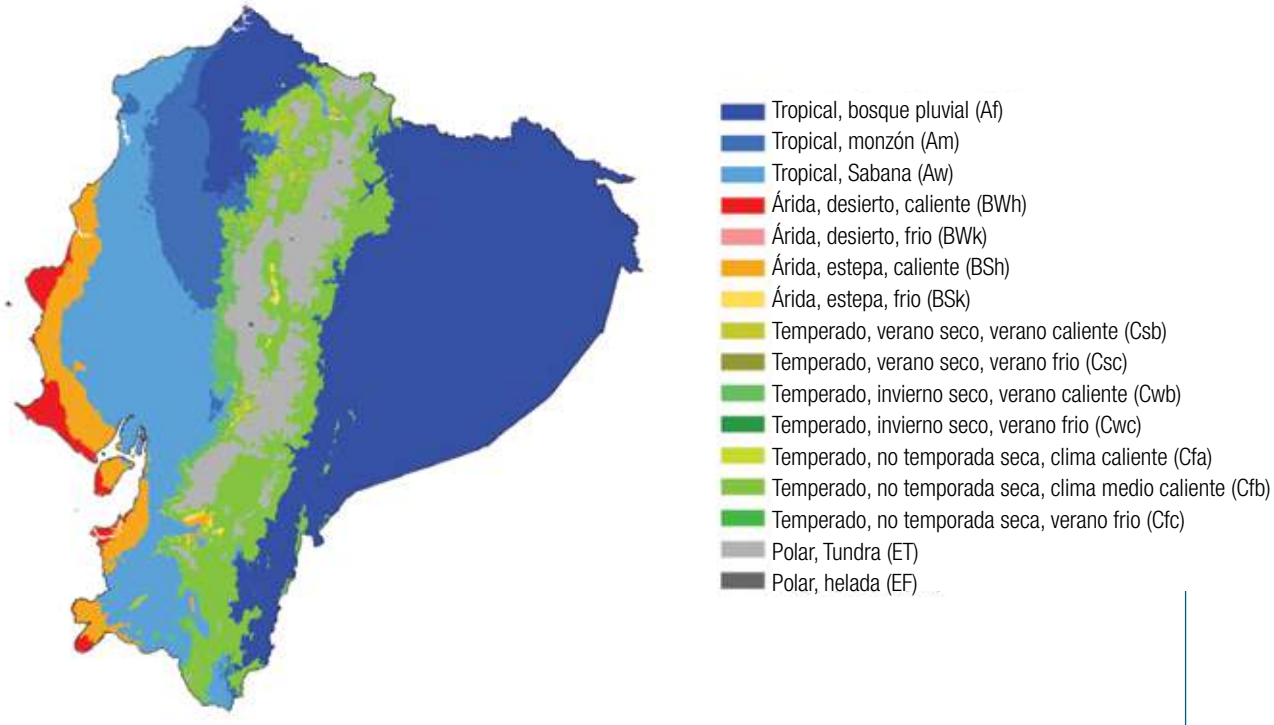


Figura 25
Mapa de los climas Köppen-Geiger para Ecuador (1980-2016)[31]

Como se mencionó anteriormente, el tiempo se refiere al cambio de los factores a corto plazo (es decir, a diario) y el clima se refiere al cambio a largo plazo (es decir, usualmente en 30 años) en los factores. El tiempo, por supuesto, es variable de un día a otro, pero el clima también es variable. La variabilidad climática es la forma en que el clima fluctúa por encima o por debajo del valor promedio a largo plazo. Esta variabilidad se puede ver, por ejemplo, en los registros de precipitación a largo plazo (Figura 26).[32] También hay varios ciclos a largo plazo que se han identificado en los datos climáticos históricos.

31 Beck et al: Present and Future Köppen-Geiger maps. Una introducción más detallada sobre el clima de Ecuador se puede encontrar en https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/GeografiaClima/.

32 Uhlenbrook, https://ocw.tudelft.nl/courses/hydrology-of-catchments-rivers-and-deltas/

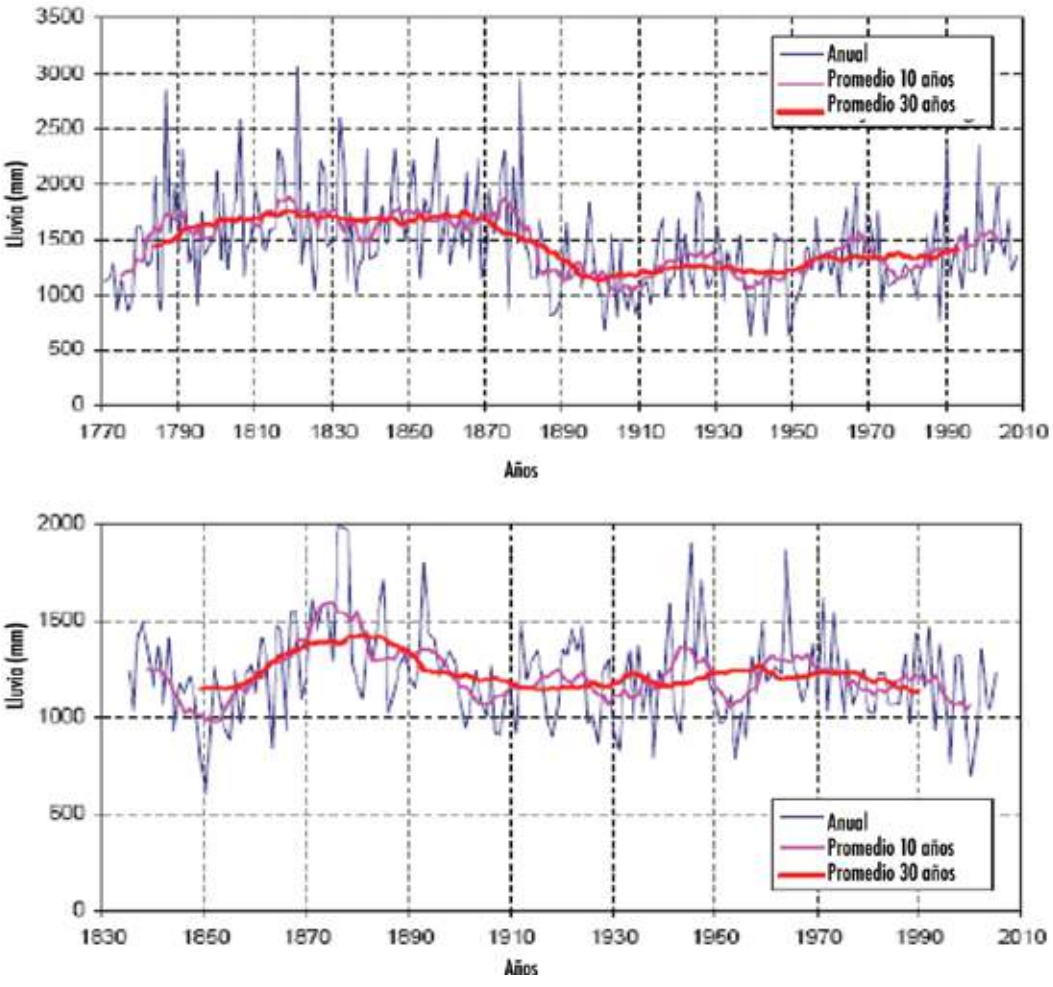


Figura 26.
Precipitación anual en Seúl, Corea (arriba), y en Charleston, Estados Unidos (abajo)

Sesión 2.2 Hidrología

Propósito y objetivos de aprendizaje	La sesión presenta el ciclo hidrológico y revisa otros conceptos básicos como la variabilidad, cuencas, aguas superficiales y subterráneas, y las relaciones lluvia-escorrentía. Se discutirá la hidrología regional en los Andes tropicales. Los participantes aprenderán a comprender y trabajar con las curvas de duración del flujo (CDF) como herramienta clave.
Contenido	• ¿Cómo podemos describir el ciclo del agua y los equilibrios hídricos? • ¿Cómo influye la cuenca en la escorrentía? • ¿Cómo construimos e interpretamos las CDF?
Aspectos clave	El ciclo hidrológico es complejo y diferente para cada cuenca. La hidrología de Ecuador se caracteriza por altas precipitaciones, alta evapotranspiración y estaciones húmedas y secas pronunciadas. La escorrentía puede describirse y analizarse con la ayuda de hidrogramas y CDF.
Temas de discusión y ejercicios	Construir una CDF a partir de datos de flujo mensuales o de otros datos disponibles (por ejemplo, en registros del INAMHI). Trabajar en grupos o individualmente. Requiere utilizar Excel. Usar el Documento 2.2.2. (archivo en Excel) con explicaciones paso a paso, si es necesario.
Recursos adicionales	Curso en línea sobre hidrología en http://ocw.unesco-ihe.org/course/view.php?id=7
Lecturas clave	Documento 2.2.1 - INAMHI (2017) Publicación de la Información Generada por las 35 Estaciones Hidrológicas Automáticas 2014 – 2015 – 2016. Documento 2.2.2 – Curva de duración de flujos CDF (datos en Excel)

El ciclo del agua, o ciclo hidrológico, describe el movimiento continuo del agua sobre, encima y debajo de la superficie de la tierra (Figura 27)[33].

La masa de agua en estas regiones se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo. Las mayores reservas de agua se encuentran en los océanos, glaciares y nieve, aguas subterráneas, permafrost, lagos, humedad del suelo, humedales, atmósfera, ríos y organismos, en este orden.

Las actividades humanas tienen impactos tanto directos como indirectos en el ciclo del agua y en la gestión de los recursos hídricos. Los impactos directos resultan de flujos alterados para riego, industria y usos domésticos. Los embalses almacenan un volumen de 6.000 km^3. Indirectamente, los cambios en el uso de la tierra resultan en alteraciones en la humedad del suelo, la evapotranspiración y la lluvia (en grandes áreas). El ciclo del agua también se ve afectado por el cambio climático antropogénico. El aire más cálido retiene más humedad y, por lo tanto, acelera el ciclo.

33 Oki and Kanae (2006) Global Hydrological Cycles and World Water Resources. Science.

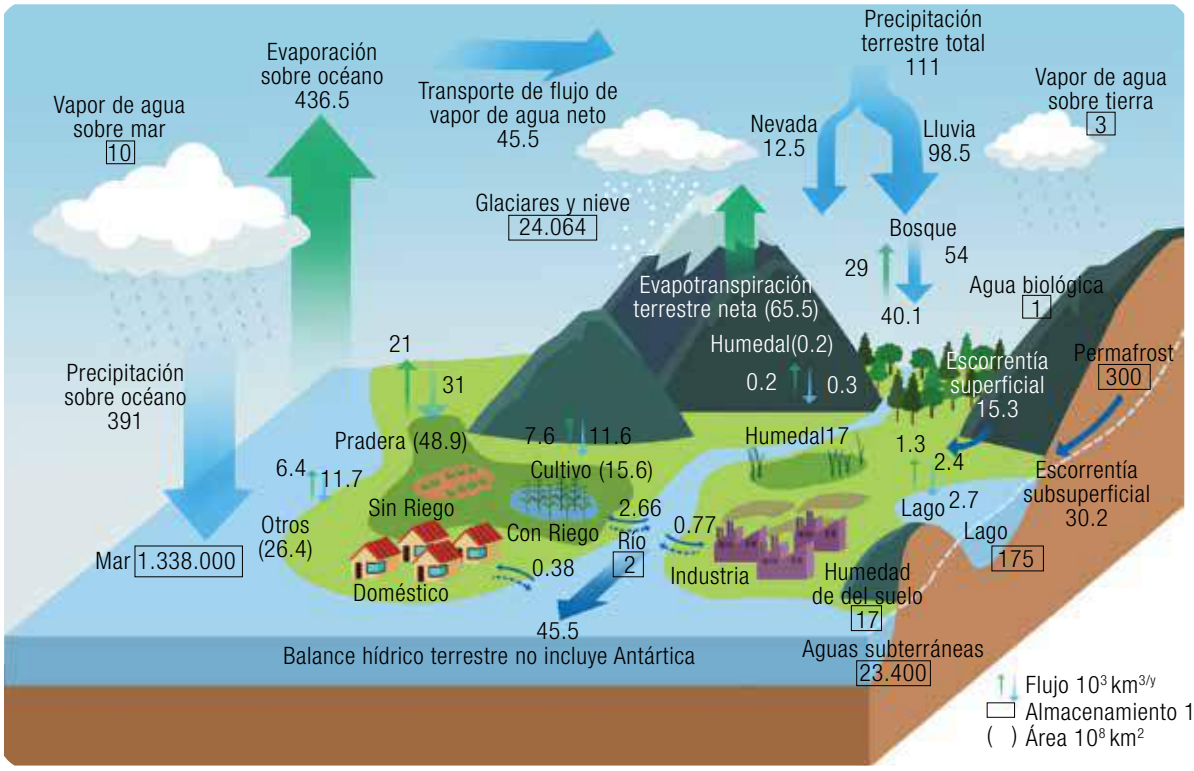


Figura 27.
Flujos y almacenamiento de agua

Se usa una ecuación de equilibrio del agua para describir el flujo de agua dentro de un sistema (donde [mm a^{-1}= milímetros/año). El balance hídrico de una cuenca fluvial es:[34]

$$P = R + E + dS/dt$$

P: Precipitación [mm a^{-1}]

R: Escorrentía [mm a^{-1}]

E: Evaporación [mm a^{-1}]

dS/dt: Cambio de almacenamiento por paso de tiempo [mm a^{-1}]

Los términos para transpiración e infiltración también pueden incluirse en esta ecuación.

Por ejemplo, el balance hídrico anual de la cuenca del río Amazonas es aproximadamente:

$14.213\ km^3 = 7.153\ km^3\ (E) + 7.060\ km^3\ (R)$

La siguiente tabla muestra una serie de ríos que representan diferentes características.

34 Mucho de esta sesión está basado en Uhlenbrook, https://ocw.tudelft.nl/courses/hydrology-of-catchments-rivers-and-deltas/

Río	Tamaño de captación	Pluviosidad		Evapo-transpiración		Escorrentía		Coeficiente de escorrentía
	$10^3 km^2$	mm/a	$10^9 m^3$	mm/a	$10^9 m^3$	mm/a	$10^9 m^3$	%
Nilo	2.803	220	620	190	534	30	86	14
Misisipi	3.924	800	3.100	654	2.540	142	558	18
Paraná	975	1.000	980	625	610	382	372	38
Orinoco	850	1.330	1.150	420	355	935	795	70
Mekong	646	1.500	970	1.000	645	382	325	34

Tabla 10. Datos hidrológicos de ejemplos de cuencas

Los principios del equilibrio del agua pueden aplicarse a un problema de ejemplo[35].

En un año determinado, una cuenca con un área de 2.500 km^2 recibió 1,3 m de precipitación. La tasa de flujo promedio medida en un rio que drena la cuenca fue de 30 m^3/s.

a. ¿Cuánta escorrentía total del río ocurrió en el año (en m^3)?

b. ¿Cuál es el coeficiente de escorrentía?

c. ¿Cuánta agua se pierde debido a los efectos combinados de evaporación, transpiración e infiltración (expresada en m^3)?

Soluciones:

a. Volumen total de escorrentía = número de segundos en un año × caudal promedio

$$31.536.000 \times 30\ m^3/s = 946.080.000\ m^3$$

b. Coeficiente de escorrentía = volumen de escorrentía ÷ volumen de precipitación

$$= 946.080.000\ m^3 \div (1{,}3\ m \times 2.500\ m^2 \times 1.000.000)$$

$$= 946.080.000\ m^3 \div 3.250.000.000\ m^3$$

$$= 0{,}29 \text{ o } 29\ \%$$

c. Pérdida total de agua debido a la evaporación, transpiración, e infiltración

35 Basado en http://www.aboutcivil.org/hydrology.html

Después de un pequeño reordenamiento, la ecuación del balance hídrico se convierte en:

$$E + T + F = P - R - \Delta S$$

donde: P = 3.250.000.000 m^3; R = 946.080.000 m^3; ΔS = 0 (no hay cambio en el almacenamiento); T = transpiración, y F = infiltración

$$E + T + F = 3.250.000.000\ m^3 - 946.080.000\ m^3$$

$$= 2.303.920.000\ m^3$$

Dividido por el número de m^2 en la cuenca:

$$2.500\ km^2 \times 1.000.000 = 2.500.000.000\ m^2$$

$$2.303.920.000\ m^3 \div 2.500.000.000\ m^2 = 0{,}92\ m$$

Como ejemplo para una cuenca grande típica, en la Figura 28[36] se proporciona una representación gráfica del balance hídrico en la cuenca del Mekong.

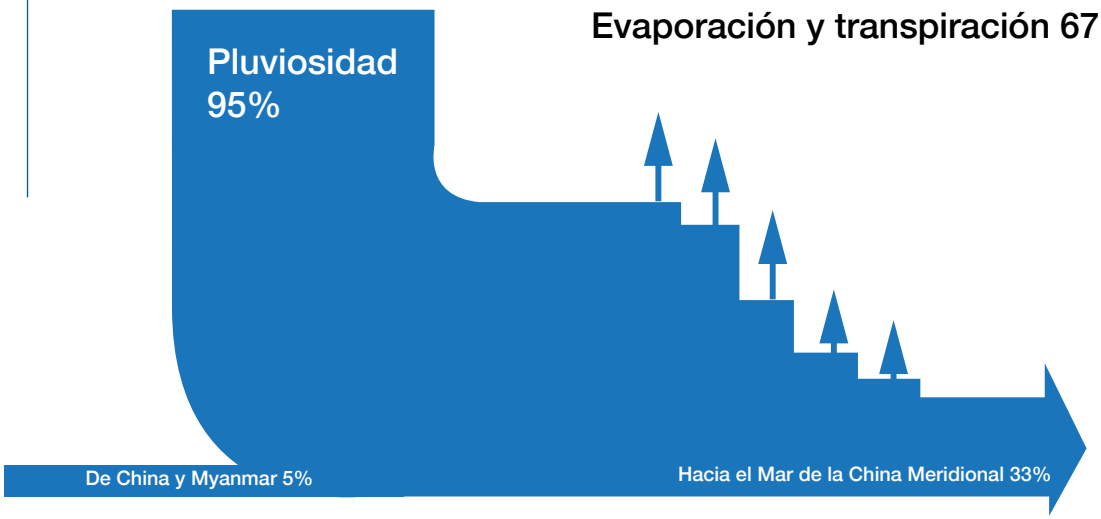


Figura 28.
Equilibrio de agua en la cuenca baja del Mekong

36 MRC (2009)

La cobertura del suelo en una cuenca no influye perceptiblemente en la precipitación, excepto en casos especiales como los siguientes:

- donde un área de agua abierta lo suficientemente grande, como un embalse, se encuentra en una región árida, puede cambiar el microclima y aumentar la humedad y la precipitación,
- donde un bosque nuboso puede capturar precipitaciones de las nubes,
- cuando un gran bosque contiguo, como en la Amazonía, crea su propio ciclo hidrológico interno, y la reducción de la evapotranspiración a causa de la deforestación puede disminuir las precipitaciones.

Sin embargo, el uso del suelo siempre tiene influencias directas e indirectas en la hidrología a través de la escorrentía, la evaporación y la transpiración. En la Tabla 11 se presentan los equilibrios de agua típicos para dos usos diferentes de la tierra en la misma zona climática.

P= Precipitación

$E_{total} = E_s + E_I + E_T$

R= Escorrentía

E_s= Evaporación del suelo

E_I= Evaporación de intercepción

E_T= Transpiración

				Expresado en % de E total		
	P	**E_{tota}**	**R**	**E_s**	**E_I**	**E_T**
Bosque	100	52	48	29	26	45
Tierra descubierta	100	42	58	62	15	23

Tabla II.
Equilibrio de agua corriente para tierra boscosa y abierta

En el problema de la muestra de equilibrio hídrico anterior, en los cálculos se utilizó la escorrentía total o promedio durante un período de tiempo. La escorrentía se genera por eventos de precipitación (es decir, lluvia, nevadas); su ocurrencia y cantidad dependen de las características del evento (es decir, intensidad, duración y distribución). La escorrentía también está influenciada por las características de una cuenca hidrográfica, como su tamaño, forma, topografía, suelos y enrutamiento, y por interferencias humanas como el drenaje de aguas pluviales, la extracción y las transferencias entre cuencas. Los picos de descarga en los ríos aguas abajo siguen a un evento de precipitación de alto volumen, o a una serie de eventos de menor volumen.

Como ejemplo, la Figura 29 muestra un pico de descarga después de un evento de precipitación de alto volumen (las barras negras en la parte superior representan la precipitación en mm, y las líneas azules a lo largo de la parte inferior representan la descarga en m^3/s). La figura también muestra que la descarga es continua, incluso durante períodos sin precipitación, debido a los flujos base en el sistema[37].

Descarga Central San Francisco. ©CELEC EP

37 Uhlenbrook, https://ocw.tudelft.nl/courses/hydrology-of-catchments-rivers-and-deltas//

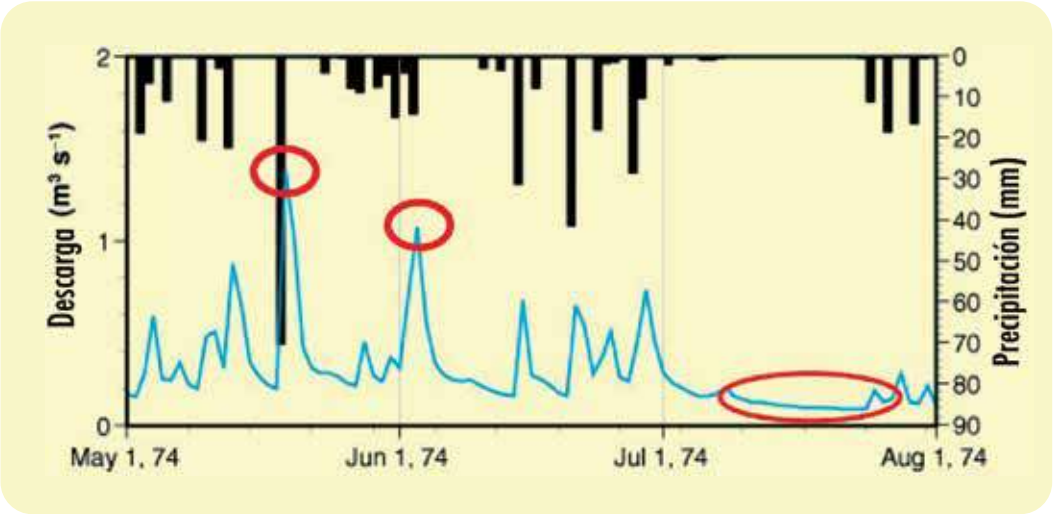


Figura 29.
Relación entre precipitación y descarga

En una cuenca grande, la descarga es generalmente "más plana" que en una cuenca pequeña, porque las inundaciones y los flujos bajos en diversos afluentes pueden llegar en diferentes momentos y cancelarse mutuamente. Solo si hay un clima similar en una región grande, habrá una gran diferencia entre flujos bajos y altos. Este es el caso, por ejemplo, en regiones con patrones climáticos monzónicos, como el Mekong (Figura 30; MRC 2009). Allí, el inicio de la temporada de inundaciones es cuando la descarga diaria promedio excede la descarga anual promedio a largo plazo (3.600 m^3/s en Luang Prabang). El final de la temporada es cuando la descarga diaria promedio es menor que la media a largo plazo.

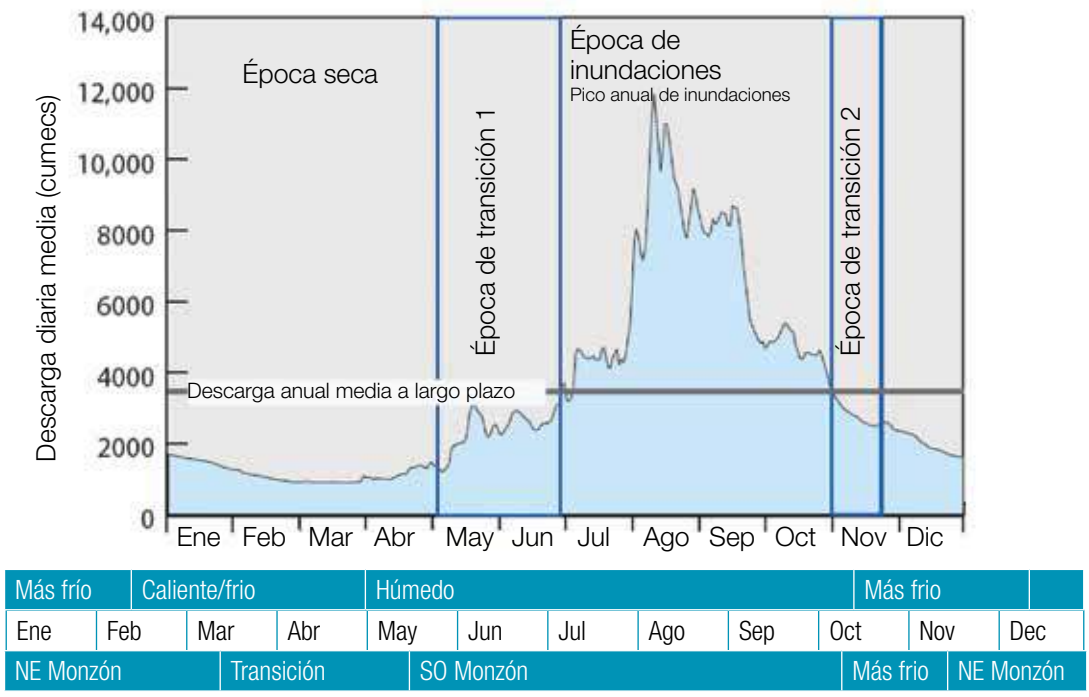


Figura 30.
Hidrografía típica del rio Mekong, en función de las temporadas climáticas

Un reservorio es un área natural (p. ej., aguas subterráneas, suelos forestales, lagos, humedales, glaciares, nieve) o artificial para el almacenamiento, la regulación y el control del agua. Los embalses influyen en la hidrología; por ejemplo, los reservorios naturales absorben y liberan gradualmente el agua y los reservorios artificiales pueden capturar y liberar lentamente las inundaciones. En el río representado en Figura 32, una represa se construyó en 1940 y no ha habido grandes inundaciones desde su construcción.[38]

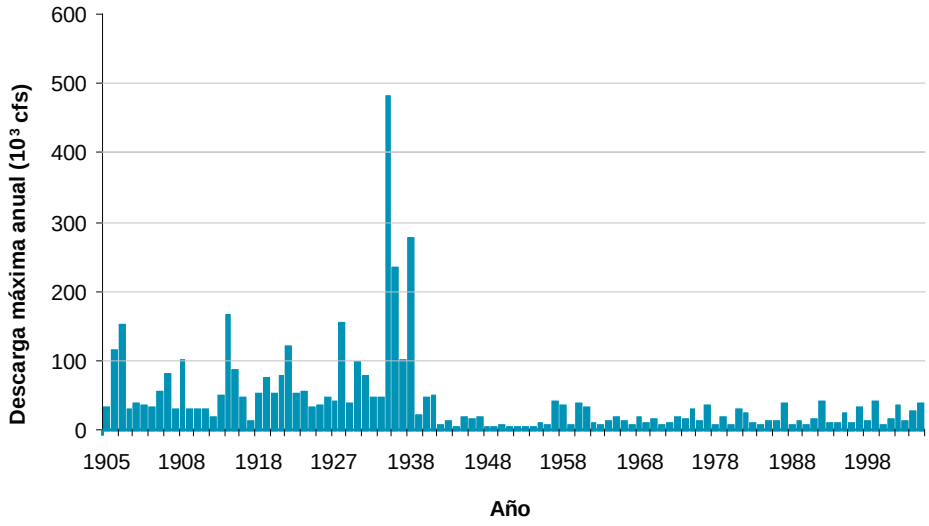


Figura 31.
Descarga máxima anual durante 106 años en el río Colorado, cerca de Austin, Texas

Un "período de retorno" es el intervalo de recurrencia promedio entre dos eventos, por ejemplo, entre dos inundaciones. En el ejemplo anterior, el flujo máximo de este río alcanzó valores superiores a 200.000 pies cúbicos por segundo, ft³/s (cfs) (por sus siglas en inglés: *cubic feet per second*) tres veces durante 106 años. Se pueden calcular varias probabilidades de eventos a partir de esta información.

(Nótese, sin embargo, que si bien para estos ejemplos se considerará toda la información de la Figura 32 [el "período de registro"], en realidad hay dos hidrologías distintas en estos datos. Para la predicción de eventos futuros solo se debe considerar el período posterior a 1940).

Ejemplo 1:

Flujo máximo anual = xT = 200.000 cfs
Número de ocurrencias en el registro de 106 años = 3
Por lo tanto, 2 intervalos de recurrencia en 106 años-
Periodo de retorno = T = 106/2 = 53 años

Ejemplo 2:

Flujo máximo anual = xT = 100.000 cfs
Número de ocurrencias en el registro de 106 años = 8
Por lo tanto, 7 intervalos de recurrencia en 106 años-
Periodo de retorno = T = 106/7 = 15,2 años

Ejemplo 3:

Probabilidad de que el flujo máximo anual sea igual a o exceda los 100.000 cfs al menos una vez en los siguientes cinco años.

P (X ≥ 100,000 cfs al menos una vez en los próximos n años)
$= 1 - (1\text{-}1/T)^n$
$= 1\text{-} (1\text{-}1/15.2)^5 = 0,29$

Si bien cifras como esta son útiles, se debe tener cuidado de no interpretar en exceso los datos hidrológicos. Por ejemplo, se podrían ocultar más inundaciones en los años de altos flujos.

38 University of Texas, Austin. http://www.caee.utexas.edu/prof/maidment/GradHydro2008/gradhydro2008.htm

Los hidrólogos usan modelos para comprender sistemas ambientales complejos. Dividen el territorio en cuencas y subcuencas (como en la Figura 32 para Ecuador), que luego se pueden agrupar en zonas con base en su hidrología, fisiografía, uso del suelo y desarrollo de recursos existentes, planificados y potenciales. Las contribuciones de las subcuencas en los bancos izquierdo y derecho a los flujos principales dependen de su tamaño, precipitación, evaporación (en función de la vegetación y el clima) e infiltración (debido a la textura del suelo, la estructura y el contenido de humedad).

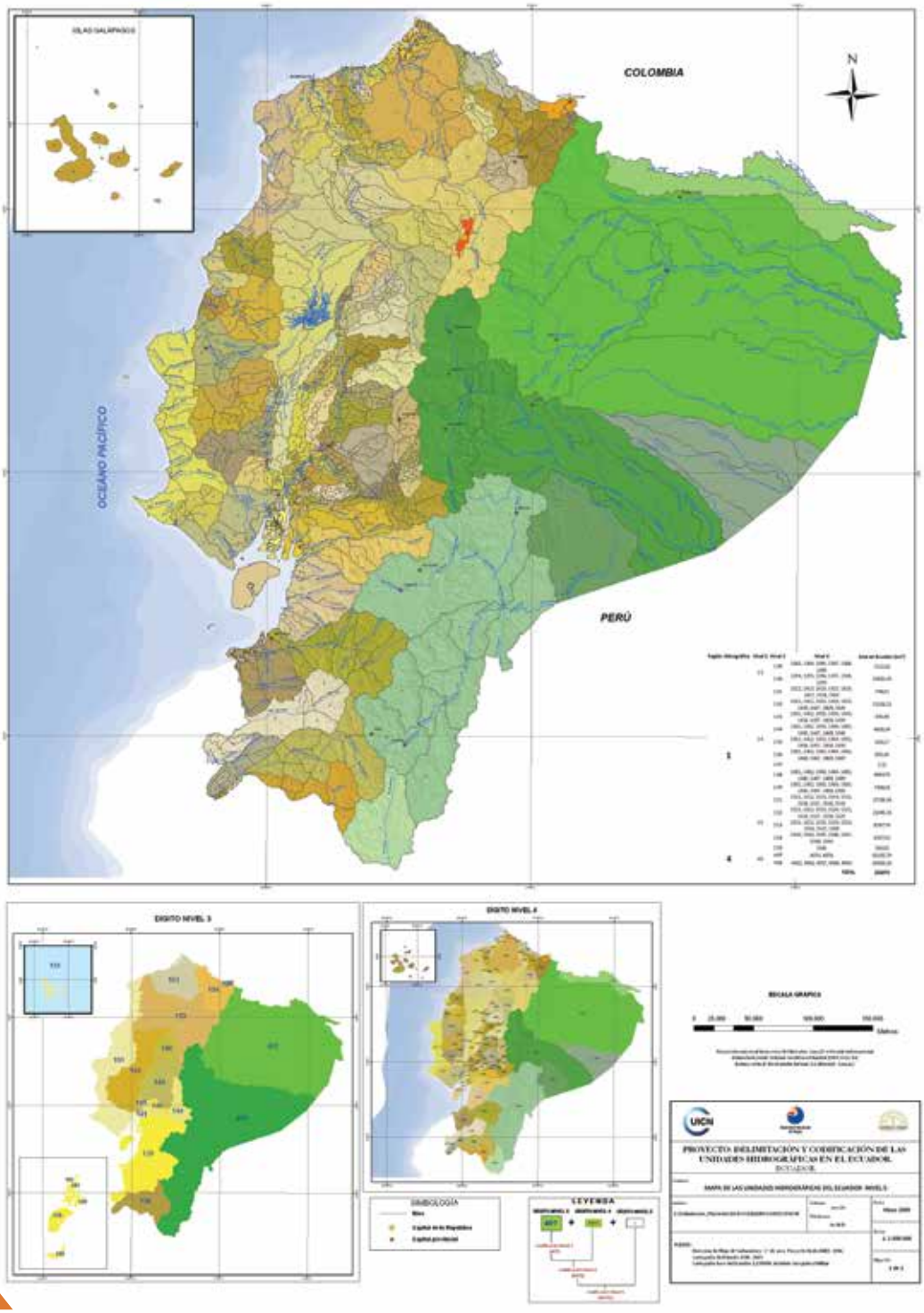


Figura 32.
Clasificación de las cuencas del Ecuador

Diferentes zonas de Ecuador tienen diferente exposición / probabilidad de inundaciones, como lo muestra el siguiente mapa. Básicamente, estas se concentran en las tierras bajas costeras y amazónicas.

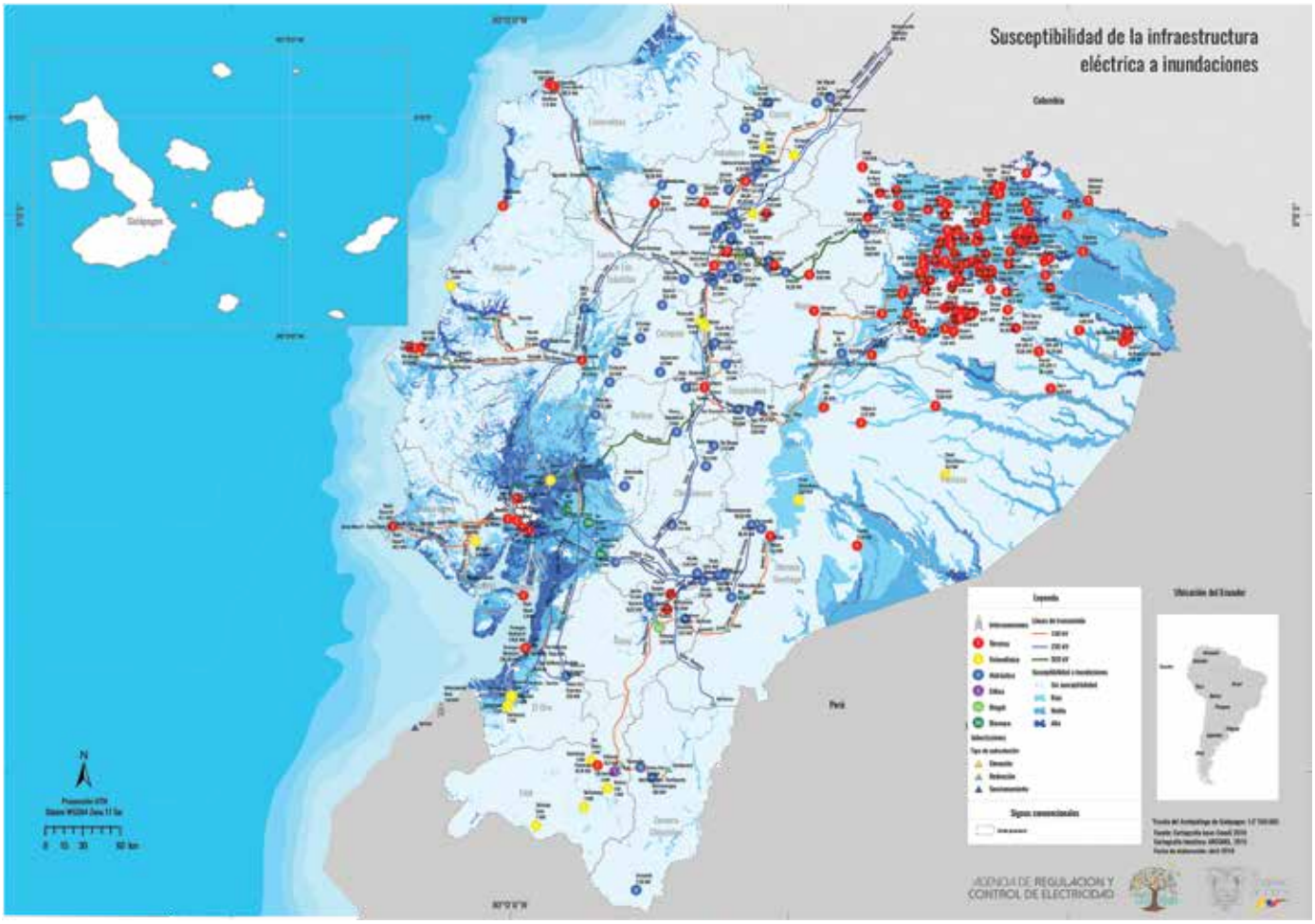


Figura 33.
Susceptibilidad de la infraestructura eléctrica a inundaciones baja, media y alta[39]

En las regiones con una exposición muy alta a las inundaciones, se hace mucho hincapié en una mejor comprensión de la hidrología de las inundaciones con fines de previsión y preparación frente a las inundaciones. Un buen ejemplo es nuevamente la cuenca del Mekong. En 2000 y 2011 se produjeron inundaciones extremas en este río en la llanura de inundación de Camboya y en el delta del Mekong en Vietnam (Figura 34).[40] Un diagrama de dispersión de la distribución conjunta del pico de inundación anual (m^3/s) y del volumen de caudal anual (km^3) en Kratie, en la corriente principal del Mekong, muestra la cantidad y el caudal de agua en estos dos eventos. Los "cuadros" sombreados indican una (1δ) y dos (2δ) desviaciones estándar para cada variable, por encima y por debajo de sus respectivas medias (líneas rojas). Los eventos fuera del cuadro de 1δ pueden definirse como años de inundación

39 Plan Maestro de Electrificación, https://www.recursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/, mapa 4.

40 MRC (2011) Annual Mekong Flood Report 2010.

significativa, con un intervalo de recurrencia anual mayor de 10 años, y los que están fuera del cuadro de 2δ como años de inundación históricamente extremos, con un intervalo de recurrencia anual mayor de 20 años.

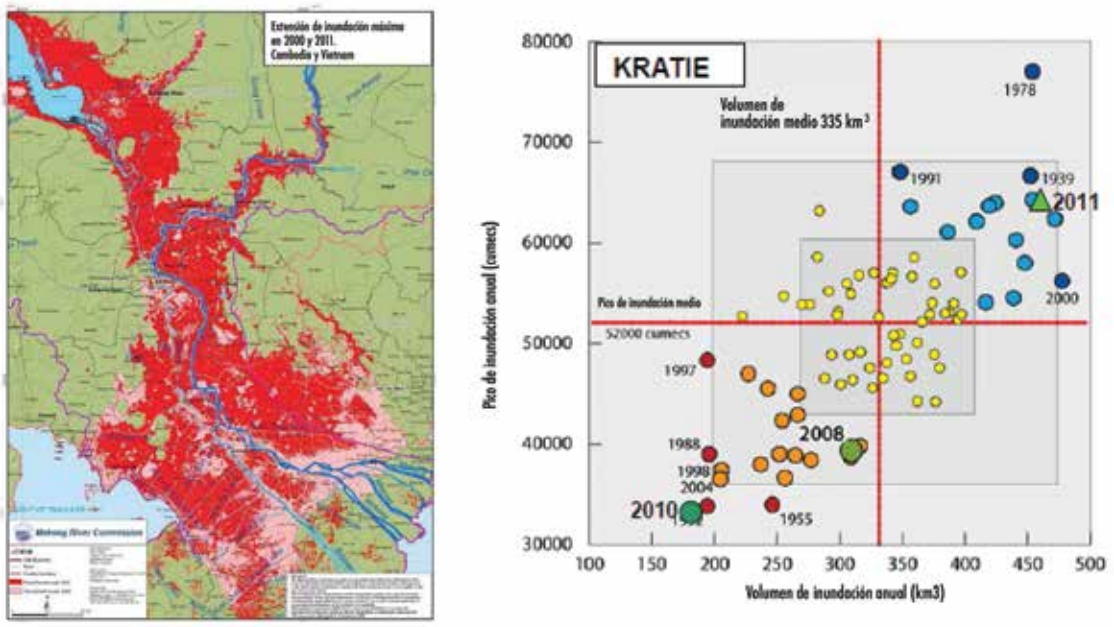


Figura 34.
Eventos de inundación del Mekong

Una tarea clave de la hidrología es predecir la probabilidad de flujos. Una de las herramientas que utilizan los hidrólogos es la curva de duración del flujo (CDF), una representación gráfica de las probabilidades de excedencia acumulativa de los flujos. El flujo se representa en el eje y, generalmente como la media o total diaria, pero también se usan otros períodos. El porcentaje de tiempo que iguala o excede a un flujo determinado, la probabilidad de excedencia acumulativa, se representa en el eje x. Por ejemplo, en la Figura 35, alrededor del 10% del tiempo del flujo es mayor a 10 m^3/s.[41] (Los ejes son escalas logarítmicas.)

Esta figura muestra datos de una cuenca en Sudáfrica. Los flujos bajos o básicos fueron mayores en el estado virgen (natural) que en el estado actual (desarrollado). Esto sugiere que, en el estado natural, el agua se liberaba lentamente de los "reservorios" naturales, como los suelos forestales primarios o los humedales. Estos reservorios fueron dañados posteriormente por el desarrollo y, por lo tanto, perdieron su capacidad de retener agua.

COCA CODO SINCLAIR. ©CELEC EP

41 Uhlenbrook. Engineering Hydrology, https://ocw.tudelft.nl/courses/hydrology-of-catchments-rivers-and-deltas/

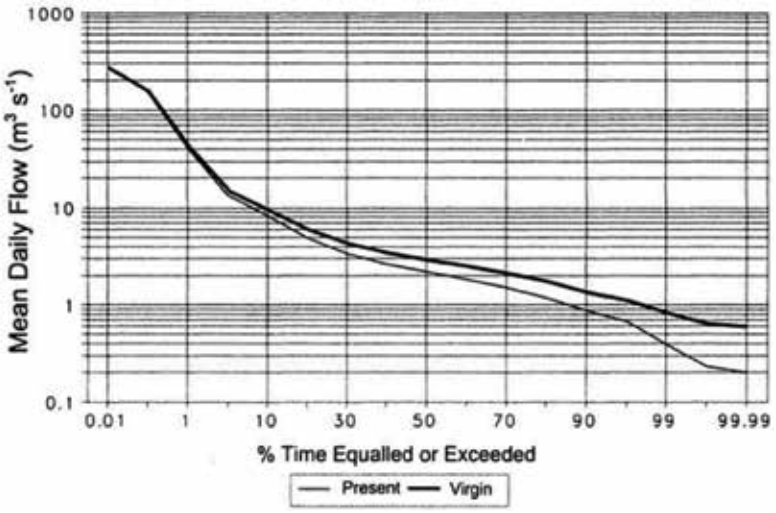
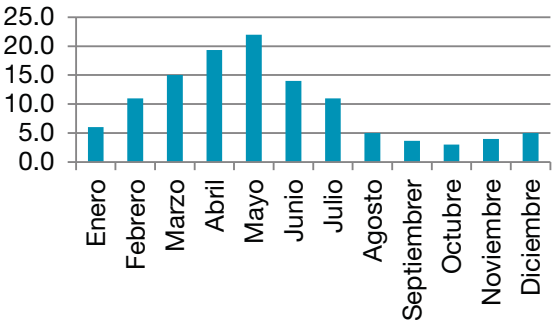


Figura 35.
CDF de la situación actual (desarrollada) y virgen (natural)

Las CDF son herramientas esenciales en la hidrología y son muy útiles para ilustrar y analizar los cambios en el flujo. Por lo tanto, los construiremos aquí paso a paso y los utilizaremos en este manual de capacitación en diferentes sesiones. Los siguientes pasos son necesarios para construir una CDF:[42]

1. Recopile datos de flujo durante un período de tiempo (mensualmente en este ejemplo).

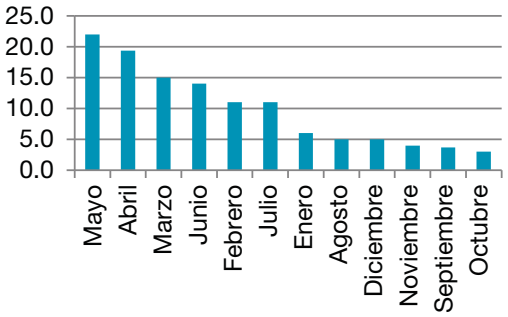
Flujo promedio (m3/s)				
	Promedio mensual en 3 años	**2013**	**2012**	**2011**
Enero	6,0	5	6	7
Febrero	11,0	10	11	12
Marzo	15,0	15	14	16
Abril	19,3	20	20	18
Mayo	22,0	22	26	18
Junio	14,0	15	13	14
Julio	11,0	10	11	12
Agosto	5,0	5	6	4
Septiembre	3,7	2	3	6
Octubre	3,0	2	3	4
Noviembre	4,0	5	4	3
Diciembre	5,0	5	5	5



42 Esto también se demuestra en el archivo adjunto de Excel (documento 2.2.2).

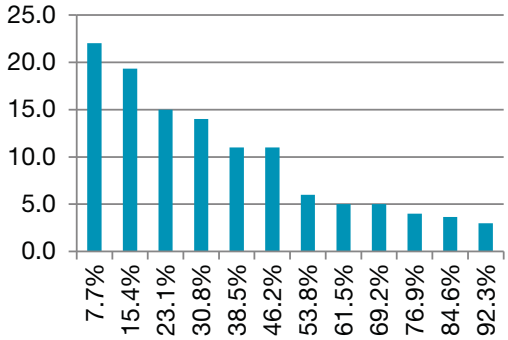
2. Ordene los meses de mayor a menor flujo:

	Promedio mensual en 3 años	Rango
Mayo	22,0	1
Abril	19,3	2
Marzo	15,0	3
Junio	14,0	4
Febrero	11,0	5
Julio	11,0	6
Enero	6,0	7
Agosto	5,0	8
Diciembre	5,0	9
Noviembre	4,0	10
Septiembre	3,7	11
Octubre	3,0	12

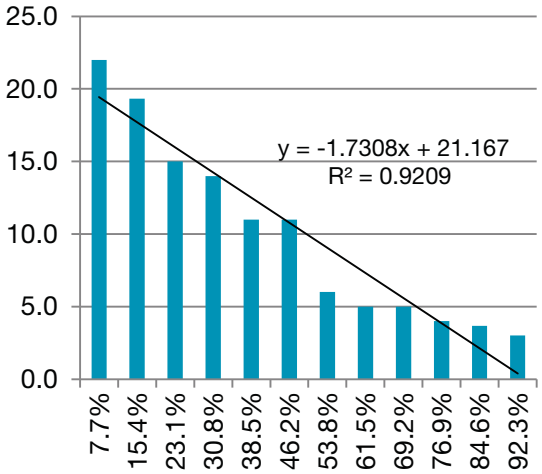


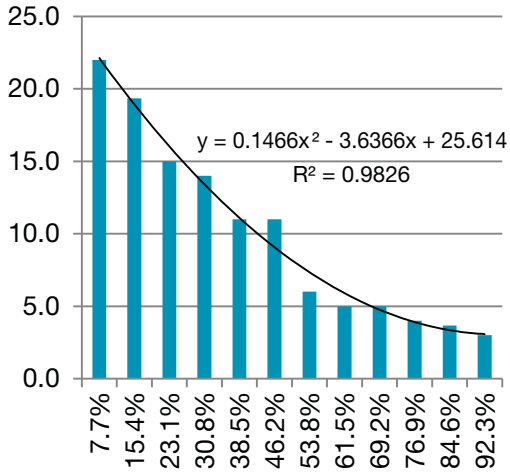
3. Calcule y exponga la probabilidad de excedentes (p = m / (n + 1) para flujos clasificados, con m = rango y n = número de observaciones:

	Probabilidad de excedentes	Promedio mensual en 3 años
Mayo	7,7%	22,0
Abril	15,4%	19,3
Marzo	23,1%	15,0
Junio	30,8%	14,0
Febrero	38,5%	11,0
Julio	46,2%	11,0
Enero	53,8%	6,0
Agosto	61,5%	5,0
Diciembre	69,2%	5,0
Noviembre	76,9%	4,0
Septiembre	84,6%	3,7
Octubre	92,3%	3,0



4. Prediga los flujos futuros analizando las tendencias. Más muestras y una escala más fina (datos semanales, diarios o incluso por hora) permiten ajustes más finos a medida que los datos discretos se acercan a los datos continuos. En la figura de la izquierda, una línea de tendencia recta se ajusta a los datos y en la figura de la derecha se aplica una línea de tendencia polinómica.





Se debe tener cuidado al ajustar los modelos. La distribución normal de los datos a menudo se asume como el modelo más fácil y familiar, pero los datos hidrológicos generalmente no se distribuyen de forma normal. Además, los valores extremos (inundaciones y caudales bajos) son las partes de una CDF que a menudo son las más interesantes. Sin embargo, son menos frecuentes en las muestras y más difíciles de ajustar a un modelo estadístico.

Incluso sin cambio climático, existe variabilidad en los datos hidrológicos. Existen muchas causas de incertidumbre asociadas con la definición y el manejo de la variabilidad hidrológica. El grado de variabilidad es diferente en todo el mundo. A menudo falta información sobre cómo definirla y predecirla adecuadamente. Los factores naturales (por ejemplo, la escorrentía) con variabilidad conocida probablemente cambiarán en el futuro debido al cambio climático.

PICO DE PATO - CENTRAL BABA. ©Pamela Barreiro CELEC EP

Sesión 2.3 Ingeniería hidroeléctrica

Propósito y objetivos de aprendizaje	La sesión proporciona una visión general del ciclo del proyecto y los aspectos de la energía hidroeléctrica relacionados con el agua: flujos disponibles, altura, almacenamiento, capacidad instalada, factor de carga, generación, flujos residuales, derrames. Explicará cómo se utilizan los datos hidrológicos para el diseño y las decisiones operativas en ingeniería hidroeléctrica. Se pueden discutir ejemplos de proyectos en Ecuador. Los participantes aprenderán cómo las CDF y otra información hidrológica están relacionadas con la energía hidroeléctrica.
Contenido	• ¿Cuáles son las etapas en el ciclo de desarrollo del proyecto hidroeléctrico? • ¿Cuáles son las opciones técnicas clave? • ¿Cómo se gestiona el agua en un embalse? • ¿Cómo se puede usar una CDF para planificar el diseño y las operaciones de la energía hidroeléctrica?
Aspectos claves	La información hidrológica juega un papel clave en el desarrollo de la energía hidroeléctrica. El diseño principal y las opciones operativas dependen de la curva de duración del flujo. Las soluciones óptimas pueden cambiar si la CDF cambia.
Temas de discusión y ejercicios	Describir el diseño de una instalación hidroeléctrica con la que esté familiarizado y explicar las elecciones de diseño que se hicieron.
Recursos adicionales	Documento 2.3.2 - IFC (2015) Hydroelectric Power: A Guide for Developers and Investors.
Lecturas clave	Documento 2.3.1 - Washington Sandoval (2018) Diseño de obras hidrotécnicas. Capítulos 1 (Presas y embalses), 3 (Diseño hidrológico) y 6 (Centrales hidroeléctricas).

El ciclo de desarrollo de un proyecto hidroeléctrico generalmente incluye tres etapas: planificación, implementación y operación (Figura 36).[43] La información hidrológica y climática es más relevante durante los estudios de preparación, cuando se necesitan para decisiones a largo plazo, y durante las operaciones del proyecto.

43 Altinbilek, Dogan (2014) Course CE 571 Handout, Middle Eastern Technical University

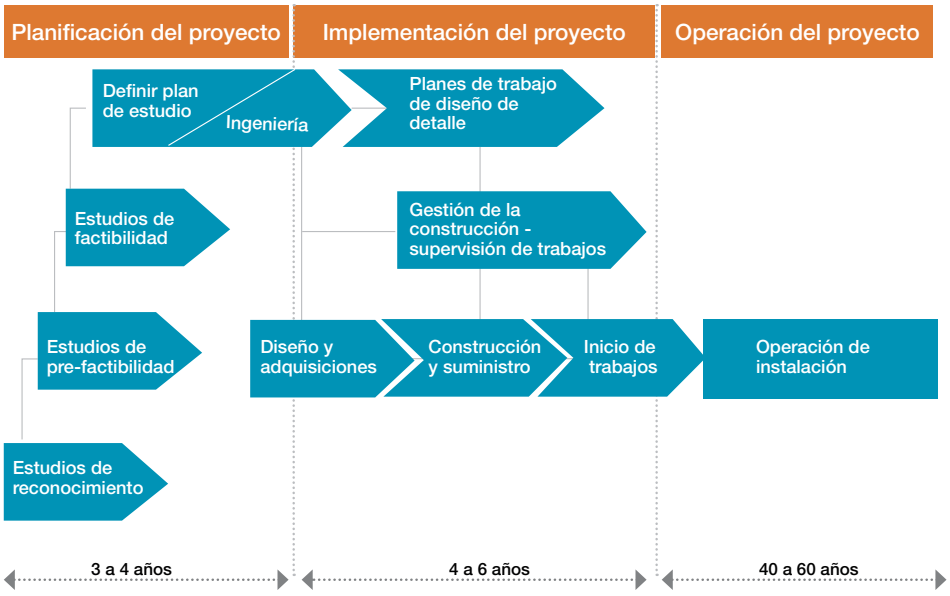


Figura 36.
Ciclo del proyecto

En la generación de energía hidroeléctrica, la cantidad de energía extraída del agua es proporcional al volumen de agua y la caída (diferencia de nivel entre la fuente y el flujo de salida). Actualmente, se construyen dos tipos de diseños de energía hidroeléctrica: de filo de río ("run of river") y de embalse. Los proyectos de filo de río, como se muestra a continuación, tienen poca o ninguna capacidad de almacenamiento (generalmente menos de un día promedio de flujos) y la cantidad de electricidad generada es proporcional al flujo del río en cualquier tiempo[44].

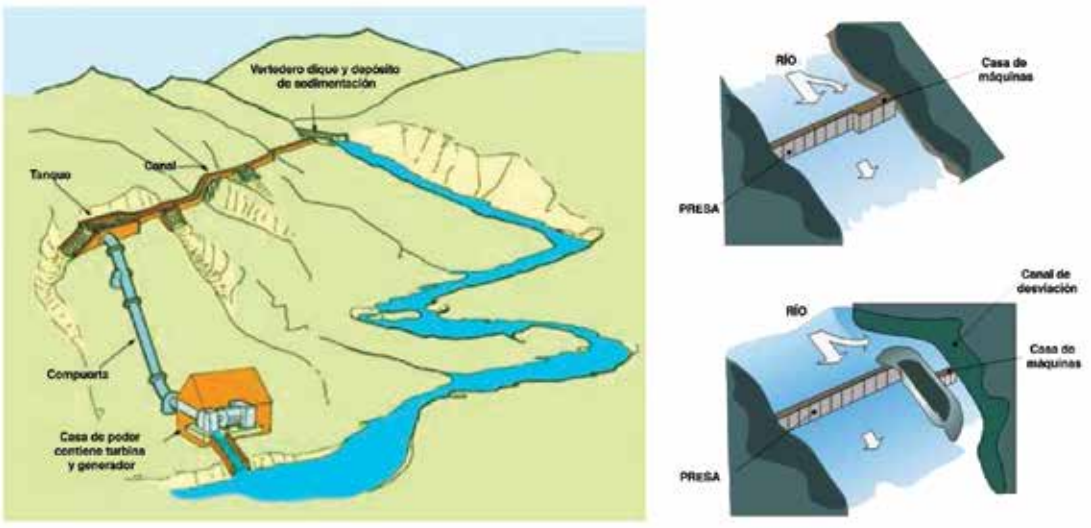


Figura :
Proyectos de filo de río

44 http://www.worldwatch.org/system/files/central%20america%20hydropower-article2.png; Documento 2.3.1.

Los proyectos de embalses, como se muestra a continuación, utilizan la energía potencial del agua almacenada para generar electricidad[45].

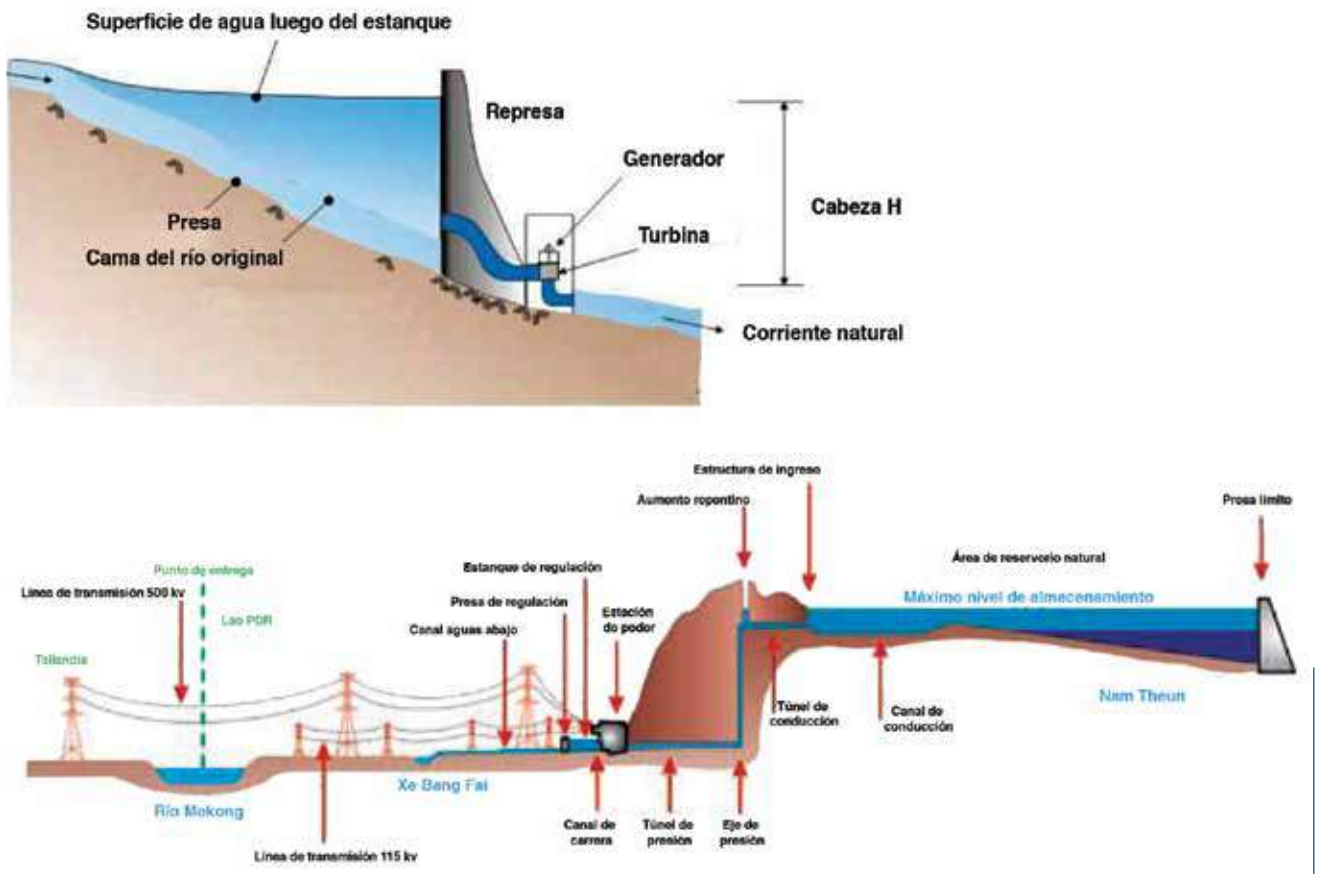


Figura 38.
Proyectos de reservorios

El agua se puede almacenar en embalses que generalmente tienen entradas no controladas, pero poseen (en gran medida) salidas controladas. La capacidad del embalse es el volumen máximo de agua que se puede almacenar, hasta el nivel máximo de la represa. Los embalses pueden usarse para equilibrar los flujos, tomando agua durante los flujos altos y liberándola nuevamente durante los flujos bajos. Muchos embalses cambian sustancialmente los patrones de flujo, por ejemplo, en el Green River en los Estados Unidos (Figura 39).

45 Documento 2.3.1.; http://siteresources.worldbank.org/INTLAOPRD/Resources/293582-1092106399982/492430-1092106479653/492431-1214977916515/project_schematics_web.jpg

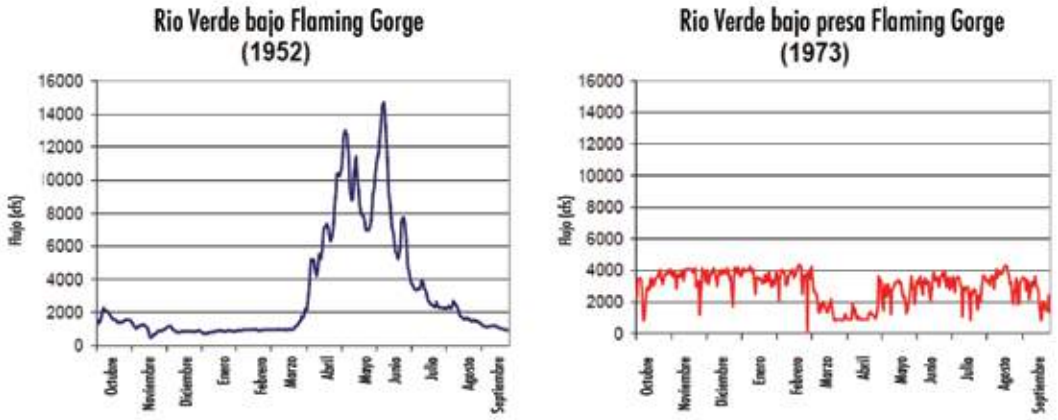


Figura 39.
Flujos del río Green antes y después de la construcción de la presa Flaming Gorge (1964)

El exceso de agua puede derramarse a través de un aliviadero y/o liberarse por medio de otras salidas (no mediante el desbordamiento incontrolado de una presa, lo que generalmente no es seguro). El almacenamiento "muerto" o inactivo se refiere al agua en un embalse por debajo del nivel de la salida más baja, que no puede ser drenada por la gravedad (y tendría que ser bombeada). El almacenamiento activo o "vivo" es la porción del embalse que se puede utilizar. Esto se ilustra en la Figura 40, que muestra la probabilidad de diferentes curvas operativas para un embalse en India durante varios años.

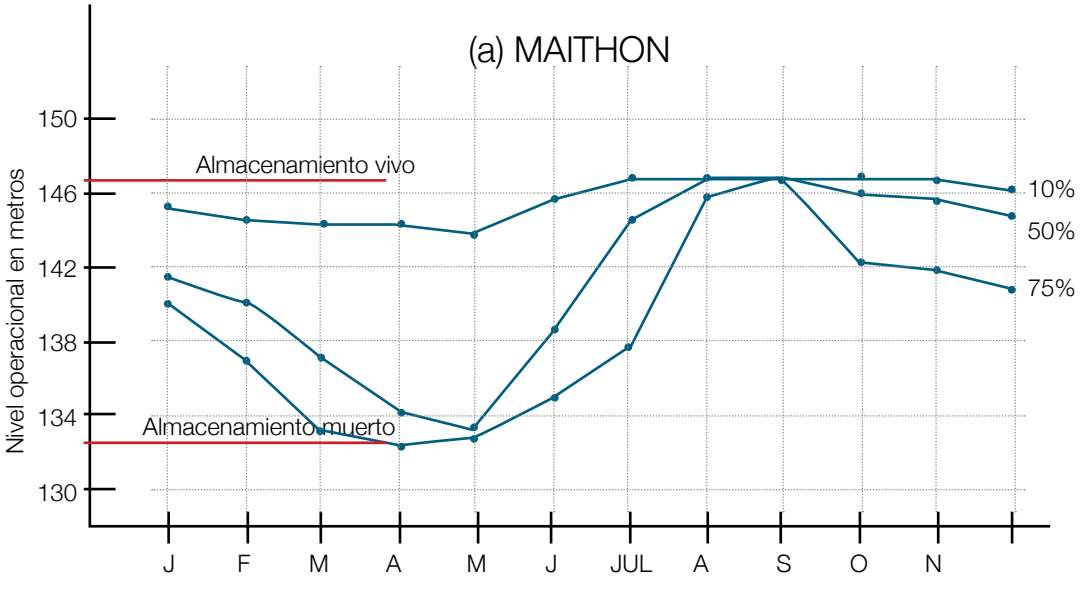


Figura 40.
Regulación de un reservorio multipropósito: Valle Damodar, India

Los proyectos de embalse requieren una toma de decisiones operativas para dar cuenta de las entradas no controladas. Por ejemplo, cuando se acerca una tormenta, los operadores de las presas estiman el volumen de agua que la tormenta puede agregar al embalse. Si el agua de la tormenta pronosticada sobrellenará el embalse, se la dejará salir lentamente del embalse antes y durante la tormenta. Si esto se hace con suficiente anticipación, la tormenta no llenará el embalse y las áreas aguas abajo no experimentarán inundaciones. Previsiones meteorológicas precisas son esenciales para que los operadores de presas puedan planificar correctamente las reducciones antes de un evento de alta precipitación.

El siguiente ejemplo simplificado demostrará cómo la información hidrológica se usa para planificar un proyecto. En este ejemplo se asume que:

- Existe un registro de flujo suficiente para que los datos representen correctamente los flujos históricos.
- Los flujos futuros seguirán la misma distribución que los flujos históricos (es decir, la hidrología es "estacionaria").

(La siguiente sesión, 2.4 Cambios en el clima y la hidrología, abordará por qué la hidrología "estacionaria" no es realmente una buena suposición, y en el módulo 3, Ubicación, diseño y operaciones de energía hidroeléctrica en un clima cambiante, el enfoque de planificación se modificará en conformidad).

Los principios básicos de la planificación de la infraestructura se pueden mostrar sobre la base de una CDF estilizada (Figura 41). Esta CDF es el resultado de un simple ejercicio de optimización. En este ejemplo, los valores relevantes son:

- Planta de filo de río sin almacenamiento
- Caída de 10 m
- Eficiencia de generación del 90%
- La escorrentía excederá 80 m^3/s el 20% del tiempo, 60 m^3/s el 40% del tiempo, etc.
- La capacidad de captación es de 40 m^3/s
- La planta funciona a plena capacidad el 60% del tiempo
- La planta funciona a una capacidad promedio del 50% el 40% del tiempo
- Factor de carga (60 × 100 + 40 × 50) ÷ 100 = 80%
- Precio de venta de USD 0,05 / kWh
- Costos fijos de USD 30.000 y costos variables de USD 166.667 / MW

La infraestructura del agua está diseñada para "aprovechar" la hidrología en un sitio determinado. Un planificador de energía hidroeléctrica debería hacer un diseño que optimice la capacidad que se instalará. Mayor capacidad instalada significa mayor producción e ingresos, pero también significa mayores costos de inversión y menores factores de carga. A medida que aumenta el tamaño de la planta, las economías de escala tenderán a reducir los costos específicos por m^3/s utilizados o MW instalados. El área bajo la línea roja en la Figura 41 muestra el flujo total que puede ser utilizado por la planta con una capacidad fija de captación de 40 m^3/s.

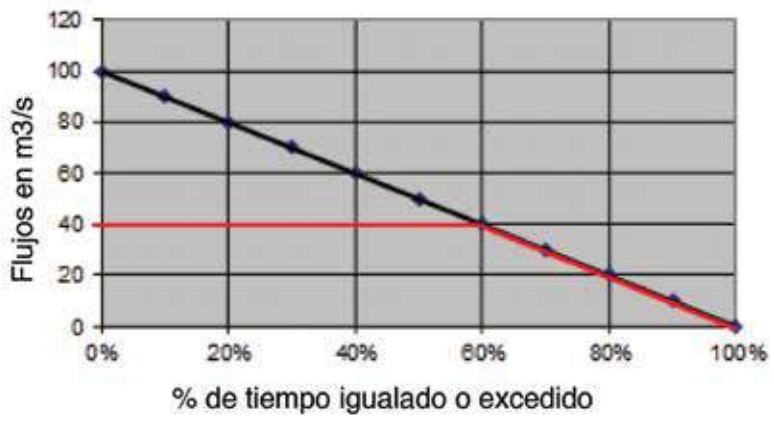


Figura 41.
Ejemplo de CDF para optimizar la capacidad de la planta

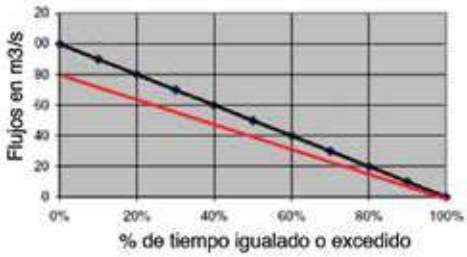
En este caso base, una capacidad de captación instalada de 60 m^3/s con una potencia de 5,4 MW sería preferible a capacidades mayores o menores. Si bien el excedente anual de flujo de caja es un indicador bastante crudo de la eficiencia financiera (la tasa interna de rendimiento, TIR, o el valor actual neto, VAN, serían mejores puntos de referencia), el ejemplo es suficiente para mostrar que la capacidad máxima no siempre es óptima (Tabla 12).

Capacidad de diseño (m^3/s)	Capacidad instalada (MW)	Factor de carga (%)	Generación anual (MWh)	Ingresos anuales (USD)	Costo de inversión y de operación y mantenimiento anualizado (USD)	Excedente anual (USD)
80	7,2	60	37.843	1.892.160	1.500.000	392.160
70	6,3	65	35.872	1.793.610	1.350.000	443.610
60	5,4	70	33.113	1.655.640	1.200.000	455.640
50	4,5	75	29.565	1.478.250	1.050.000	428.250
40	3,6	80	25.229	1.261.440	900.000	361.440
20	1,8	90	14.191	709.560	600.000	109.560

Tabla 12. Información para optimizar la capacidad de la planta

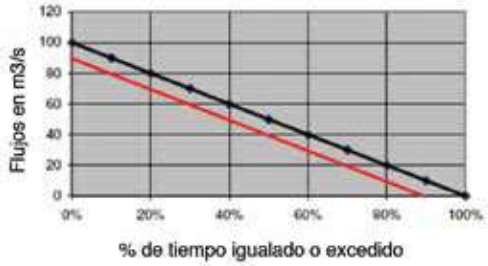
¿Qué papel juegan los caudales ambientales en este escenario? Imagine una situación en la que una planta hidroeléctrica opera desviando agua de un río, pero algunos flujos ambientales están garantizados y no pueden utilizarse. La CDF que es relevante para el planificador de energía hidroeléctrica no será el natural sino uno modificado. A continuación se presentan algunos ejemplos de modificaciones.

Laguna Pisayambo. ©CELEC EP Hidroagoyan



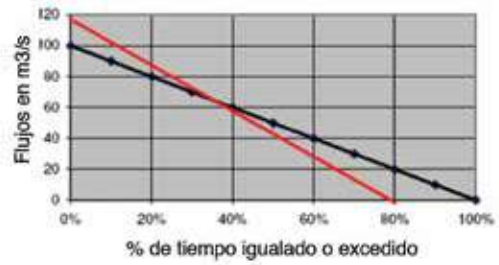
Si no se puede desviar el 20% de los flujos dados en cualquier momento, la CDF relevante tendrá una pendiente más baja.

Figura 42.
CDF de línea de base (negro) y CDF modificada (rojo) para desviaciones



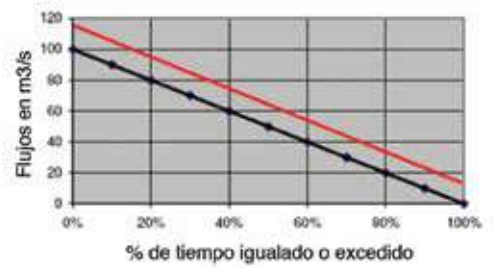
Si un flujo ambiental mínimo de 10 m3/s se requiere en todo momento (siempre que esté disponible de forma natural), la pendiente de la CDF relevante no cambiará, pero el flujo utilizable se reducirá en 10 m3/s (desplazamiento paralelo hacia abajo de la CDF).

Figura 43.
CDF de línea de base (negro) y CDF modificada (rojo) para un flujo ambiental mínimo



Los glaciares aguas arriba, los mantos de nieve, los acuíferos subterráneos, los lagos, los humedales, los bosques y otras características naturales que almacenan y liberan gradualmente agua tendrán efectos significativos en la pendiente de la CDF. Cuanto más se deterioren estos depósitos naturales por los cambios antropogénicos, más se inclina la CDF.

Figura 44.
CDF de línea de base (negro) y CDF modificada (rojo) para cambios de almacenamiento



Las transferencias entre cuencas reducirán o aumentarán (en este ejemplo, aumentarán) el volumen de agua disponible, lo que provocará un desplazamiento ascendente de la CDF.

Figura 45
CDF de línea de base (negro) y CDF modificado (rojo) para transferencias

Nevado Cayambe. ©Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador - PNCCza

Hasta este punto, hemos asumido que la planta no tiene capacidad de almacenamiento. El almacenamiento artificial que puede ser controlado directamente por el operador cambiará profundamente el contexto de planificación. Dependiendo del espacio de almacenamiento disponible y las reglas de operación, las CDF de entrada y salida del embalse serán diferentes. El espacio de almacenamiento puede variar desde unas pocas horas de escorrentía (lo que puede permitir al operador suavizar las fluctuaciones a muy corto plazo y cambiar parte de la capacidad de generación a las horas pico diarias) a enormes reservorios con almacenamiento interanual (como el lago Volta en Ghana, que puede almacenar casi 4 años de escorrentía). En un caso extremo como el del lago Volta, el operador puede manipular completamente la CDF de salida para proporcionar una carga base continua con un factor de carga del 100% o para proporcionar una potencia de pico estacional y diaria.

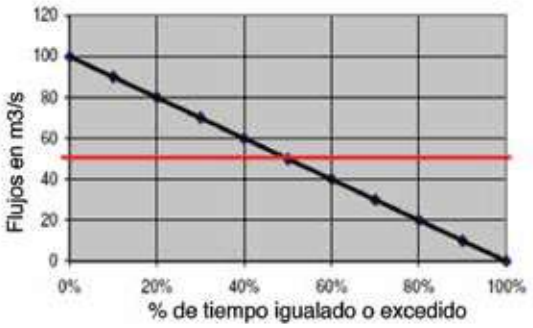


Figura 46.
Conversión de variables naturales en flujos continuos

En este ejemplo, las operaciones de carga base con almacenamiento anual proporcionarán un flujo de salida continuo y totalmente controlado de 50 m^3/s. Tenga en cuenta que este ejemplo supone que no hay pérdidas por evaporación y filtración del embalse, de modo que el flujo de salida total del embalse es idéntico al flujo de entrada total.

Suponiendo que se requirieran costos anuales adicionales de USD 400.000 para construir y operar un embalse con almacenamiento anual completo, el cálculo anterior se modifica como se muestra en la Tabla 13. Este excedente es más alto que antes, por lo tanto, es una buena inversión agregar capacidad de almacenamiento al proyecto. Tenga en cuenta que la generación y los ingresos son mayores, a pesar de que la capacidad instalada es menor que antes, cuando la capacidad de admisión óptima estaba en 60 m^3/s.

Capacidad de diseño (m^3/s)	**Capacidad instalada (MW)**	**Factor de carga (%)**	**Generación anual (MWh)**	**Ingresos anuales (USD)**	**Costo de inversión y de operación y mantenimiento anualizado (USD)**	**Excedente anual (USD)**
50	4,5	100	39.420	1.971.000	1.450.000	521.000

Tabla 13. Capacidad de planta óptima con embalse

En general, cualquier flujo alto más allá de la capacidad de flujo diseñada y que no se puede almacenar y necesita ser desviado de la planta (derrame) se puede considerar como "desperdiciado" desde el punto de vista del operador. Por lo tanto, cualquier forma de aplanar la CDF, a través del almacenamiento natural o artificial, es bienvenido, ya que aumenta los flujos bajos que pueden convertirse en energía adicional. La Figura 47 ilustra que el almacenamiento también puede estar en un proyecto[46] diferente, más arriba en la cuenca.

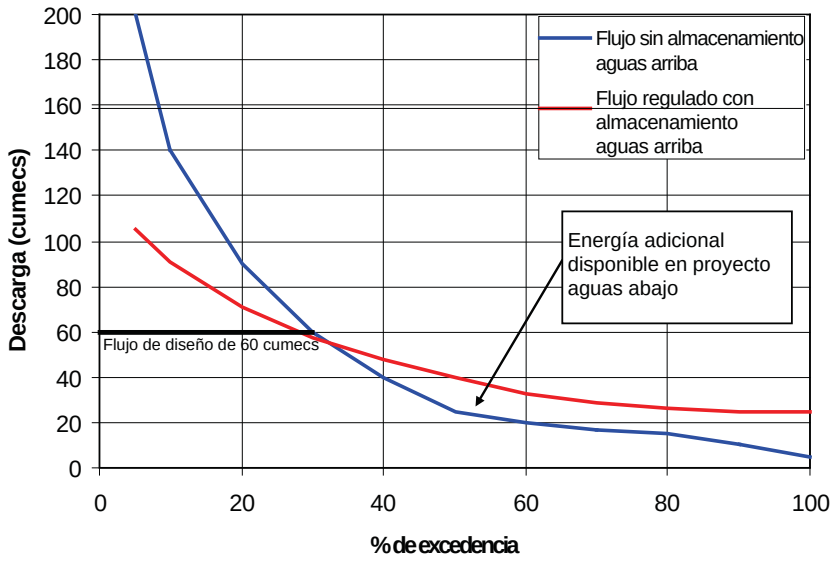


Figura 47.
Influencia del almacenamiento en los CDF

Un embalse también puede permitir proporcionar un pico de potencia más valioso. Considere una situación en la que la planta solo funciona la mitad del tiempo y puede obtener un precio por hora pico de USD 0,07/kWh en lugar de USD 0,05/kWh (Figura 48).

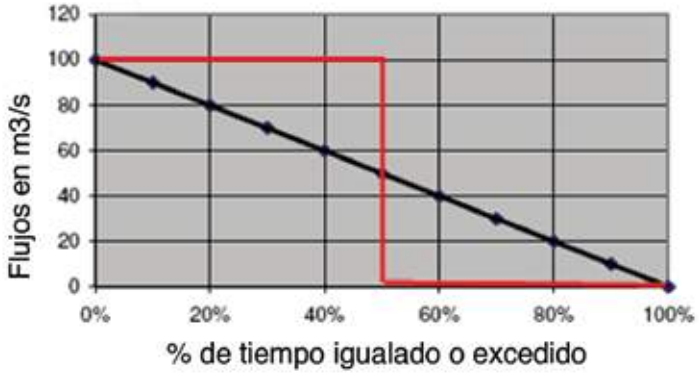


Figura 48.
Utilizar el embalse para proveer la máxima energía

46 Hydro Tasmania Consulting (2007). Estudio de la optimización del desarrollo de la cuenta del rio India. Reporte de modelado.

Nuevamente, el excedente se mejora a pesar de que se requieren inversiones mucho mayores Tabla 16.

Capacidad de diseño (m^3/s)	Capacidad instalada (MW)	Factor de carga (%)	Generación Anual (MWh)	Ingresos anuales (USD)	Costo de inversión y de operación y mantenimiento anualizado (USD)	Excedente anual (USD)
100	9,0	50	39.420	2.759.400	2.200.000	559.400

Tabla 14. Capacidad óptima de planta de operaciones con embalse y pico de máxima energía

En la práctica, no es probable que el control total del flujo de salida sea óptimo, ya que es costoso proporcionar espacio de almacenamiento. El planificador debe equilibrar los costos de la capacidad de almacenamiento adicional con los beneficios de mayores factores de carga y/o generación de potencia máxima. El problema de optimización se vuelve aún más complejo cuando se introduce la posibilidad de almacenamiento por bombeo, utilizando energía de bajo costo en las horas de menor demanda para bombear agua a un embalse (que puede estar dentro o fuera de la corriente del río) y liberar esa agua durante las horas pico.

Finalmente, dado que la hidrología está directamente relacionada con la generación, para los proyectos de filo de río, una CDF se puede convertir en una curva de duración de la energía, que muestra la probabilidad de que la generación de electricidad exceda ciertos valores. En el siguiente ejemplo, la probabilidad se expresa en el número de días por año (Figura 49)[47].

Además, se muestra claramente el volumen que excluye la planta como "residual" o flujo ambiental.

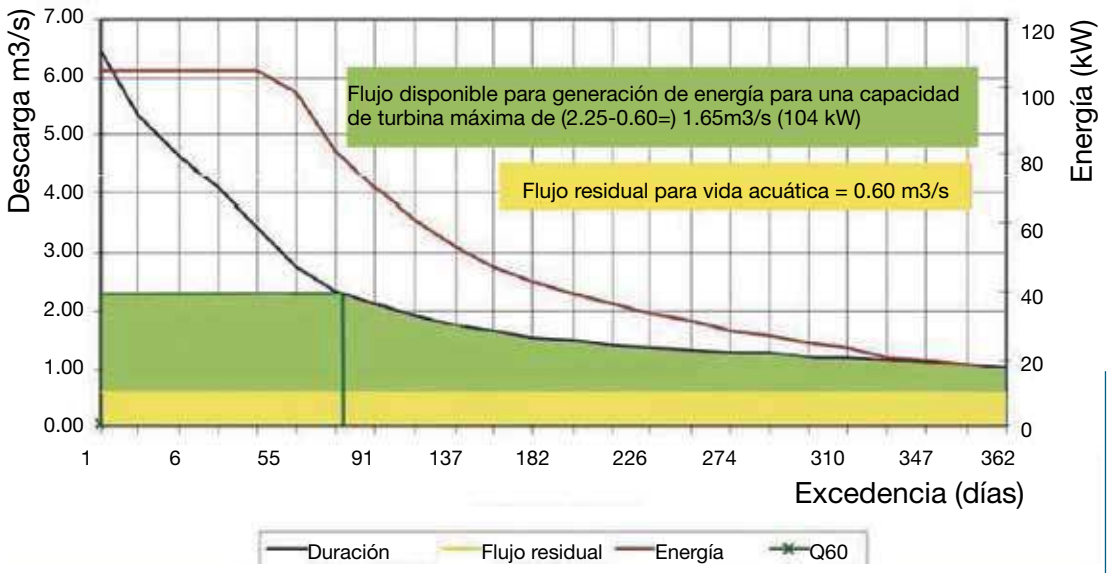


Figura 49.
Curva de duración de generación y CDF

47 Froend (2013) at http://www.ecreee.org/sites/default/files/3._assessment_of_hydropower_resources.pdf

Sesión 2.4 Cambios en el clima y la hidrología

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión proporciona una visión general de los estudios mundiales sobre cambios climáticos e hidrológicos observados y previstos. También discutirá los estudios particulares para la Región Andina. Los participantes se familiarizarán con los diversos niveles de confianza para los diferentes cambios que se esperan o que es posible que se produzcan con el tiempo. Se centrará en las tendencias futuras esperadas y en la variabilidad del clima y la hidrología.
Contenido	• ¿Qué cambios se están observando? • ¿Qué impulsa estos cambios? • ¿Cuánto entendemos del sistema climático y sus cambios recientes? • ¿Qué futuros cambios globales y regionales se proyectan?
Aspectos claves	El quinto informe de evaluación del IPCC confirma, con creciente certeza, las proyecciones previas sobre el cambio climático. Las proyecciones basadas en una gama de rutas de concentración representativas (RCP) muestran una respuesta clara de temperatura y una respuesta de precipitación más compleja en la Región Andina.
Temas de discusión y ejercicios	Trabajo en equipo: Discutir cómo el cambio climático proyectado puede influir en las sequías e inundaciones en la Región Andina. Discutir cómo podría cambiar la CDF desarrollada al final de la sesión 2.2.
Recursos adicionales	Cursos en línea referenciados en las sesiones 2.1 y 2.2.
Lecturas clave	Documento 2.4.1 - IPCC (2015) Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Cap. 1 Cambios observados y sus causas y Cap. 2 Futuros cambios climáticos, riesgos e impactos. Documento 2.4.2 - Ministerio del Ambiente (2015) Cambio climático y agua.

Los últimos resultados del IPCC muestran que el calentamiento del sistema climático es inequívoco[48]. Las temperaturas de la atmósfera y el océano han aumentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar ha subido y las concentraciones de gases de efecto invernadero se han incrementado. Cada una de las últimas décadas ha sido sucesivamente más cálida en la superficie de la Tierra que cualquier década anterior desde 1850. En el hemisferio norte, el período 1983–2012 fue quizás el período de 30 años más cálidos en los últimos 1.400 años (confianza media). El calentamiento del océano domina el aumento de la energía almacenada en el sistema climático, lo que representa más del 90% de la energía acumulada entre 1971 y 2010 (alta confianza). Es prácticamente incuestionable que la parte superior del océano (0–700 m) se calentó entre 1971 y 2010, y probablemente se calentó entre 1870 y 1971.

Durante las últimas dos décadas, las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida han estado perdiendo masa, los glaciares han seguido disminuyendo en casi todo el mundo, y el hielo marino del Ártico y la capa de nieve primaveral del hemisferio norte han seguido disminuyendo en gran medida (alta confianza). La tasa de aumento del nivel del mar desde mediados del siglo XIX ha sido mayor que la tasa promedio durante los dos milenios anteriores (alta confianza). Durante el período

48 Esta sesión se basa mayormente en IPCC (2014).

1901–2010, el nivel medio global del mar aumentó en 0,19 m.

Las temperaturas y las concentraciones atmosféricas de CO_2 están estrechamente correlacionadas y están en niveles cercanos al índice más alto de por lo menos los últimos 400.000 años, como se muestra en los datos del núcleo de hielo de la Antártida en la Figura 50.[49]

Las concentraciones de CO_2 han aumentado en un 40% desde tiempos preindustriales, principalmente por emisiones de combustibles fósiles y, en segundo lugar, por las emisiones netas de los cambios en el uso del suelo. El océano ha absorbido aproximadamente el 30% del dióxido de carbono antropogénico emitido, lo que ha causado la acidificación del océano.

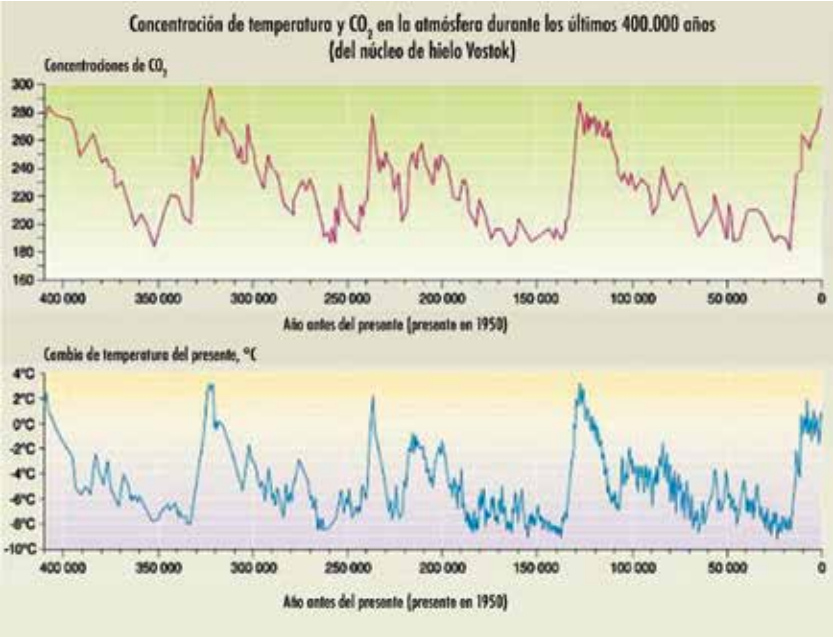


Figura 50.
Temperatura y concentración de CO_2 en la atmósfera en los últimos 400.000 años

El forzamiento radiativo total (es decir, la diferencia de energía radiante recibida por la Tierra y la energía irradiada de regreso al espacio) es positivo y ha llevado a una absorción de energía por parte del sistema climático. La mayor contribución al forzamiento radiativo total es causada por el aumento de la concentración atmosférica de CO_2, seguido del metano (CH_4) y otros gases y factores (Figura 51).[50]

49 Petit, J.C., et al. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, Nature 399, 429-436.

50 Stocker et al. (2013)

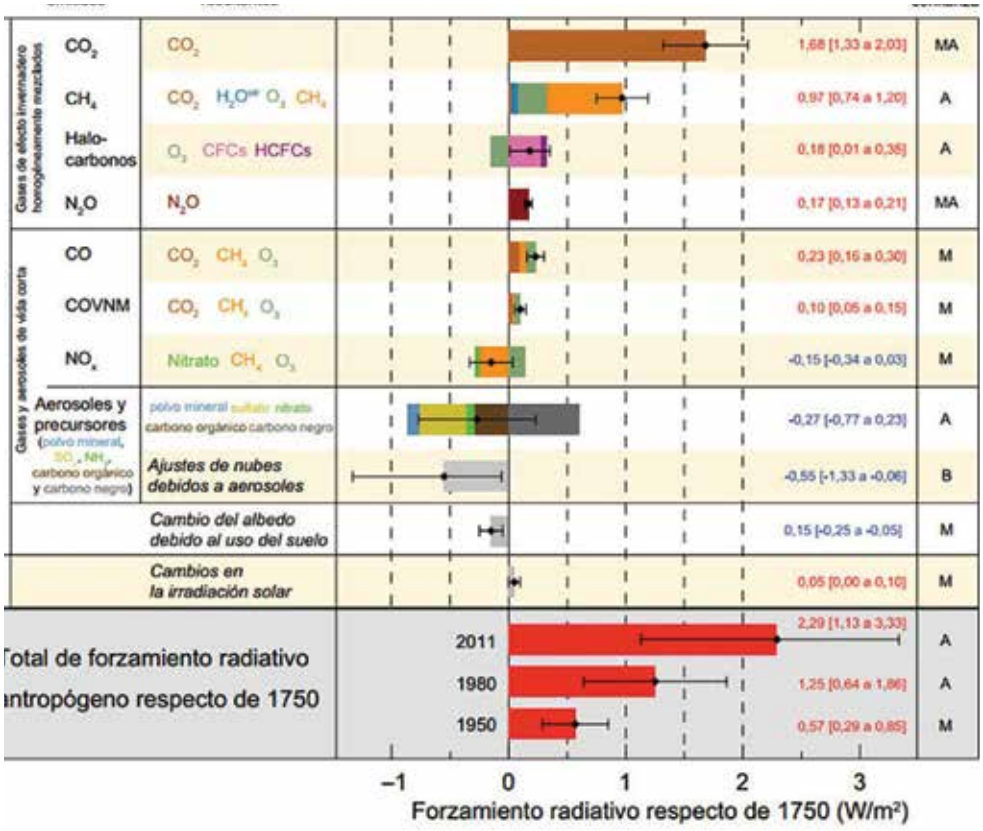


Figura 51.
Forzamiento radiativo relativo a 1750 (W m^2)

Se ha detectado influencia humana en el sistema climático en:

- el calentamiento de la atmósfera y el océano,
- los cambios en el ciclo global del agua,
- las reducciones de nieve y hielo,
- el aumento global del nivel medio del mar, y
- los cambios en algunos climas extremos.

Es extremadamente probable que la influencia humana haya sido la principal causa del calentamiento observado desde mediados del siglo XX. La evidencia de esto ha aumentado en los últimos años debido a los nuevos entendimientos y la mejora en los modelos del sistema climático. Los modelos reproducen los patrones y tendencias observados durante muchas décadas en la temperatura de la superficie a escala continental, incluido el calentamiento más rápido registrado desde mediados del siglo XX y el enfriamiento inmediatamente después de grandes erupciones volcánicas (muy alta confianza). Los estudios de observación y de modelos del cambio de la temperatura, la retroalimentación climática y los cambios en el presupuesto de energía de la Tierra, en conjunto, proporcionan confianza sobre la magnitud del calentamiento global en respuesta al forzamiento pasado y futuro.

Proyectándose hacia el futuro, las emisiones continuas de GEI provocarán un mayor calentamiento y cambios en todos los componentes del sistema climático. Limitar el cambio climático requerirá reducciones sustanciales y sostenidas de las emisiones de GEI. Es probable que el cambio global de la temperatura de la superficie terrestre para fines del siglo XXI supere en 1,5 °C con respecto al período de 1850 a 1900 para todas las vías de concentración representativas (RCP), excepto RCP 2.6, que corresponde a un escenario de

bajas emisiones. El calentamiento continuará más allá del 2100 en todos los escenarios de RCP, excepto RCP 2.6 (Figura 53).[51]

Los RCP son trayectorias de emisiones y concentración de gases de efecto invernadero utilizadas para la modelización e investigación climática. Describen cuatro posibles futuros climáticos, todos los cuales se consideran posibles, dependiendo de la cantidad de gases de efecto invernadero que se emitan en los próximos años.

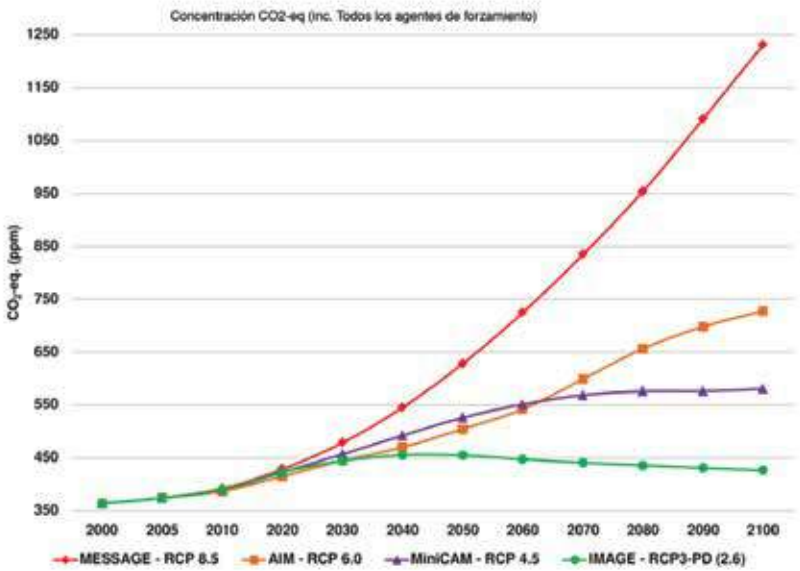
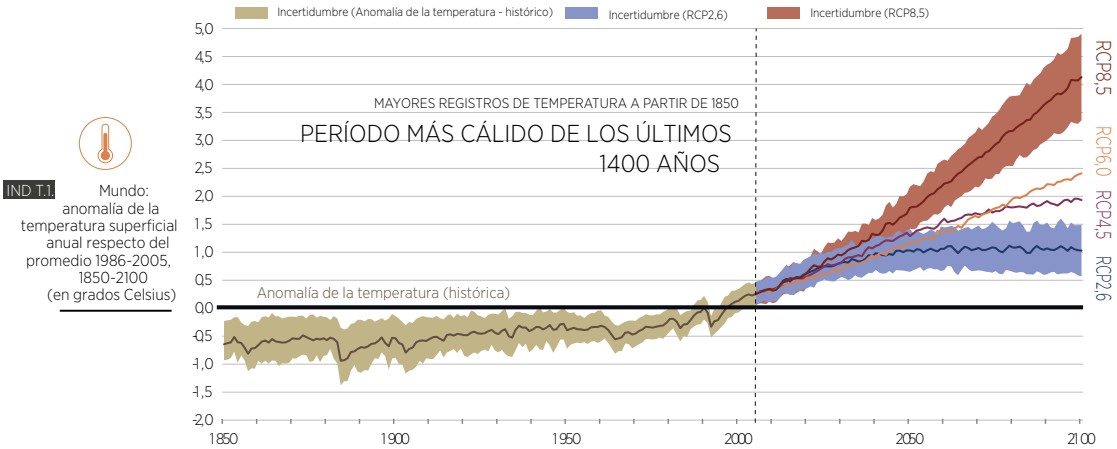


Figura 52.
RCP (Caminos de concentración representativa)



IND T.1. Mundo: anomalía de la temperatura superficial anual respecto del promedio 1986-2005, 1850-2100 (en grados Celsius)

Figura 53.
Predicciones del cambio de temperatura global bajo escenarios de RCP

51 Ibíd.

El calentamiento durante el siglo XXI- será más alto en las latitudes septentrionales, y mayor sobre la tierra que sobre el agua. Los cambios en el ciclo global del agua en respuesta al calentamiento no serán uniformes. El contraste en la precipitación entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas aumentará, aunque puede haber excepciones regionales (Figura 54).

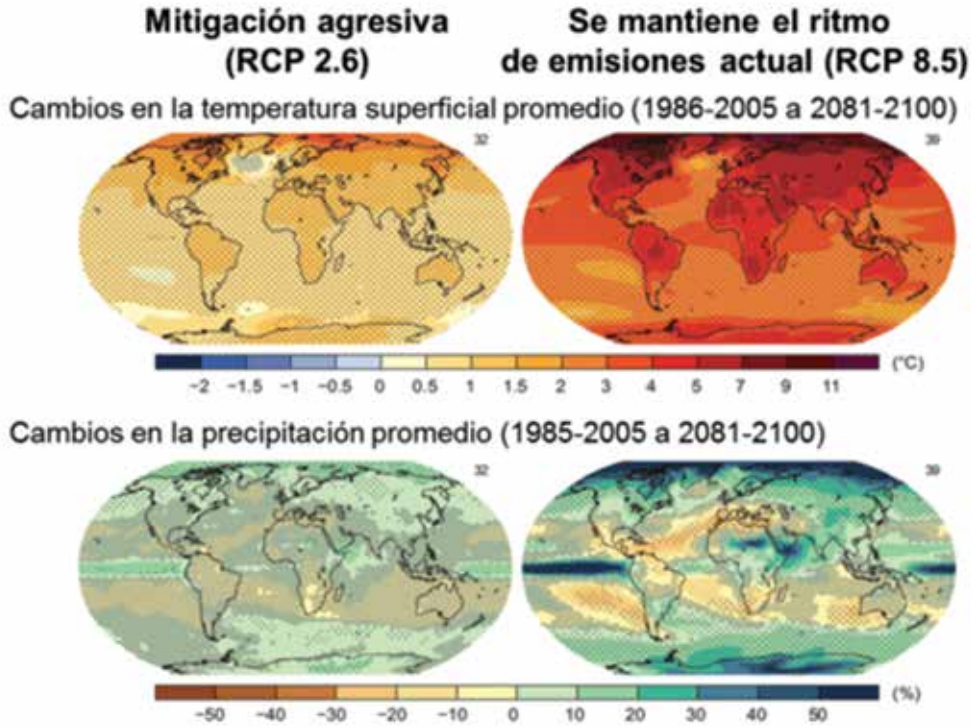


Figura 54.
Cambios regionales proyectados en temperatura y precipitación bajo RCP 2.6 y 8.5[52]

Si recurrimos a los impactos regionales, la Figura 55 muestra los incrementos de temperatura proyectados de los cuatro RCP en la costa oeste de América del Sur. Las proyecciones varían de aproximadamente +1 °C a +4 °C. En el lado derecho, la distribución de los cambios medios de 20 años se da para el período 2081–2100, en los cuatro escenarios de RCP.

52 Stocker et al. (2013)

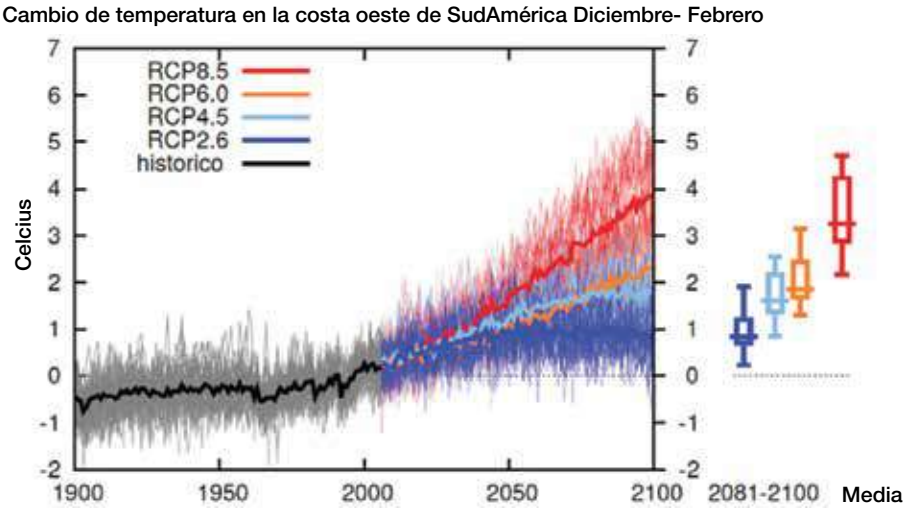


Figura 55.
Predicciones del cambio de temperatura regional en escenarios RCP[53]

Estos cambios en la temperatura y precipitación dependerán de la ubicación geográfica, del modelo aplicado y del período de tiempo considerado. Por ejemplo, la Figura 56 muestra los resultados de RCP 8.5 para el período 2061-2080. En general, se esperan aumentos moderados a fuertes de temperatura y leves a moderados incrementos de precipitación para Ecuador.

Central Hidroeléctrica Sayminí. ©Elecaustro

53 IPCC (2013b) Anexo 1: Atlas de Proyección Climática Global y Regional. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

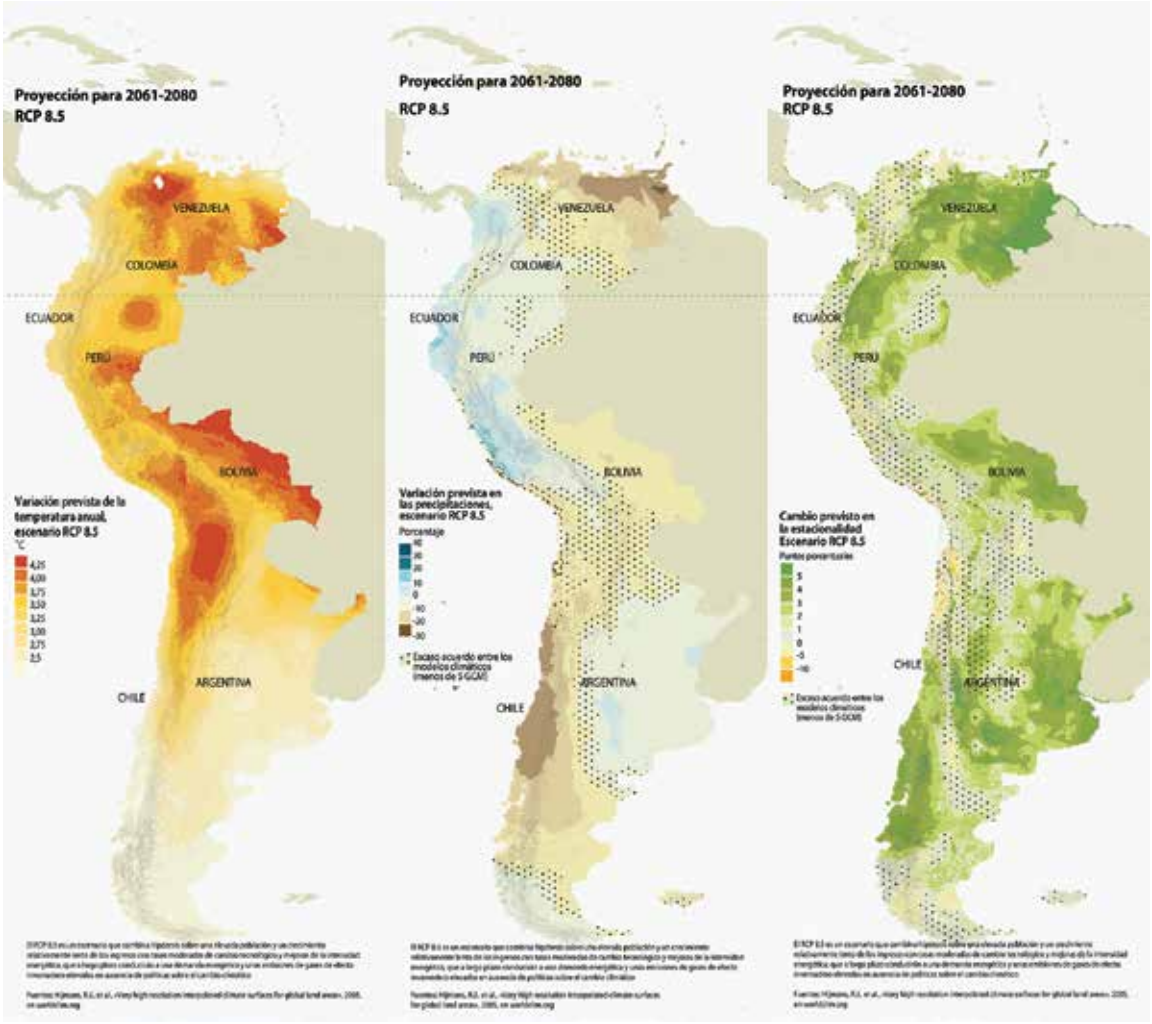


Figura 56.
Temperatura regional, precipitación y predicciones de cambio de temporada bajo RCP 8.5

También se espera que los cambios de temperatura sean mucho más fuertes en las elevaciones más altas, lo que contribuirá a la pérdida de glaciares en los Andes tropicales. Muchos de esos glaciares ya han perdido tanta cantidad de su masa que sus años pico de escorrentía están en el pasado.

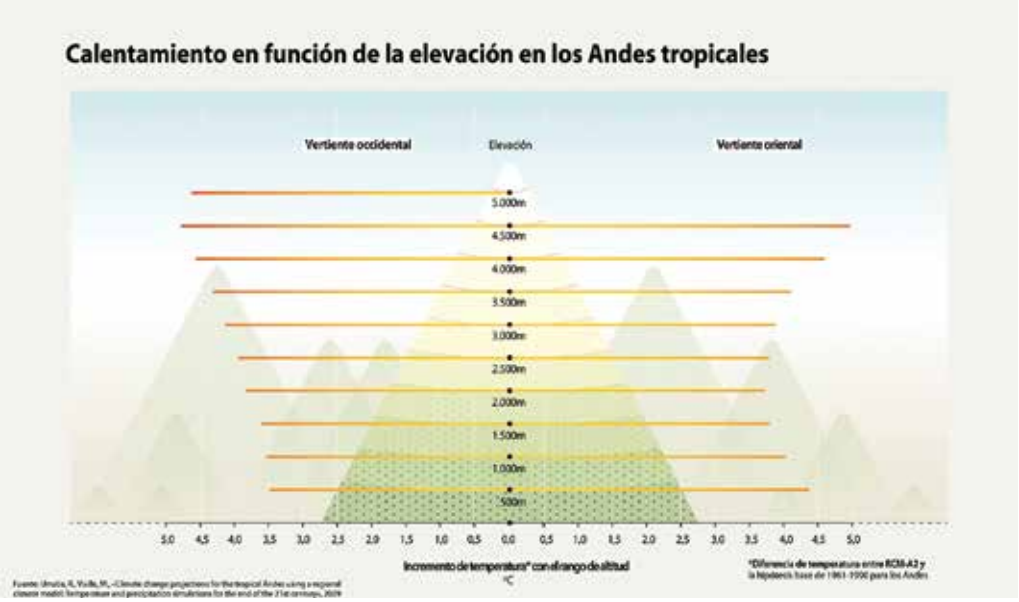
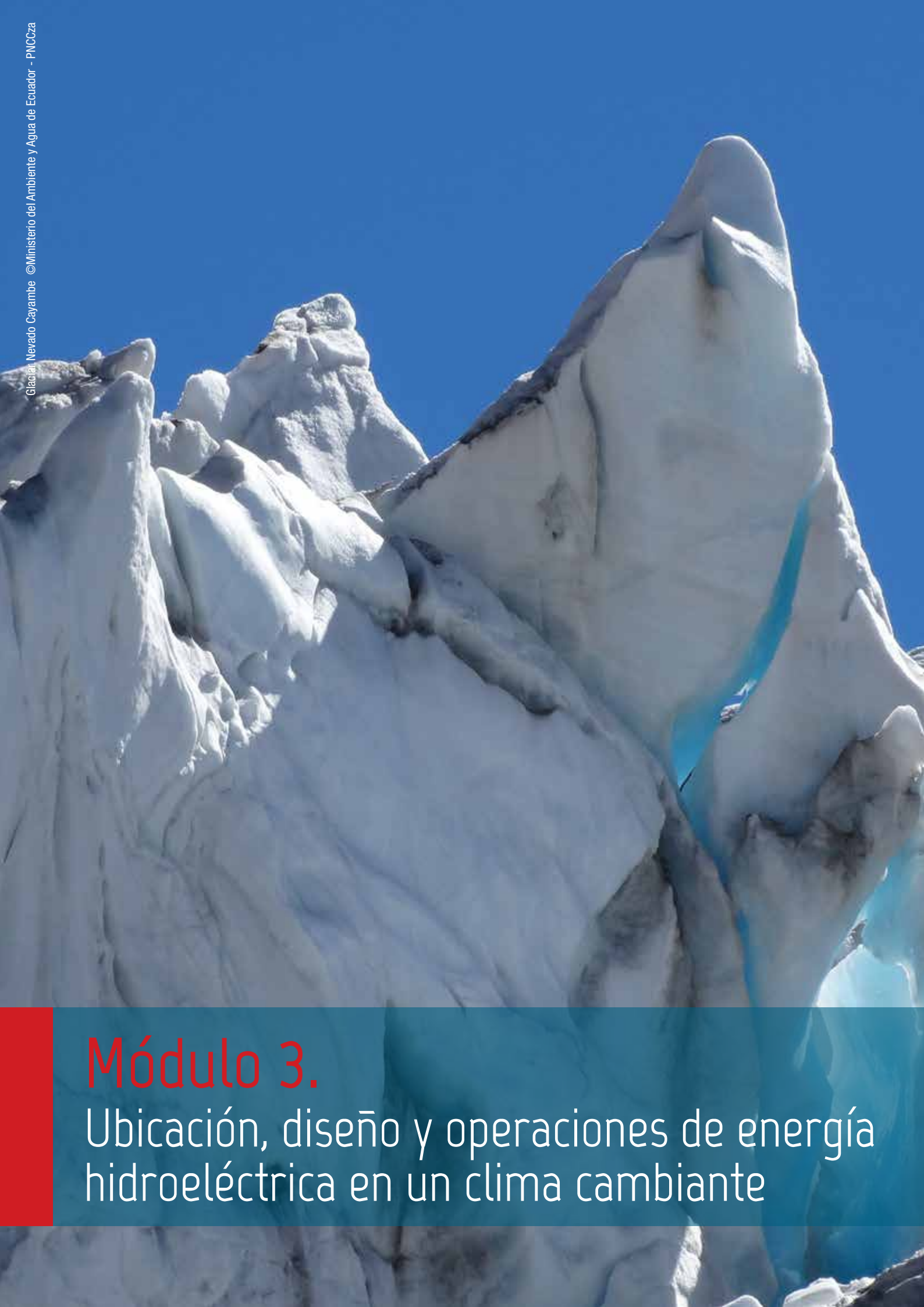


Figura 57.
Relación entre la elevación y el aumento de la temperatura en los Andes tropicales

Hay varias otras proyecciones en el informe AR5 del IPCC, que son menos relevantes para la energía hidroeléctrica:

- Los océanos del mundo continuarán calentándose durante el siglo XXI. El calor penetrará desde la superficie hasta las profundidades del océano y afectará la circulación oceánica. Es muy probable que la capa de hielo marino del Ártico continúe encogiéndose y adelgazando. El volumen global de los glaciares disminuirá aún más. El nivel medio del mar seguirá subiendo durante el siglo XXI. En todos los escenarios de RCP, la tasa de elevación del nivel del mar muy probablemente superará la observada durante 1971–2010 debido al aumento del calentamiento del océano y la mayor pérdida de masa de los glaciares y las capas de hielo. Una mayor absorción de carbono por el océano aumentará la acidificación de las aguas oceánicas.
- Las emisiones acumulativas de CO_2 determinarán en gran medida el calentamiento global medio de la superficie a fines del siglo XXI y más allá. La mayoría de los aspectos del cambio climático persistirán durante muchos siglos, incluso si se detienen las emisiones de CO_2. Esto representa un compromiso sustancial de cambio climático por varios siglos, creado por las emisiones pasadas, presentes y futuras de CO_2.



Glaciar Nevado Cayambe ©Ministerio del Ambiente y Agua de Ecuador - PNCCza

Módulo 3.

Ubicación, diseño y operaciones de energía hidroeléctrica en un clima cambiante

Sesión 3.1 Rango de opciones de ubicación, diseño y opciones

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión explora cómo los planificadores de energía hidroeléctrica pueden aprovechar las condiciones hidrológicas en una cuenca y en los sitios del proyecto a partir de varias opciones técnicas (arreglos de proyectos individuales y en cascada; capacidades de almacenamiento; capacidades y niveles de captación y de salida; diseños de carga base, pico y almacenamiento bombeado); decisiones operativas a mediano plazo (curvas guías) y a corto plazo (despacho). También explora cómo estas decisiones de ubicación, diseño y operación dependen de o pueden beneficiarse de la capacidad de pronosticar condiciones climáticas futuras. Esto ayudará a los participantes a comprender, mejorar o cuestionar (dependiendo de su función) la ubicación del proyecto, el diseño y las decisiones operativas, que a menudo se toman sin conciencia del cambio climático. Esta sesión, con énfasis en la discusión, les preparará para las sesiones más técnicas del resto del Módulo 3.
Contenido	• ¿Cuáles son las principales opciones de ubicación en un sistema hidroeléctrico? • ¿Cuáles son las principales opciones de diseño para una central hidroeléctrica? • ¿Cuáles son las principales opciones operativas para una central hidroeléctrica de embalse? • ¿Cómo influye el cambio climático en las elecciones entre estas opciones?
Aspectos clave	Los proyectos de energía hidroeléctrica son muy específicos al sitio en que se ubican y tienen una larga vida útil, durante la cual las condiciones continuarán evolucionando. La planificación de proyectos hidroeléctricos debe tener en cuenta múltiples aspectos y objetivos y lograr un equilibrio entre ellos. Cambios futuros pueden verse limitados por las decisiones iniciales.
Temas de discusión y ejercicios	Debates grupales: ¿Cómo se incorporan los problemas del cambio climático a la ubicación, el diseño y las operaciones de la energía hidroeléctrica en los países andinos? Los grupos discutirán la ubicación típica, el diseño y las consideraciones operativas y revisarán su exposición o modificación por el cambio climático. Se debe solicitar a los participantes que traigan ejemplos de su propia experiencia en los países andinos.

Esta sesión explora cómo los planificadores de energía hidroeléctrica pueden utilizar las condiciones hidrológicas locales en una cuenca y en el sitio del proyecto a partir de varias opciones:

- arreglos de proyectos individuales y en cascada,
- capacidades de almacenamiento,
- capacidades y niveles de captación y salida,
- diseño de carga base, pico y bombeado, y cómo esto se traduce en decisiones a mediano plazo (curvas guías) y a corto plazo (despacho).

También describirá cómo las opciones más complejas de gestión del agua dependen de la capacidad para pronosticar flujos futuros.

Antes de ubicar un proyecto hidroeléctrico dentro de una cuenca, las preguntas típicas que deben considerarse incluyen:

- ¿Qué tan grande es la demanda de energía total esperada? ¿Carga base o carga máxima?
- ¿Qué tramos o afluentes tienen las mejores condiciones (por ejemplo, flujo grande y regular, topografía inclinada)?
- ¿Hay algún factor que excluya algunos tramos o afluentes de ser considerados (por ejemplo, geología inestable, falta de acceso, áreas protegidas)?
- ¿Se puede escoger entre construir un proyecto grande en lugar de varios proyectos pequeños?
- ¿Hay alguna secuencia lógica en que se deban construir los proyectos?
- ¿Pueden los proyectos apoyarse mutuamente en sus operaciones?
- ¿Qué otros usos del agua existen en el área, además de la energía hidroeléctrica? ¿Cuánto espacio de almacenamiento requieren? ¿Dónde están los sitios con capacidad de almacenamiento? ¿Sus requisitos de almacenamiento serán compatibles con las operaciones hidroeléctricas?

Las respuestas a estas preguntas ayudarán a los planificadores a elegir los sitios finales y escoger entre una variedad de opciones. El siguiente ejemplo resalta cómo se podría ubicar la misma capacidad instalada de maneras muy diferentes.

Opción A: cinco proyectos ubicados en la corriente principal y dos afluentes. El área resaltada muestra que casi toda la cuenca está aguas arriba de las centrales hidroeléctricas. Los posibles problemas incluyen efectos sobre el paso de peces y sedimentos. Sin embargo, este esquema permite el control de flujos o inundaciones aguas abajo.

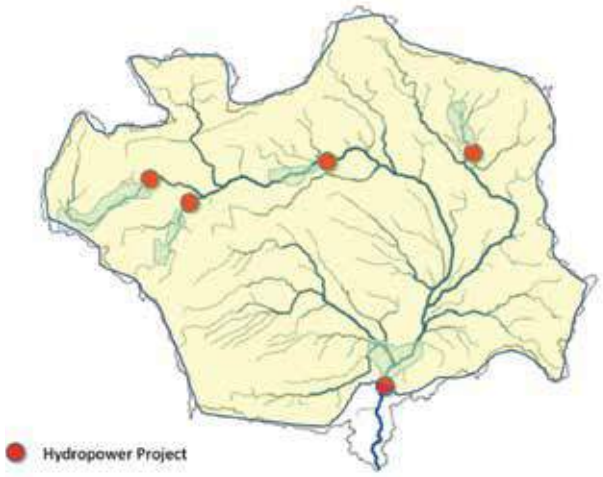


Figura 58.
Opción A de asentamiento de energía hidroeléctrica

Opción B: seis proyectos ubicados en cascada, en un solo afluente. Solo una subcuenca está aguas arriba de los proyectos. Esto reduce el impacto en el sedimento y el paso de peces, pero también reduce la capacidad de controlar los flujos o inundaciones aguas abajo. Sin embargo, las opciones incluyen la operación de cascadas con embalses en la parte superior y estaciones a filo de río en la parte inferior. Además, el último embalse podría liberar flujos parecidos a los naturales (caudales ecológicos).

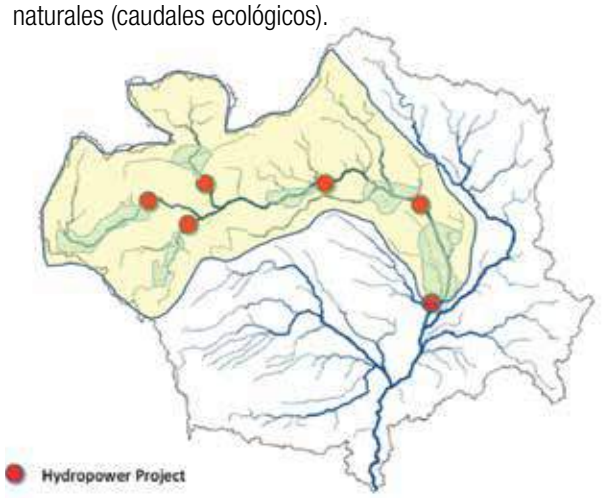


Figura 59.
Opción B de asentamiento de energía hidroeléctrica

La Figura 60[54] muestra la cascada del río Paute como un ejemplo de un conjunto de proyectos, que a menudo se planifican juntos. Obviamente, hay múltiples posibilidades de ubicación en esta cuenca.

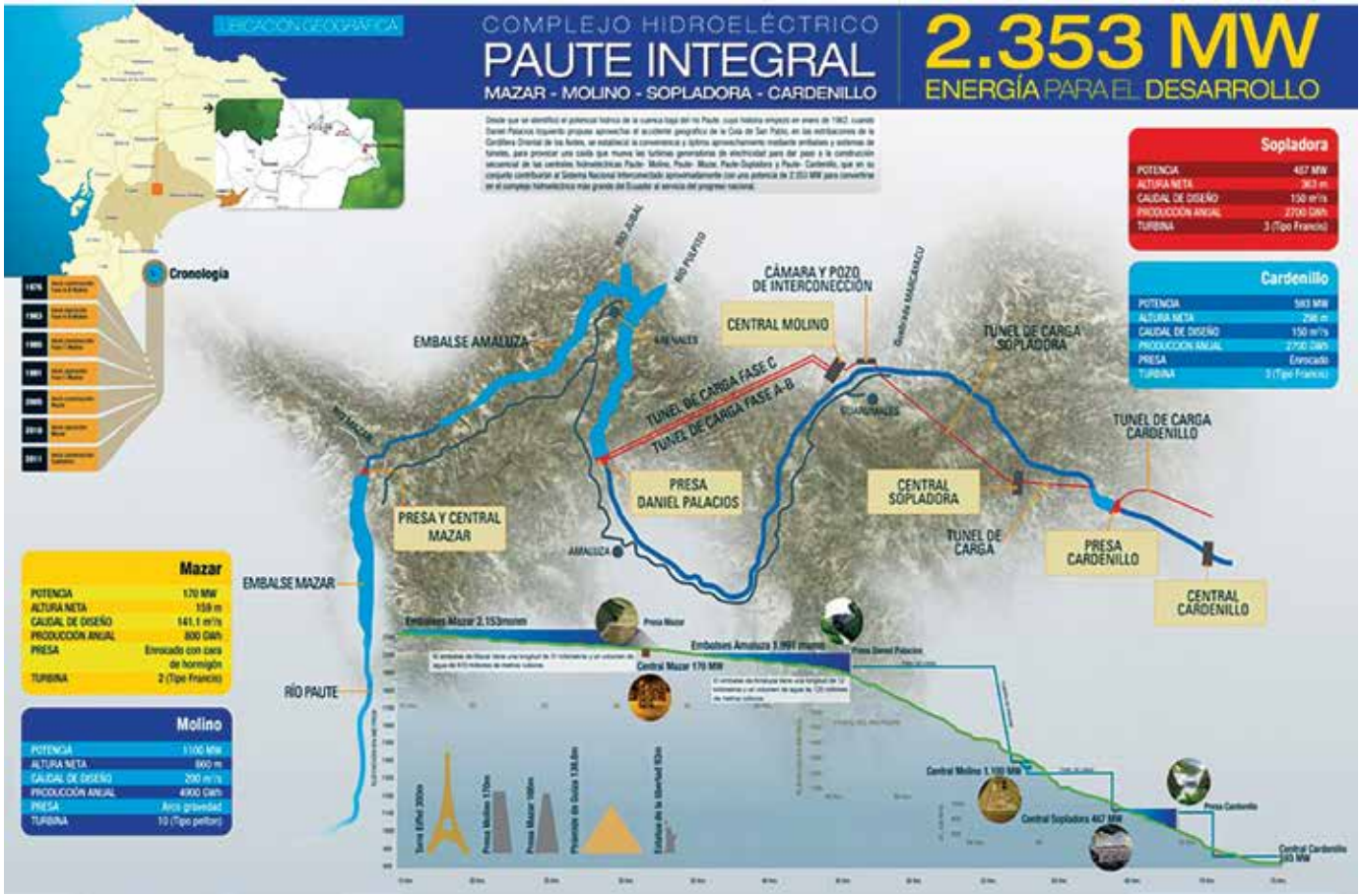


Figura 60.
Ejemplo de las opciones de cascada: cascada del río Paute

Determinar cuáles sitios se desarrollarán depende de una serie de factores, como los considerados anteriormente. Estos factores pueden modificarse, o su peso en las decisiones puede modificarse, cuando los planes toman en cuenta el cambio climático. Se puede preferir estaciones en tributarios más grandes si los flujos son más regulares en estos afluentes o si se necesita más capacidad de almacenamiento. Si el almacenamiento se construirá en la parte superior de una cascada, entonces es posible que deba construirse antes para proteger y ayudar a operar las estaciones aguas abajo. Estos problemas se exploran con más detalle en el resto del módulo 3.

Determinar cuántos sitios se desarrollarán depende en gran medida de la demanda de energía hidroeléctrica. La demanda es una función de las tendencias generales de la economía (población, ingreso per cápita, intensidad energética, costo de diferentes fuentes de energía, etc.). Estas tendencias también pueden ser modificadas por el cambio climático. Por ejemplo:

- los vehículos eléctricos y la calefacción eléctrica pueden promoverse como una opción de mitigación,
- la energía solar y eólica puede aumentar, lo que requiere un respaldo de energía más firme, y

54 https://www.celec.gob.ec/hidropaute/images/stories/INFORMES_DE_GESTION/2015/archivos/site/Intro.html

- la intensidad energética puede aumentar a medida que las personas usan más electricidad para enfriamiento.

Tales aumentos en la demanda requerirían que se desarrollen más proyectos de energía hidroeléctrica o de mayor capacidad. Volveremos a estos temas en el Módulo 4.

Una vez que se ha identificado un sitio, el ciclo de desarrollo del proyecto pasa a una planificación más detallada del diseño y las operaciones. Los factores económicos, técnicos y ambientales deben considerarse en el proceso de planificación iterativa, antes de una evaluación final de la inversión, como se muestra en Figura 61.[55]

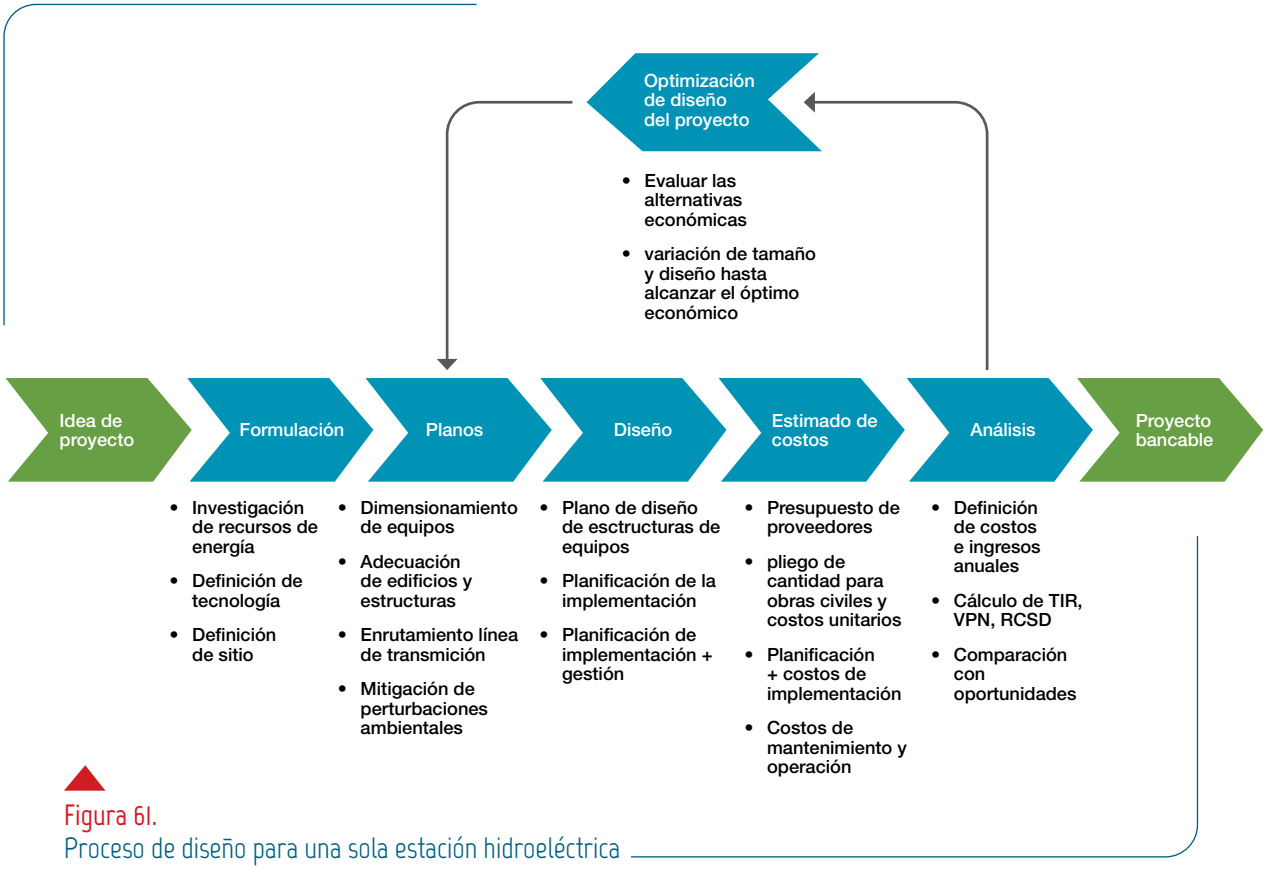


Figura 61.
Proceso de diseño para una sola estación hidroeléctrica

Los estudios de ingeniería avanzarán desde el nivel conceptual y serán alimentados por posteriores estudios del sitio, que proporcionarán más datos sobre oportunidades y limitaciones. Luego, la ingeniería de diseño desarrollará una idea de proyecto más detallada:

- ¿Qué tipo de presa se construirá (p. ej.: hormigón compactado con rodillos, arco, relleno de roca)?
- ¿Cuánta capacidad de almacenamiento vivo y muerto tendrá? ¿Será tanto para hidroelectricidad como para otras necesidades?
- ¿Cuánta capacidad para aliviadeross y otras salidas tendrá? ¿Dónde deberían ubicarse?
- ¿Qué tipo de central eléctrica será (p. ej.: al pie de la presa o aguas abajo, por encima del suelo o bajo tierra, tipo y número de turbinas)?
- ¿Se puede desarrollar el proyecto por etapas?

55 MACS Management & Consulting Service (2012) Financing hydropower / Introduction to the Specifics of Small Hydro Power Plants in GGF Technical Workshop on Small Hydro Power at EFSE Annual Meeting. Tbilisi, Georgia.

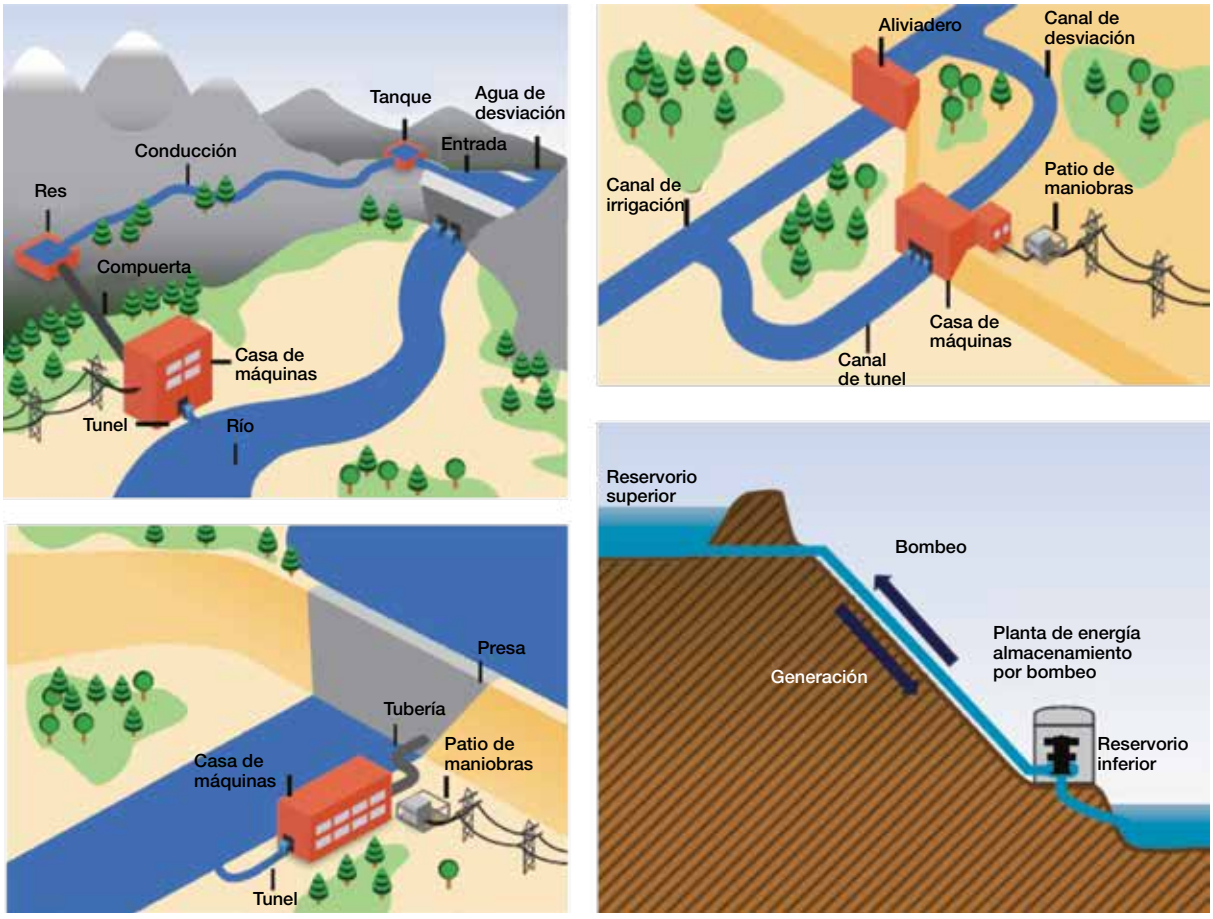


Figura 62.
Opciones de diseño[56]

Una de las preguntas fundamentales en el diseño de energía hidroeléctrica es la capacidad de almacenamiento requerida para proporcionar un rendimiento dado con un cierto nivel de confiabilidad. Para ayudar a tomar esta decisión, a menudo se usa el diagrama de Rippl (análisis de curva de masa) (Brown et al. 2010; Figura 63). Las líneas tangentes paralelas a la curva de rendimiento revelan puntos de inflexión en la curva de entrada que representan puntos en el tiempo, cuando la entrada tiene la misma tasa que el rendimiento (tasa de salida), lo que indica que el almacenamiento del embalse es constante. Cada vez que la curva de entrada tiene una pendiente mayor que la curva de rendimiento, el almacenamiento aumenta. Cada vez que la pendiente de la curva de entrada es menor que la de la curva de rendimiento, el almacenamiento disminuye. La distancia vertical máxima entre dos líneas tangentes sucesivas representa la diferencia de volumen entre un embalse lleno y uno vacío, e indica la capacidad de almacenamiento requerida para proveer el rendimiento especificado. Este es un modelo muy simplista: supone una hidrología estacionaria, salidas constantes y una fiabilidad del 100%, pero puede ajustarse a situaciones de planificación más realistas.

56 Kumar et al. (2011).

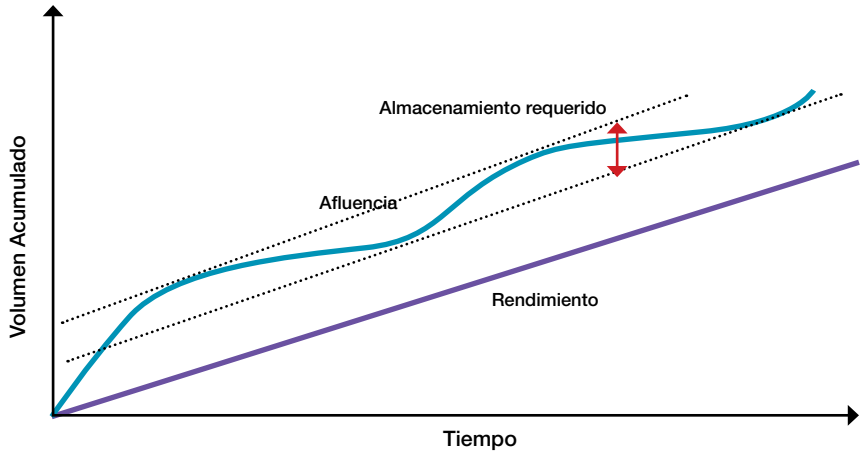


Figura 63.
Opciones de diseño: capacidad de almacenamiento requerida para un rendimiento constante

Al calcular la capacidad de almacenamiento requerida, deben considerarse las demandas futuras, no solo las condiciones actuales. En la Figura 64 se visualiza un aumento en las necesidades de almacenamiento que muestra el suministro a lo largo del año de agua dulce (curvas sólidas) y la demanda (curvas discontinuas) en una cuenca que se caracteriza por la estacionalidad de los flujos y la alta demanda de agua en la estación seca. Los cambios proyectados en el flujo del río asumen una estacionalidad más pronunciada, como resultado del cambio climático. Los cambios proyectados en la demanda suponen que los requerimientos aumentarán en la estación seca, por ejemplo, para el riego. Las áreas sombreadas representan el almacenamiento actual y proyectado necesario para satisfacer la demanda de agua a lo largo del año. Las áreas sombreadas en rojo más grandes muestran la mayor necesidad de capacidad de almacenamiento proyectada[57]. El almacenamiento como opción de adaptación se trata con más detalle en la Sesión 4.3.

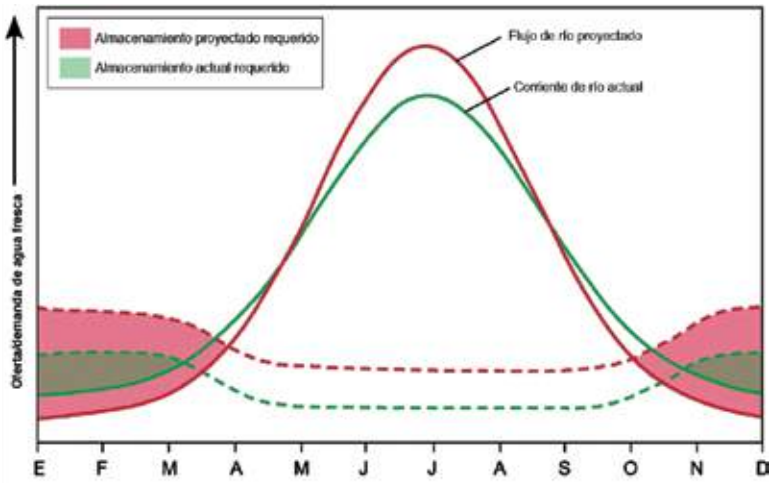


Figura 64.
Opciones de diseño: incremento de la capacidad de almacenamiento

57 Taylor (2009) Rethinking Water Scarcity: The Role of Storage. Eos, Vol. 90, No. 28

También existen opciones de diseño para la casa de máquinas, como el tipo de turbina (por ejemplo, Pelton, Kaplan, Francis), el número de unidades requeridas y su diseño individual. La selección depende de si los flujos pueden controlarse para maximizar la eficiencia, o si los flujos son irregulares y difíciles de predecir, por lo que las turbinas necesitan funcionar para un amplio rango de flujos. Figura 65 muestra cómo los diversos tipos de turbinas tienen diferentes rangos de operación eficiente.[58]

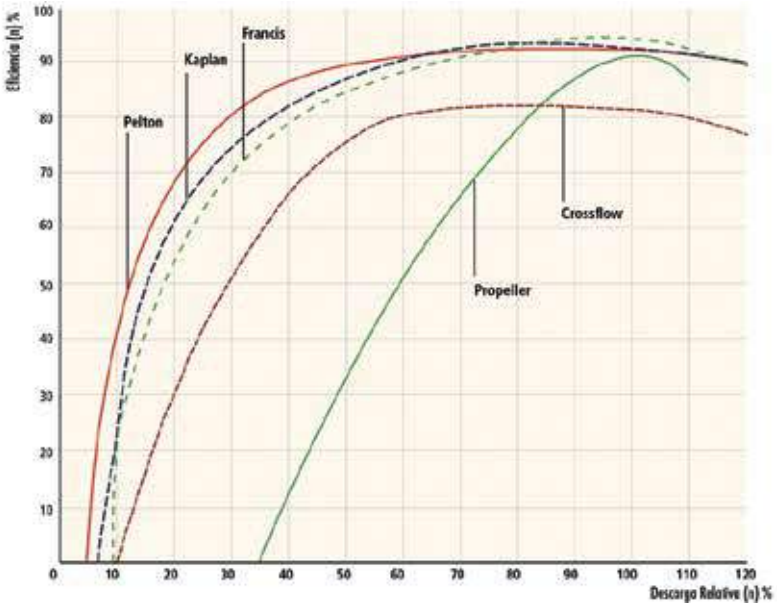


Figura 65.
Opciones de diseño: diseño y elección de turbinas

Las consideraciones adicionales que deben tomarse en cuenta pueden verse influenciadas en varios aspectos por el cambio climático:

- ¿Cuán grande debe ser la capacidad de generación instalada?
- ¿Cuál es el mejor equilibrio entre el tamaño del reservorio, los costos y los impactos ambientales y sociales?
- ¿Cuál es el caudal máximo esperado?
- ¿Qué diseño de las obras civiles y qué configuración de las instalaciones electromecánicas minimizará los costos de construcción?
- ¿Cómo se puede utilizar el recurso de manera más eficiente?
- ¿Será necesario gestionar la acumulación de sedimentos y la calidad del agua en el embalse?
- ¿Será necesario mitigar los impactos ambientales en los flujos aguas abajo (por ejemplo, tiempo, temperatura, contenido de gas) y la biodiversidad acuática?

Un análisis de las prácticas actuales y los arreglos operativos típicos puede ayudar a responder estas preguntas e informar las decisiones. Las estaciones de embalse generalmente operan dentro de sus curvas guías de almacenamiento (gráficos que representan objetivos proyectados y reales de almacenamiento,

58 Kumar et al. (2011)

para guiar las operaciones) que reflejan resúmenes simplificados de la experiencia histórica y acuerdos con las partes interesadas. A menudo hay potencial para reexaminar y mejorar las curvas guías inicialmente adoptadas.

En Lake Madden, Panamá, tradicionalmente se usaba la misma curva guía todos los años (Figura 66; Brown et al. 2010). Mediante el modelado, ahora se sugieren dos curvas guías diferentes, elegidas en función del pronóstico de un evento de El Niño o La Niña. Estas previsiones se realizan en mayo de cada año y las curvas guía se ajustan para reflejar la reducción del embalse que se sugiere con base en las entradas esperadas. Las curvas guía tienen como objetivo garantizar aproximadamente la misma confiabilidad de recarga para finales de año. Dado que los eventos de La Niña conducen a entradas promedio más altas para este sistema, el embalse se lleva a un nivel más bajo. Los eventos de El Niño conducen a condiciones más secas que el promedio y están acompañados por una curva guía más alta.

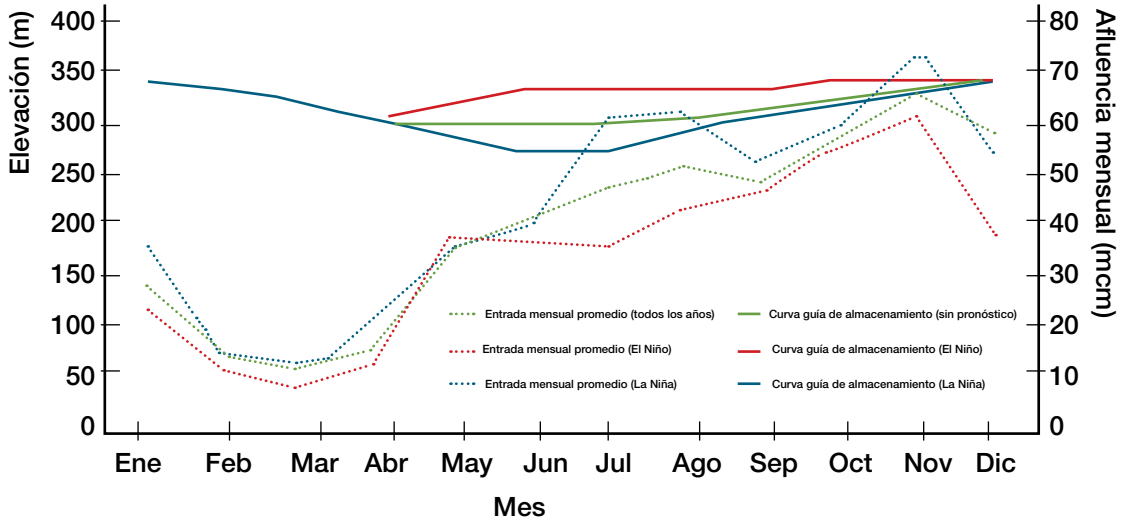


Figura 66.
Curva guía de almacenamiento y entradas mensuales promedio de Lake Madden, Panamá

La ubicación, el diseño y las decisiones operativas también deben considerar el sistema eléctrico general en el mercado relevante. Las estaciones hidroeléctricas generalmente son despachadas por algún centro de despacho central (que puede estar dentro de la empresa, fuera de la empresa en alguna agencia gubernamental o independiente, o en el cliente). Se despachan de acuerdo con el orden de mérito (es decir, las estaciones de menor costo se despachan primero para reducir los costos generales del sistema). Esto significa que las estaciones de filo de río siempre se despachan, siempre que tengan agua. Las estaciones de embalse solo deben despacharse si el valor de usar un metro cúbico de agua ahora es mayor que mantener ese volumen almacenado para la generación futura. Además de la generación, las estaciones de embalse pueden proporcionar y son operadas para ofrecer servicios auxiliares como la estabilización de voltaje y la capacidad de arranque en negro o autógeno . El valor del agua en un embalse es una función de las opciones de generación futura, y estas dependen del sistema total.

El cambio climático influye en todos los proyectos que operan actualmente, así como en las operaciones de posibles proyectos hidroeléctricos futuros. Los proyectos en operación están limitados en sus opciones por la infraestructura y las reglas que ya se han establecido. Los nuevos proyectos tienen un mayor grado de libertad en sus elecciones. Ya sean proyectos existentes o nuevos, las consideraciones operativas incluyen:

- ¿Cuánta agua debe almacenarse durante períodos secos y períodos de alta demanda?
- ¿Cuánta agua se debe liberar antes de la estación lluviosa o de una inundación?
- ¿Cuándo se deben usar salidas que no sean de generación? ¿Cuándo se deben desalojar los sedimentos?
- ¿Cómo deben gestionarse las fluctuaciones del nivel del embalse y de los flujos aguas abajo para minimizar los impactos ambientales y sociales?

En la actualidad, estas preguntas, así como las consideraciones de ubicación y diseño enumeradas antes, generalmente se resuelven sin tener en cuenta el cambio climático a más largo plazo.

Esta sesión introdujo las opciones que tienen los planificadores. Las dos sesiones siguientes discutirán cómo los posibles cambios en la cantidad y la calidad del agua podrían modificar la selección entre diferentes sitios, diseños y regímenes operativos. La sesión final de este Módulo 3 revisará las herramientas que se pueden utilizar para incluir el cambio climático en las decisiones de ubicación, diseño y operación.

Represa Chanlud. ©Elecaustro

Sesión 3.2 Cantidad de agua

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión explora lo que las cantidades cambiantes de agua (o "no estacionarias") significarán para la economía y la seguridad de las centrales hidroeléctricas. Los participantes aprenderán los diferentes impactos de las múltiples dimensiones de la cantidad de agua que dependen del tiempo.
Contenido	• ¿Qué efectos se esperan de la reducción o aumento de las entradas totales? • ¿Qué efectos se esperan de los eventos extremos? • ¿Qué efectos se esperan del cambio en el tiempo de las entradas? • ¿Qué efectos se esperan de una mayor variabilidad de las entradas?
Aspectos clave	Las capacidades óptimas de las turbinas, las capacidades de almacenamiento, los aliviadeross y otras características de los proyectos están cambiando en un clima no estacionario. Algunas regiones se beneficiarán, mientras que otras no. Las capacidades óptimas son cada vez menos seguras y los diseños robustos y la gestión adaptativa desempeñarán un papel más importante en el futuro.
Temas de discusión y ejercicios	¿Qué cambios podrían y deberían hacerse con respecto al diseño y operación de las centrales hidroeléctricas de Ecuador?
Recursos adicionales	Documento 3.2.5 - Brown et al. (2010) Managing Climate Risk in Water Supply Systems: Materials and tools designed to empower technical professionals to better understand key issues.
Lecturas clave	Documento 3.2.1 - Milly et al. (2008) Stationarity is dead. Documento 3.2.2 - Hamadudu and Killingtveit (2012) Assessing Climate Change Impacts on Global Hydropower. Documento 3.2.3 - Carvajal et al. (2017) Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the CMIP5 ensemble—the case of Ecuador. Documento 3.2.4 - MEER & MAE (2018) Resumen público: Análisis de la vulnerabilidad de las centrales hidroeléctricas emblemáticas ante los efectos del cambio climático en siete subcuencas hidrográficas del Ecuador (CHECC).

Los problemas relacionados con el agua generalmente se pueden dividir en cinco categorías:

- tener demasiada agua,
- tener muy poca agua,
- tener agua en el momento equivocado,
- no saber cuánta agua habrá,
- tener agua de calidad inadecuada (próxima sesión).

Todos estos problemas pueden agravarse por el cambio climático.

Los efectos del cambio climático en las cantidades de agua se pueden visualizar mediante las CDF, de la misma manera que otros efectos discutidos anteriormente (es decir, el uso del suelo o las demandas de flujo ambiental). Por ejemplo, el flujo de entrada total puede ser mayor o menor, que se observa bajo la CDF como un área aumentada o disminuida. Esto aumenta o reduce la viabilidad de las inversiones hidroeléctricas, y altera la capacidad óptima de la planta (Figura 67).

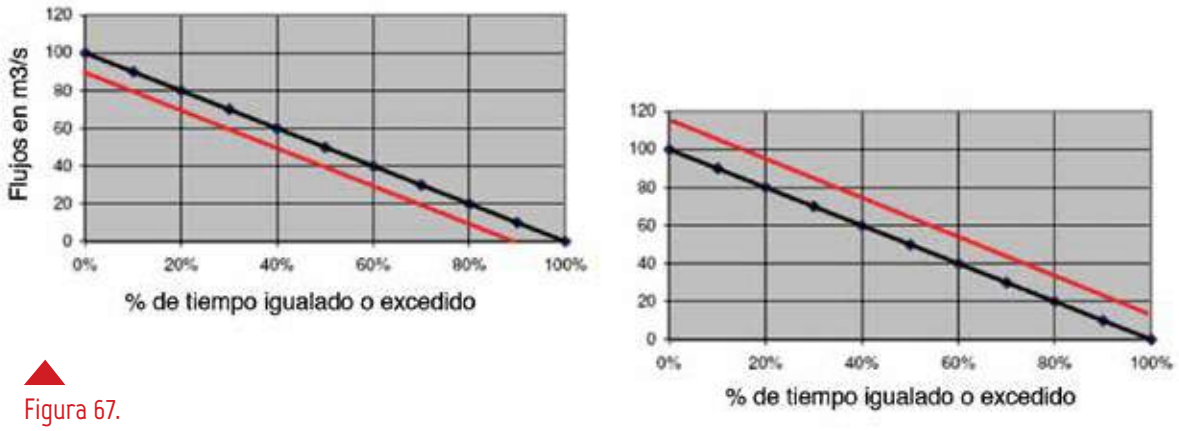


Figura 67.
Entrada total reducida (izquierda) y aumentada (derecha)

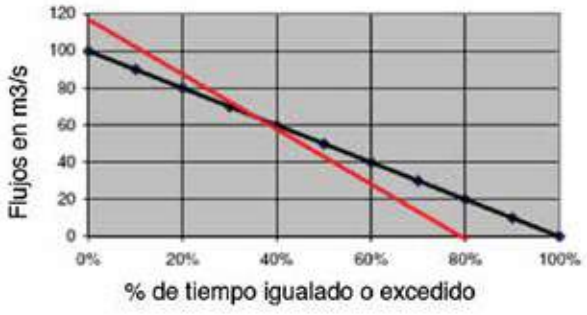


Figura 68.
CDF con flujos más extremos

Las variaciones estacionales también pueden amplificarse, incrementando aún más los caudales altos o reduciendo los más bajos (por lo tanto, aumentando las inundaciones o las sequías), lo que inclina más la CDF (Figura 68). A una capacidad de potencia dada, esto reduce el factor de carga. Al agregar capacidad de almacenamiento, se puede restaurar el factor de carga. Sin embargo, esto tiene un costo y reduce la viabilidad de la energía hidroeléctrica.

Finalmente, la CDF no solo puede cambiar, como una representación del flujo promedio esperado, sino que también esta puede ser menos certera. El rango de condiciones alrededor del promedio puede aumentar y los intervalos de confianza pueden ampliarse.

Los posibles cambios de flujo se han modelado para muchos sistemas fluviales, una proyección de los cuales se muestra en la Tabla 15.[59] Los números son solo indicativos, ya que existen grandes incertidumbres metodológicas (por ejemplo, con respecto a los cambios en el uso del agua). Otros resultados han sido pronosticados por otros estudios con diferentes metodologías. Actualmente no hay predicciones concluyentes sobre la escorrentía futura de los ríos.[60]

59 Palmer et al. (2008) Climate change and the world's river basins: anticipating management options. Front Ecol Environ 2008; 6, doi:10.1890/060148.

60 Beilfuss & Triet (n.d.) Climate change and hydropower in the Mekong River Basin: a synthesis of research. A scoping study prepared for the MRC and GIZ. Draft.

Río	Descarga en la boca del río1960s- 1990s (km³/ año)	Descarga en la boca del río, 2050s (km³/ año)	Cambio
Amazonas, Orinoco	6 802,4	5 536,5	-18,6
Araguari	51,5	23,4	-54,6
Bio-Bio	32,2	26,2	-19,1
Doce	24,4	33,4	-37,1
Futaleufu	9,6	9,1	-4,7
Guayas	27,6	29,2	5.8
Itajai	15,0	12,2	-18,7
Itata, Maule	10,6	7,7	-27,4
Jacui, Camaqua, Jagaro	101,8	97,2	-4,5
Juquiá, Ribeira	11,5	9,4	-18,4
Magdalena	218,4	154,5	-29,3
Mearim, Grajaú, Pindaré	9,3	3,9	-58,4
Paraiba do Sul	24,2	29,3	.21,3
Parnaiba	26,6	5,0	-81,2
Río de la Plata	601,9	639,5	6,2
Río Negro	26,8	23,5	-12,4
Sao Francisco	79,3	100,7	27,0
Sinú	11,8	7,1	-40,2

Tabla 15.
Cambios pronosticados de la descarga anual en ríos con presas: descarga promedio de los años 1960 a 1990 vs. 2050 in km³/año y cambio porcentual

Línea de transmisión EL Inga - San Rafael. ©CELEC EP

También se han modelado los cambios regionales en la escorrentía anual debido al cambio climático. Como ejemplo, los modelos muestran que el sur y el oeste de Europa podrán experimentar mucha menos escorrentía y el norte y este de Europa experimentarán un aumento significativo. En la Figura 69 se superponen las áreas con descarga aumentada o reducida, con las centrales hidroeléctricas existentes en Europa.[61]

61 Lehner et al. at https://www.researchgate.net/publication/4947295_The_Impact_of_Global_Change_on_the_Hydropower_Potential_of_Europe_A_Model-Based_Analysis

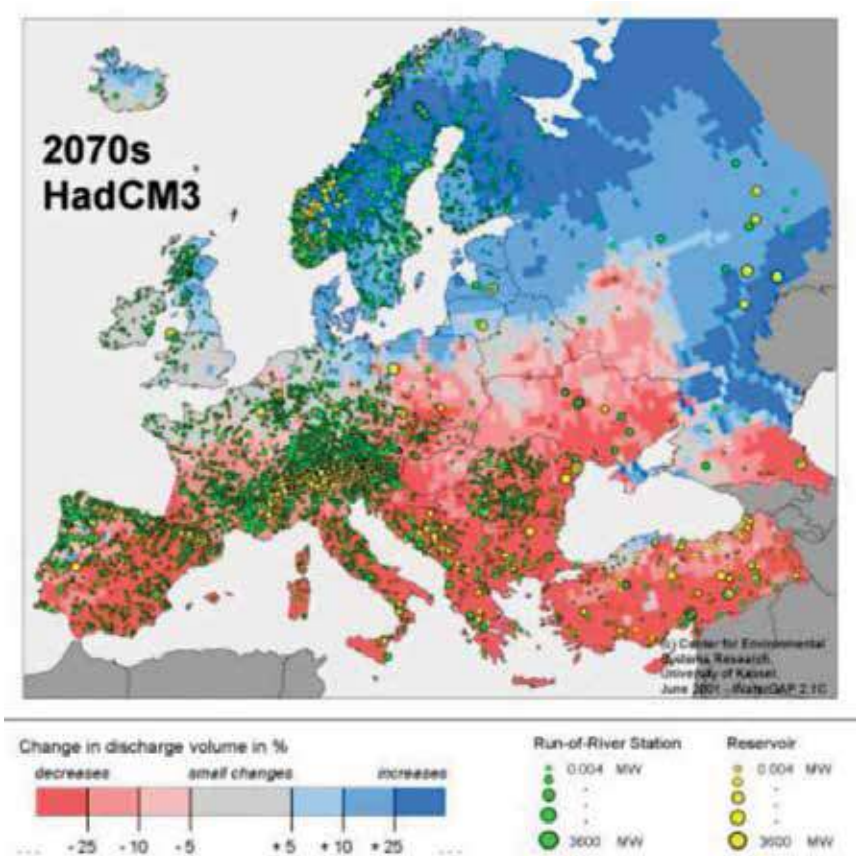


Figura 69.
Modelo de los cambios en el volumen de descarga y el potencial hidroeléctrico europeo a futuro

En el ámbito mundial, Hamududu y Killingtveit (2012) publicaron el primer resumen del efecto de los cambios de escorrentía en la generación hidroeléctrica para países y para estados/provincias de Canadá, Estados Unidos, Brasil y China (Figura 70). Con base en 12 modelos de circulación global, se esperan algunos cambios notables en la escorrentía (por ejemplo, grandes aumentos en Quebec y grandes disminuciones en Turquía y Venezuela). Se espera que los cambios en gran parte de Asia sean positivos.

En esta proyección, se supone que los efectos de la escorrentía son proporcionales a los efectos en la generación de energía. Las limitaciones de estas proyecciones incluyen el que solo se analizaron los sistemas hidroeléctricos actuales; no se incluyó el desarrollo futuro de energía hidroeléctrica. Tampoco se incluyeron los impactos de los cambios en el tiempo del flujo, la gestión del almacenamiento o los cambios en el transporte de sedimentos. Además, los efectos del cambio climático se desglosaron al nivel de jurisdicciones, pero no en unidades hidrológicas (cuencas).

Si bien estas son solo aproximaciones de los cambios reales que se pueden esperar, pueden servir como señales de "alerta temprana" para los países que podrían verse fuertemente afectados, ya sea de manera negativa o positiva.

Figura 70.
Cambios porcentuales de la generación global de energía hidroeléctrica, por país y estado/provincia

Además de la escorrentía total, es probable que las frecuencias, intensidades y duraciones de eventos extremos, como sequías e inundaciones, varíen como resultado del cambio climático. Las regiones centrales de los continentes pueden volverse especialmente propensas a una mayor sequía en verano (Figura 71)[62]. Esto ocurre como resultado de una combinación de lluvias de verano reducidas en muchas áreas continentales interiores, como el sur de Rusia, Europa Central y el medio oeste de Estados Unidos, junto con un aumento de la evaporación potencial a nivel mundial.

Las condiciones de sequía no son inusuales en las operaciones hidroeléctricas y ya existen precedentes de cómo manejarlas. Por ejemplo, Nam Theun Power Company (NTPC), bajo un acuerdo de concesión con el gobierno de la República Popular Democrática de Lao, tiene la responsabilidad de la gestión del agua en el embalse. Según su acuerdo de compra de energía con el intermediario EGAT, NTPC asume parte del riesgo hidrológico y tiene que pagar multas a EGAT si, entre otras cosas, no mantiene la "energía primaria" garantizada. Para reducir el riesgo, NTPC tiene derecho a declarar dos años como "años de sequía", durante los cuales está exento de estas sanciones. La hidrología es más variable que la generación (energía primaria más secundaria), que a su vez es más variable que los pagos de EGAT; por lo tanto, el riesgo hidrológico para NTPC se reduce. La Figura 72 muestra una simulación económica en este escenario, durante el período de 52 años de registro hidrológico. En los años más secos, los ingresos habrían caído a un 86%[63].

62 Krishna (2013) Regional climate change: Findings of IPCC AR5 WGI.

63 NTPC (2005) PPA Resumen para todo público

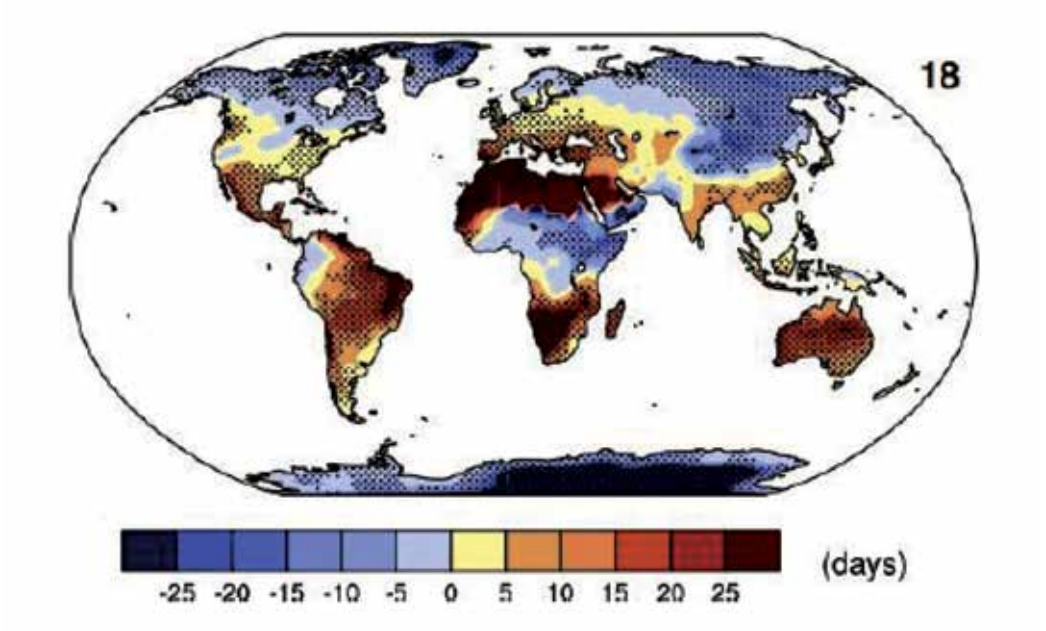


Figura 71.
Máximo de días secos consecutivos proyectados anualmente de 2081-2100, bajo el escenario RCP 8.5

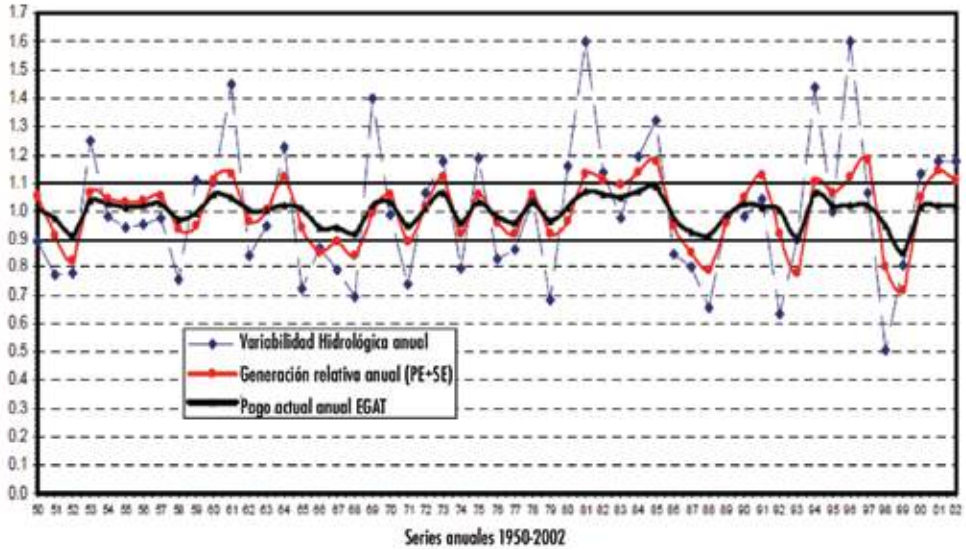


Figura 72.
Variaciones relativas de flujo, generación de energía y pago real de EGAT

La pregunta es si tales acuerdos, negociados sobre la base de la hidrología histórica, serán adecuados en el futuro. Dado que la mayoría de los acuerdos de compra de energía no se hacen públicos, existe muy poca información sobre cómo negociar convenios más flexibles y adaptativos.

Tan problemático como tener "muy poca agua" (sequía) es que haya "demasiada agua" (inundaciones). Las inundaciones se clasifican como grandes, raras o extremas, de acuerdo con su probabilidad de excedencia anual (1 por cada número definido de años; Figura 73).[64] La probabilidad del 1% de que ocurra una inundación de excedencia anual, o la "inundación de cada 100 años", tiene una probabilidad de 1 en 100 de ser igualada o superada en cualquier año, y tiene un intervalo de recurrencia promedio de 100 años. La precisión de la estimación del 1% de probabilidad de que se produzca una inundación varía según la cantidad de datos disponibles, la precisión de esos datos, los cambios futuros en el uso de la tierra en el área de drenaje del río, los ciclos climáticos y las tendencias, y qué tan bien se ajustan los datos a la distribución de probabilidad estadística.

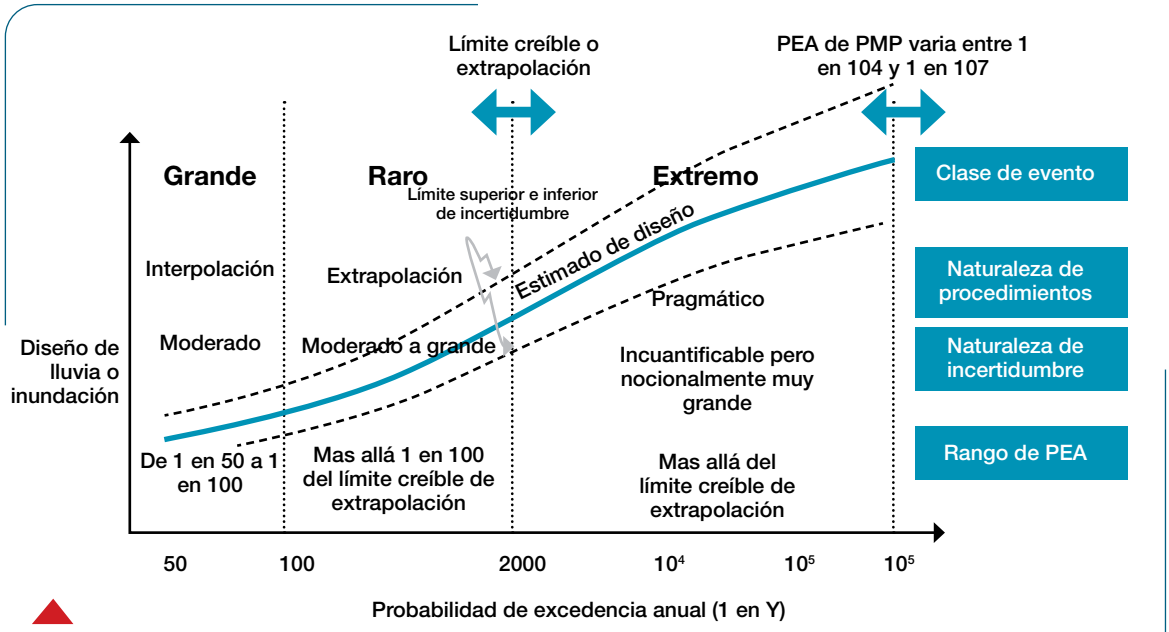


Figura 73.
Estimación e interpretación de inundaciones 1-en-x-años

La inundación máxima probable (PMF, *probable maximum flood*) es la inundación teórica más grande que resulta de una combinación de las condiciones meteorológicas e hidrológicas más severas que podrían ocurrir en un área determinada. El aliviadero de muchas represas (dos tercios de una muestra de 90 grandes represas construidas desde mediados de la década de 1960) está diseñado para pasar el PMF.[65]

El PMF está estrechamente relacionado con la precipitación máxima probable, la mayor profundidad de precipitación para una duración dada, que es meteorológicamente posible para un área de tormenta de un tamaño determinado, en un lugar y tiempo del año en particular.[66] Los estudios de modelado de precipitaciones extremas muestran que el volumen de precipitación de la tormenta está estrechamente relacionado con el vapor de agua atmosférico. El aumento de la temperatura del aire debido al cambio climático significará un aumento en el contenido de vapor de agua atmosférico y, por lo tanto, resultará en un aumento de la cantidad de agua precipitable disponible. El incremento de la cantidad de humedad disponible debería ocasionar fuertes lluvias que comienzan más temprano, duran más y son más continuas con el tiempo.

64 Presentación en https://ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/ridm/workshops/extreme-hydro.pdf

65 Fahlbusch, F.E. (1999) Spillway design floods and dam safety. International Journal on Hydropower & Dams.

66 WMO (1986)

Los procesos por los cuales se generan inundaciones extremas (por ejemplo, flujos terrestres) son difíciles de modelar, y los datos hidrológicos a menudo no están suficientemente detallados (para datos locales y lluvias de corta duración). Sin embargo, los modelos climáticos mundiales y regionales generalmente coinciden en pronosticar una mayor probabilidad de fuertes precipitaciones y períodos de retorno más cortos. A largo plazo (2081-2100) y en un escenario de emisiones más severo, Ecuador sería parte de una de las regiones con los mayores incrementos en la precipitación máxima, más allá del 25% (Figura 74).[67]

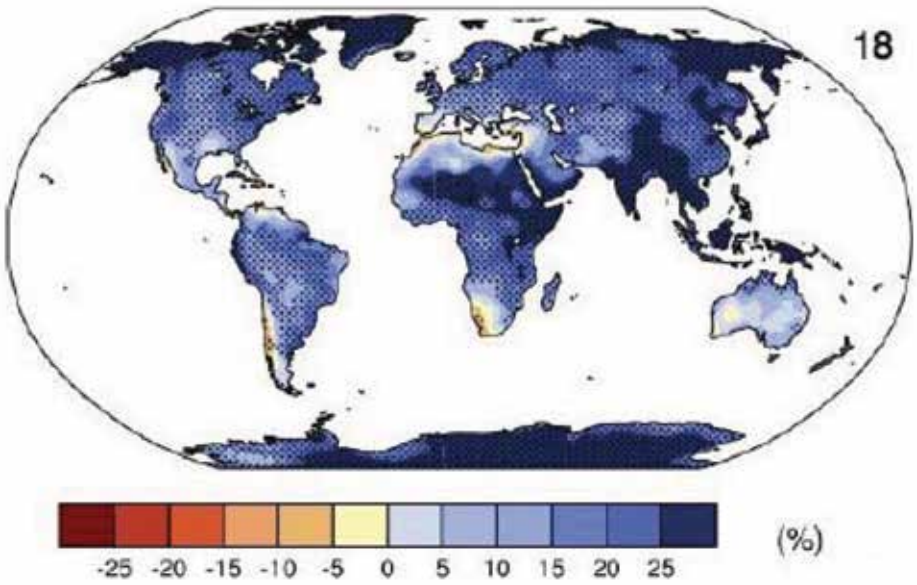


Figura 74.
Precipitación máxima de 5 días pronosticada del 2081 al 2100 en un escenario RCP 8.5

Tales proyecciones siempre vienen con cierta incertidumbre, y es útil poder cuantificar esta. Como una demostración de la incertidumbre en las estimaciones de la probabilidad de una inundación, en la Figura 75[68] se observa la relación de probabilidad de inundación para el río Big Piney. Por encima y por debajo de la probabilidad de inundación, representada por la línea negra continua, hay dos líneas discontinuas que representan los intervalos de confianza del 90% de esta relación. La inundación del 1% en esta ubicación tiene una magnitud estimada de 44.300 cfs, con una confianza del 90% de que el verdadero valor del 1% de la inundación está entre 36.600 cfs and 56.400 cfs.

67 Krishna (2013) Regional climate change: Findings of IPCC AR5 WGI

68 http://pubs.usgs.gov/gip/106/pdf/100-year-flood-handout-042610.pdf

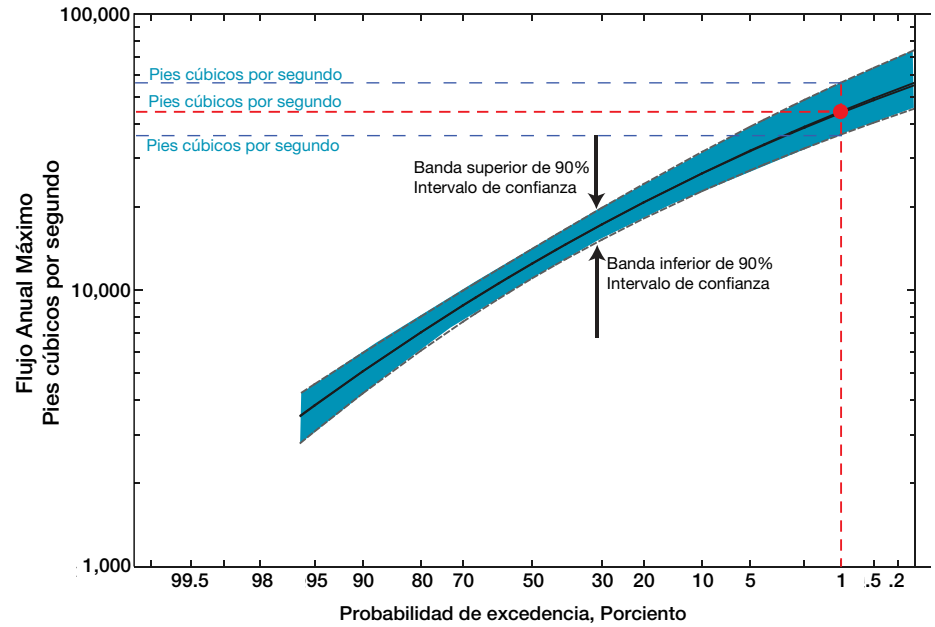


Figura 75.
Probabilidad de inundaciones para el río Big Piney, cerca de Big Piney, MO, Estados Unidos

Las inundaciones en Ecuador son causadas por dos fenómenos principales: los monzones (vientos alisios estacionales que traen humedad hacia el noroeste desde el Pacífico y hacia el este desde el Atlántico, durante el primer trimestre del año) y ENSO (El Niño Oscilación del Sur, por sus siglas en inglés).[69]

¿Cómo afectará el cambio climático a estos fenómenos productores de inundaciones? Existe una incertidumbre importante sobre el momento de ocurrencia y el alcance de El Niño / La Niña y de los fenómenos estacionales como el monzón y los ciclones. Lo que parece ser cierto es que el cambio climático puede inducir cambios estacionales en muchas partes del mundo, por ejemplo, posponiendo el inicio de los monzones o provocando un deshielo a principios de la primavera en las regiones templadas. (Este efecto no se observa necesariamente en una CDF, que muestra datos sin su orden cronológico). Puede alinear la estacionalidad de los flujos más o menos con el pico de la demanda estacional de electricidad (que también se espera que cambie a los meses de verano).

Además, las inundaciones pueden ser el resultado de eventos aguas arriba, como inundaciones repentinas de lagos glaciales (GLOF, por sus siglas en inglés) y rupturas de presas naturales o artificiales. Se espera que los GLOF sean más frecuentes en las cuencas donde los glaciares se están reduciendo. A menudo se pasan por alto los riesgos de ruptura de presas en cascada.

Como ejemplo de los cambios estacionales, la Figura 76 muestra las entradas de agua esperadas para un proyecto hidroeléctrico en Ecuador (en relación con las entradas históricas).[70] Los valores superiores a 0 muestran estaciones que son más húmedas que los promedios históricos, y los valores inferiores a 0 muestran estaciones que son más secas que los promedios históricos. En este caso, se proyectan cambios significativos en las entradas durante algunos meses.

69 Burke et al.: Climate and Climate Change in Ecuador: An Overview

70 https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/POLICY-BRIEF-CHECC-ESP.pdf

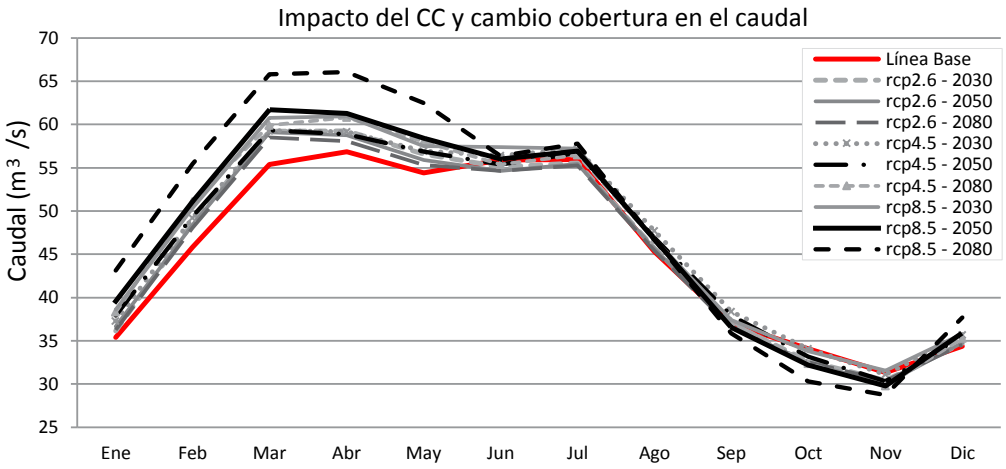


Figura 76.
Entradas mensuales de agua esperadas para un proyecto hidroeléctrico en Ecuador

Los regímenes de flujos variables y cambiantes se traducen en resultados positivos o negativos para los desarrolladores de energía hidroeléctrica. Hydro Québec, la segunda mayor empresa mundial de energía hidroeléctrica, afirma que las condiciones de escorrentía son su factor de riesgo más significativo, que podría aumentar o disminuir su ingreso neto anual en cientos de millones de dólares canadienses.[71] Todas las compañías hidroeléctricas deben prepararse para estas incertidumbres.

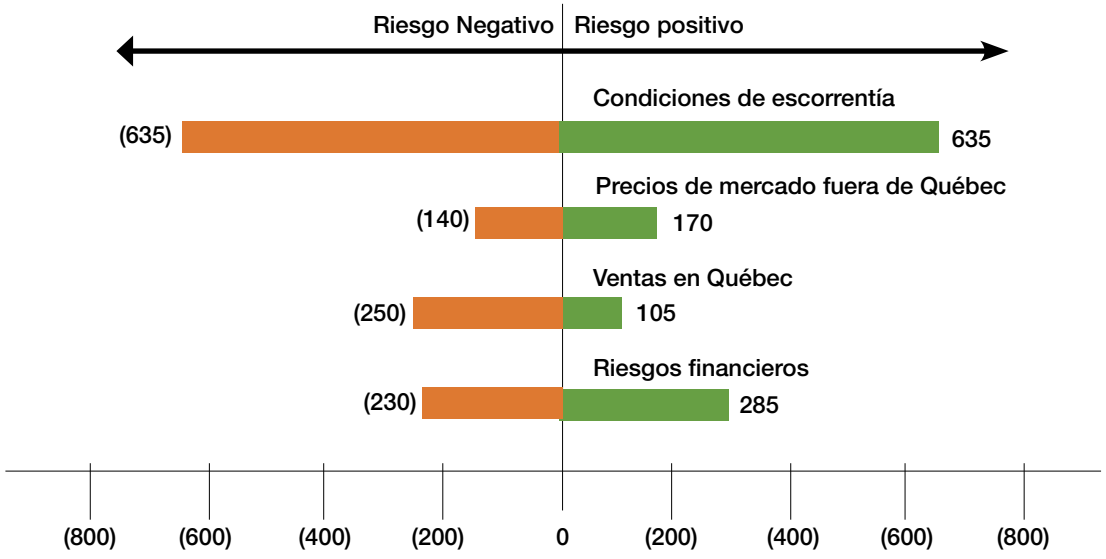


Figura 77.
Variabilidad de ingresos netos para 2008 (millones dólares canadienses)

71 Hydro-Québec Strategic Plan 2006-2010 at http://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/plan-strategique-2006-2010.pdf

Si la precipitación cae como nieve en lugar de lluvia, solo retrasa la escorrentía estacionalmente hasta la próxima temporada de fusión. Sin embargo, la formación de hielo puede retrasar la escorrentía durante muchos años. Los glaciares como fuente de flujos son importantes para muchos sistemas fluviales. Los impactos del cambio climático en los sistemas dependientes de los glaciares son, por lo tanto, únicos. Incluyen aumentos temporales en la escorrentía debido a la fusión del hielo, con la CDF desplazándose temporalmente hacia afuera como resultado del aumento de los flujos anuales. Por ejemplo, debido a una pérdida glacial significativa, la producción de hidroenergía suiza en el año 2003 (el más caluroso y seco de los últimos 500 años) fue solo un 0,8% por debajo del promedio de 10 años. Campos de hielo en Islandia[72] almacenan 15 a 20 años de precipitación, y se espera que se derritan en los próximos 200 años. Los flujos estacionales cambiarán a fines del verano. No obstante, la capacidad de utilizar el agua de deshielo productivamente depende de la capacidad de almacenar los altos flujos de verano. La actual infraestructura hidroeléctrica en Islandia podrá utilizar solo el 38% de los flujos adicionales para 2050.

En los Andes, donde los glaciares son generalmente más pequeños, la mayoría de ellos ya han pasado el año de derretimiento y escorrentía máximos y su contribución a los flujos de los ríos disminuirá en el futuro (Figura 78).

ío Victoria. ©Francisco Clavijo, AICCA

72 https://www.researchgate.net/publication/242249882_The_impact_of_climate_change_on_glaciers_and_glacial_runoff_in_the_Nordic_countries

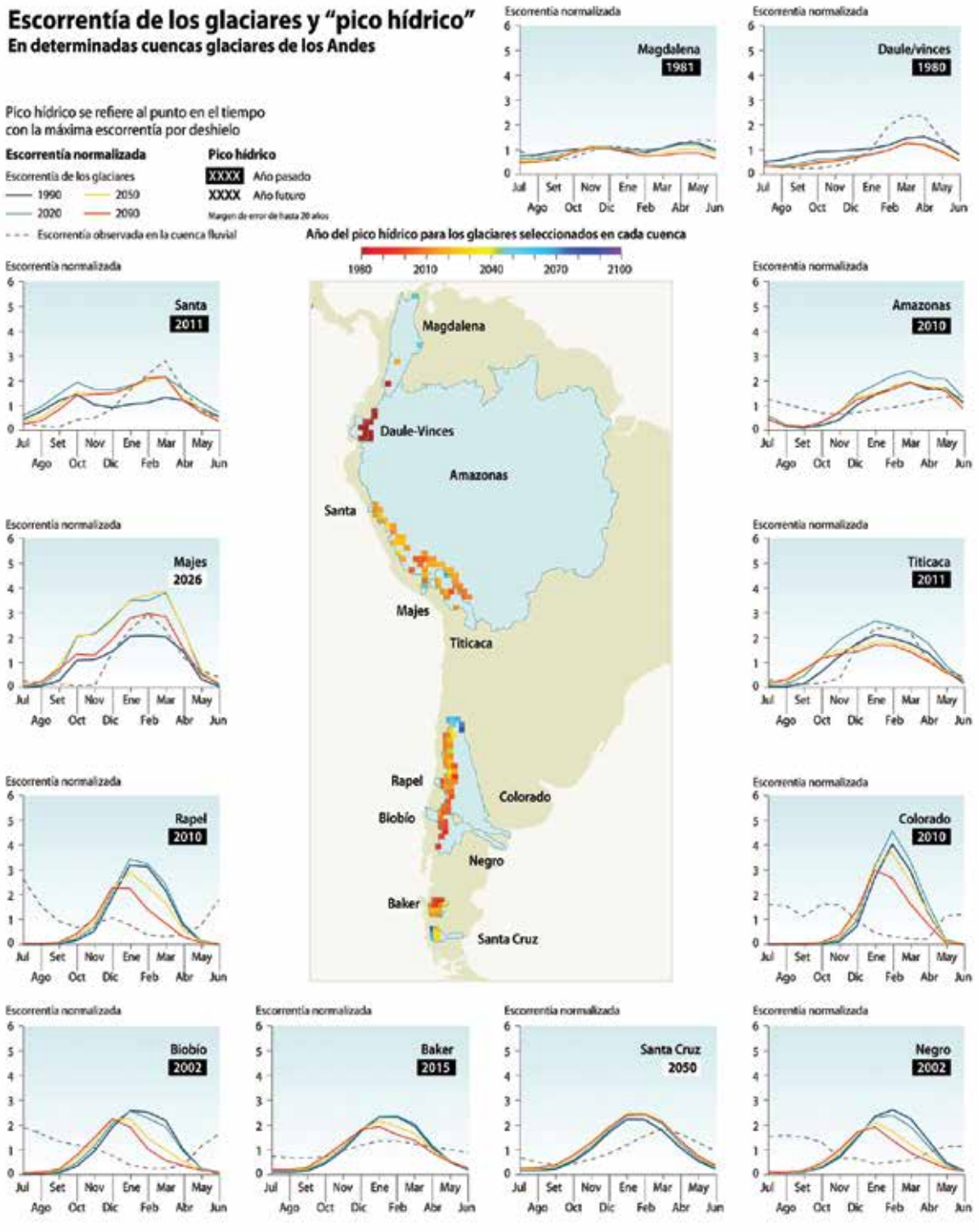


Figura 78.
Escorrentía de glaciares en los Andes

¿Cuáles son las respuestas disponibles ante posibles cambios en la cantidad de agua?

En primer lugar, sería altamente deseable poder predecir la escorrentía futura con mayor certeza. Se están realizando esfuerzos para proporcionar información hidrometeorológica mejorada a escala reducida, pero existen algunos límites para pronosticar el clima. Una razón es que una serie de parámetros subyacentes, como la tasa de aumento futuro de los gases de efecto invernadero, son simplemente desconocidos. Los planificadores pueden tener que conformarse con información hidrológica menos confiable, específica para sus sitios, de lo que estaban acostumbrados en el pasado.

Por lo tanto, los planificadores deben aceptar un mayor nivel de incertidumbre e intentar hacer que los proyectos sean más resilientes y flexibles para hacer frente a dicha incertidumbre. Esto puede significar cambios tanto en los componentes "duros" como en los "blandos", es decir, en la infraestructura y en las reglas operativas. Los ejemplos para hacer que la infraestructura sea más resistente incluyen el incremento de la capacidad del aliviadero de las presas, lo cual es importante por razones de seguridad. Una mayor capacidad de generación y almacenamiento puede aumentar la producción de energía de flujos más irregulares que en el pasado.

En el ámbito regional, donde se pronostica un aumento de la escorrentía, como en el norte y algunas otras regiones, esto incentivará una mayor inversión en energía hidroeléctrica. En otras regiones, se reducirá el potencial hidroeléctrico.

La adaptación a cantidades diferentes será costosa y podría reducir el atractivo de las inversiones en energía hidroeléctrica. Este es particularmente el caso de los inversores privados. La capacidad de almacenamiento se ve a menudo como un activo principalmente público, de usos múltiples, y los incentivos para inversores privados son limitados. Muchas compañías privadas prefieren invertir en esquemas de filo de río. Si estos están sujetos a una mayor incertidumbre en los flujos, la inversión puede verse reducida. Para el sector público, las preocupaciones generales sobre la seguridad del agua a menudo jugarán un papel más importante en la toma de decisiones que el interés por optimizar la energía hidroeléctrica. La sesión 4.3 brindará más oportunidades de discusión sobre cómo la hidroenergía puede ayudar a la adaptación en el sector más amplio de los recursos hídricos. Cuando un embalse se utiliza para múltiples propósitos y las entradas son variables, la energía hidroeléctrica puede ser considerada una prioridad secundaria.

Sesión 3.3 Calidad del agua

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión proporciona una visión general de la calidad física, química y biológica del agua del embalse. Se revisan los determinantes de la calidad y su evolución en el tiempo. Se espera que la erosión de la cuenca hidrográfica y la sedimentación del embalse, así como la estratificación, temperatura y biogeoquímica, cambien con el clima. Se revisarán las opciones de gestión para responder a dichos cambios. Los participantes aprenderán a apreciar que en el futuro los embalses pueden presentar algunos difíciles problemas de gestión de calidad.
Contenido	• ¿Cuáles son las características químicas, físicas y biológicas clave del agua? • ¿Cómo se desarrolla la calidad del agua del embalse con el tiempo? • ¿Qué impactos en la calidad se esperan debido al cambio climático? • ¿Cómo se puede gestionar la calidad del agua del embalse?
Aspectos clave	La calidad del agua generalmente no se ve afectada por los proyectos de filo de río, pero los embalses pueden tener un gran impacto en la calidad. Los procesos de captación y embalses que determinan la calidad del agua se verán agravados por el cambio climático. La calidad se puede manejar por medio de la ubicación, el diseño y las opciones operativas.
Temas de discusión y ejercicios	¿Es posible que los embalses compensen los cambios climáticos y de uso del suelo y proporcionen una temperatura del agua y cargas de sedimentos cercanas a las históricas? ¿Pueden los embalses hacer que un río sea otra vez más “natural”?
Recursos adicionales	Documento 3.3.3 - UNESCO-WHO-UNEP (1996) Reservoir Water Quality Assessments.
Lecturas clave	Documento 3.3.1 - Dortch (n.d.) Water Quality Considerations in Reservoir Management. Documento 3.3.2 - Moss et al. (2011) Allied attack: Climate change and eutrophication.

La calidad del agua se describe por características físicas, químicas y biológicas:

- Las características físicas incluyen: temperatura, turbidez, presencia de sólidos, color, sabor y olor.
- Las características químicas incluyen: minerales e indicadores inorgánicos (es decir, pH, dureza, sólidos disueltos totales, conductividad, relación de adsorción), materiales orgánicos (es decir, demanda biológica y química de oxígeno) y gases disueltos.
- Las características biológicas incluyen la flora y fauna, así como el plancton (organismos que viven en la columna de agua y son incapaces de nadar contra las corrientes). El plancton consta de: fitoplancton (algas; a través de la fotosíntesis son productores), zooplancton (animales como crustáceos, huevos y larvas de peces y gusanos; son consumidores) y bacterioplancton (recicladores).

La calidad del agua del embalse es una función de las características de la calidad y cantidad de las entra-

das a este y de los procesos que operan en el mismo embalse. Se han llevado a cabo muy pocos estudios que evalúen los posibles efectos del cambio climático en la calidad del agua de los ríos, pero los que se han realizado sugieren que los cambios en el volumen de entrada tendrán la mayor influencia. Es probable que el cambio climático altere el volumen y el tiempo de estas entradas en un sistema de reserva. Los cambios en la calidad del agua en el propio embalse están determinados en gran medida por el tiempo de permanencia y el perfil de temperatura del agua.

La calidad del agua en los lagos naturales está bien estudiada; sin embargo, los datos son de aplicación limitada para los embalses hidroeléctricos. Los embalses generalmente reciben agua de cuencas hidrográficas más grandes en comparación con los lagos y, por lo tanto, están más expuestos a cambios en la hidrología, el uso del suelo y la calidad del río. La mayoría de los lagos se encuentran en latitudes del norte (Figura 79, y sus características no siempre son transferibles a embalses tropicales (Tabla 17).[73]

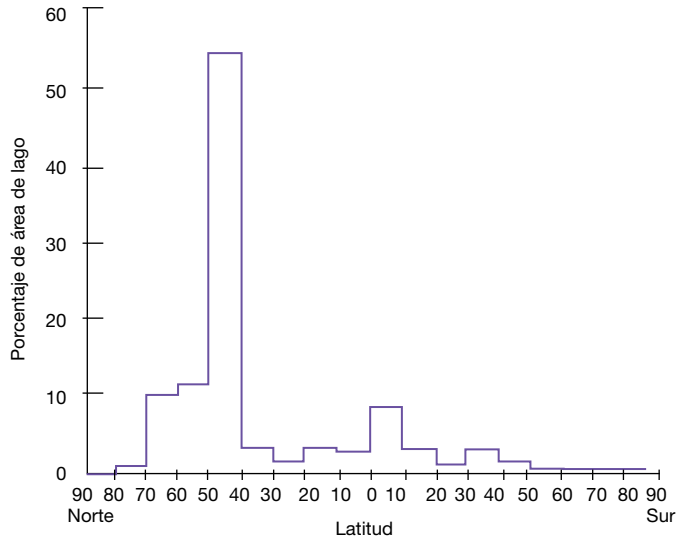


Figura 79.
Distribución de lagos por latitud

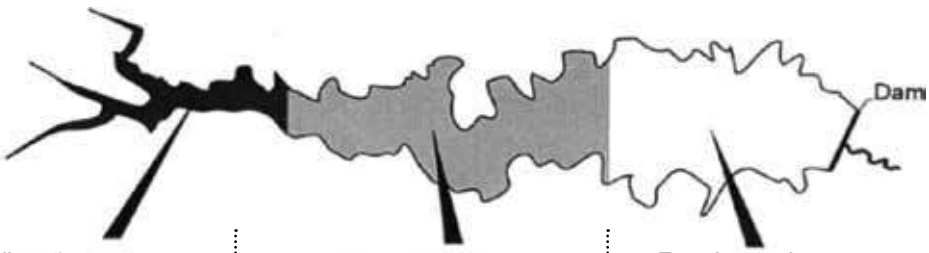
Características de los lagos tropicales	**Consecuencias**	**Implicaciones**
Los lagos naturales no son abundantes	Embalses de importancia relativamente alta	El manejo de los embalses es de alta prioridad
Pocos lagos glaciares entre los lagos naturales	Los lagos de ríos son el tipo natural predominante	El estado de los ríos dictamina el bienestar de la mayoría de los lagos
Monomíctico cálido predominante	Temporada de mezcla anual predecible, excepto en lagos no profundos	Anoxia estacional probable en aguas profundas; ciclo estacional en la calidad del agua
Temperaturas altamente hipolimnéticas, temporadas de estratificación largas	Alta probabilidad de disminución de oxígeno hipolimnético	Alta vulnerabilidad a eutrofización o carga orgánica
Cambios recurrentes en el espesor de las capas mixtas	Enriquecimiento de nutrientes recurrente de las capas mixtas	Alta eficiencia en el uso de nutrientes; fuerte respuesta a la carga de nutrientes antropogénicos

73 Lewis (2000) Basis for the protection and management of tropical lakes.

La limitación de nitrógeno en autótrofos predomina sobre la limitación de fósforo	Contaminación por nitrógeno especialmente problemática	Crítica desnitrificación de los desechos; la eliminación del fosforo también es importante
Depredadores invertebrados favorecidos por anoxia	Herbívoros consumidos principalmente por depredadores invertebrados	Baja producción de peces por unidad primaria de producción; la eutrofización puede reducir la producción de peces
Biodiversidad planctónica y béntica similar a aquella de los lagos temperados	Analogías con lagos temperados más cercana que con ambientes terrestres	Protección de biodiversidad desafiante, pero menor que en el trópico terrestre

Tabla 16. Características de los lagos y embalses tropicales

Los cuerpos de agua en diferentes latitudes y ecosistemas varían mucho en la calidad del agua, debido a la disponibilidad de luz, las diferencias de temperatura y el tipo y la cantidad de nutrientes, factores que influyen en la producción primaria. La calidad del agua también puede variar entre las diferentes zonas de un embalse (Figura 80).[74]



Zona ribereña

Base canalizada, estrecha

Tasas de flujos altos relativos

Sólidos altos suspendidos

Baja disponibilidad de luz en profundidad

Suministro de nutrientes por advección

Niveles relativamente altos de nutrientes

Productividad primaria de luz limitada

Pérdida de células principalmente por sedimentación

Suministro de material orgánico por alocatauno

Más eutrófico

Zona transicional

Base amplia y profunda

Tasas de flujos reducidos

Solidos reducidos suspendidos disponibilidad de luz en profundidad

Suministro de nutrientes por advección reducido

Niveles relativamente altos de productividad primaria

Perdida de células por pastoreo y sedimentación

Intermedio

Intermedio

Zona Lacustrina

Base ancha, profunda, como lago

Tasas de flujos bajo

Relativamente claro, alta disponibilidad de luz en profundidad

Suministro de nutrientes por reciclaje interno

Niveles relativamente bajos de nutrientes

Productividad primaria limitada de nutrientes

Perdida de células principalmente por pastoreo

Suministro de material orgánico por autóctono

Más oligotrópico

Más eutrófico

Figura 80.
Zonificación longitudinal de las condiciones de la calidad de agua en embalses

74 Lake Access Project at http://www.lakeaccess.org/ecology/lakeecologyprim4.html

Un importante factor determinante de la calidad del agua es la mezcla. La mezcla en los embalses se controla en gran medida mediante la estratificación, es decir, el posicionamiento vertical de las capas de agua en orden de densidad, con agua la más ligera (más cálida, menos densa) que se forma por encima del agua más pesada (más fría, más densa). Las capas resultantes de la estratificación se denominan epilimnion, metalimnion e hipolimnion. La capa superior es el epilimnion, una zona mixta, típicamente con el mayor contenido de oxígeno. Debajo de la capa superior está el metalimnion, una zona en la que la temperatura cambia al menos 1 °C por metro vertical (también llamada "termoclina"). La capa inferior es el hipolimnion. Es bastante estancado y puede volverse anóxico debido a la descomposición bacteriana de la materia orgánica, que utiliza oxígeno (Figura 81).[75] Cuanta más materia orgánica (como en lagos eutróficos), más probable es que exista un déficit de oxígeno en la capa inferior.

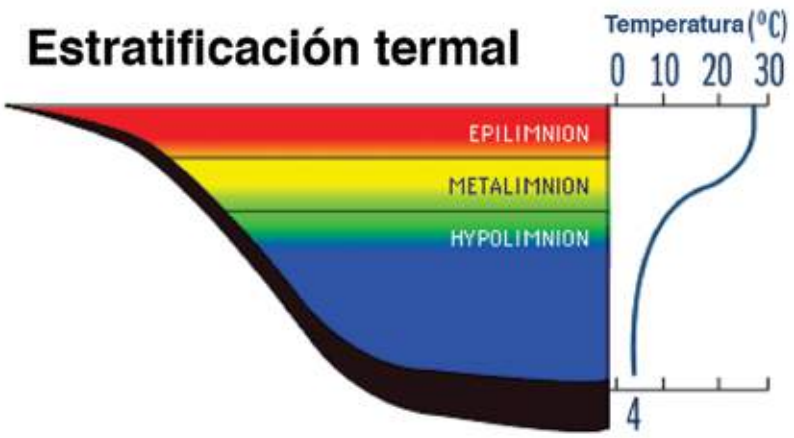


Figura 81.
Estratificación termal en un embalse

El desarrollo de la estratificación depende del flujo, el tiempo de permanencia y la topografía, así como de la dinámica energética externa (es decir, la radiación solar y la fuerza del viento). Una de las formas más útiles de clasificar lagos y embalses es por su dinámica de mezcla, es decir, con qué frecuencia se produce la mezcla entre la superficie y las aguas profundas (Figura 82).[76] En aguas monomícticas, la mezcla ocurre una vez al año. En lagos dimícticos, la mezcla ocurre dos veces al año (típicamente en primavera y otoño). En lagos polimícticos, que generalmente son poco profundos, la mezcla se produce de forma continua o discontinua, varias veces al año. (Las aguas amícticas están bajo hielo y nunca se mezclan).

El ejemplo de la Figura 83 muestra las capas de un embalse de agua cálida en Colombia.[77] En dos ubicaciones en el embalse existen claras diferencias en la temperatura, la densidad, el oxígeno disuelto y otras características del agua. La profundidad de las capas varía con el tiempo y en diferentes lugares.

75 Lake Access Project at http://www.lakeaccess.org/ecology/lakeecologyprim4.html

76 Lewis, W.M., JR. (1983). A revised classification of lakes based on mixing. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 40: 1779-1787

77 Thornton (1982)

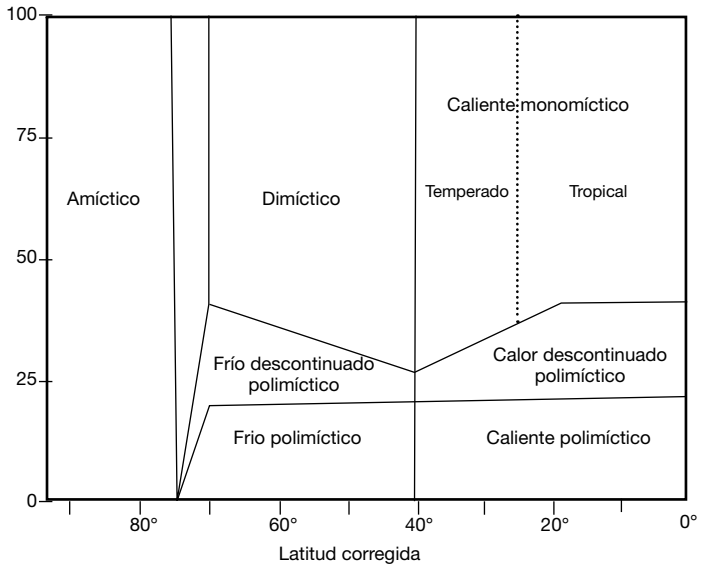


Figura 82.
Regímenes de mezcla típicos de lagos en función de la latitud y la profundidad

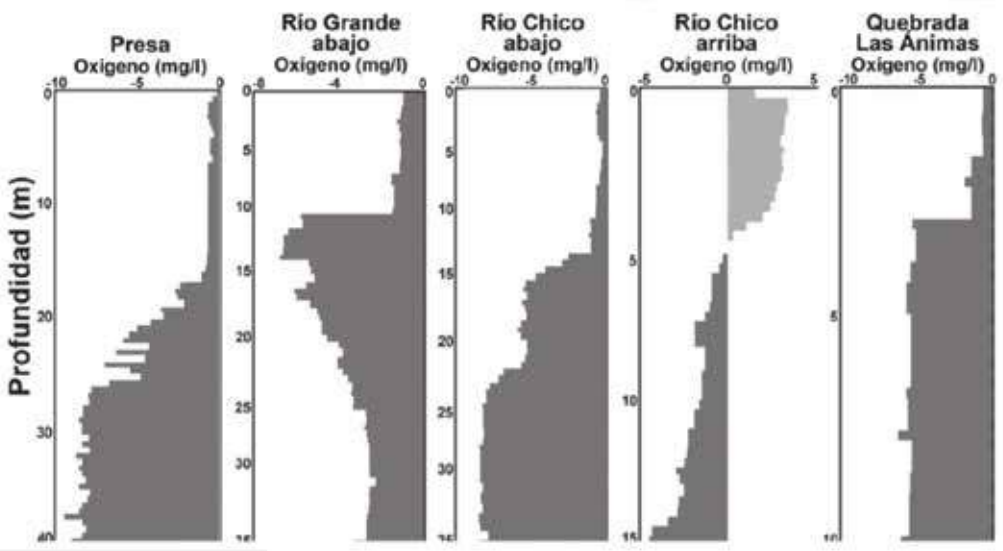


Figura 83.
Déficit de oxígeno en las capas del embalse de Riogrande II, Colombia

Hasta ahora hemos descrito los factores que influyen en la calidad del agua de los embalses. Ahora podemos analizar cómo estos factores se modifican con el cambio climático.

El cambio climático afectará las características biológicas, químicas y físicas de la calidad del agua. Por ejemplo, los aumentos en el riesgo de crecimiento de algas y floraciones de cianobacterias serán el resultado de temperaturas más altas, mayor frecuencia y duración de las olas de calor y una mayor carga de nutrientes por eventos de escorrentía extrema y reducciones en la mezcla. Figura 84 muestra la relación entre la temperatura del agua y las cianobacterias en un embalse japonés.[78] Además, el incremento en las cargas de patógenos serán el resultado de mayores

78 Umeda and Tomioka (2007) Water Quality in Reservoirs under a Climate Change

temperaturas y una mayor variabilidad en los eventos de entrada. El aumento de la turbidez será el resultado de mayores sequías e inundaciones repentinas. La frecuencia de la hipoxia ("aguas negras") puede acrecentarse como consecuencia de los cambios de temperatura, entradas y uso de la tierra. Los cambios en la carga de carbono orgánico disuelto resultarán de temperaturas más altas y mayor escorrentía. El aumento de las temperaturas intensificará las tasas de evaporación, lo que conduciría a una elevación de la salinidad. Otros factores que considerar incluyen la presencia de especies invasoras, los cambios en el uso de la tierra y un patrón diferente de los incendios forestales.[79] Las complejas interacciones de las características físicas, biológicas y químicas, tanto en el flujo de entrada como en las aguas del embalse, dificultan hacer predicciones específicas.

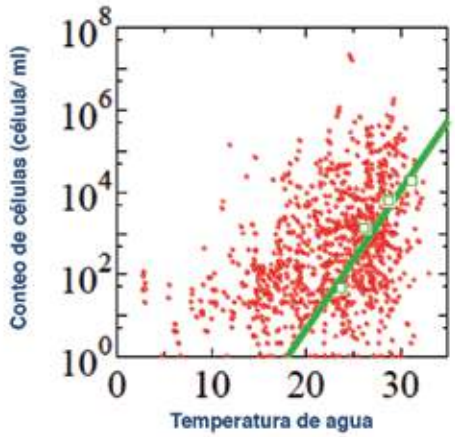


Figura 84.
Cianobacteria creciente (*Microcystis aeruginosa*) en embalses japoneses

Las floraciones de algas son el resultado de la eutrofización, la respuesta del ecosistema acuático a la adición de ciertas sustancias, como nitratos y fosfatos. La clorofila a, que se encuentra en las células de las algas y otros tipos de fitoplancton, se usa para medir los niveles tróficos. Los sistemas oligotróficos contienen niveles muy bajos de nutrientes, lo que dificulta la vida. Los sistemas mesotróficos contienen cantidades moderadas de nutrientes y pueden soportar cierta productividad. Los sistemas eutróficos son ricos en nutrientes para soportar una productividad abundante.

¿Cómo se verá afectada la eutrofización por el cambio climático? Como se indicó anteriormente, el aumento de nutrientes y las temperaturas más altas del agua causarán un incremento de las cianobacterias, que causan floraciones nocivas en los cuerpos de agua. El agua más cálida soportará mayores densidades de especies de peces que comen zooplancton, que normalmente se alimenta y controla las poblaciones de algas. El zooplancton también es muy sensible al calentamiento del agua; su capacidad para controlar las algas disminuye porque el zooplancton tiene más dificultades para alimentarse y digerir las cianobacterias en aguas cálidas. Esto refuerza el potencial de floraciones dañinas (Figura 85; Moss et al., 2011).

79 Burch et al.: WATER RF PROJECT 4468: Evaluación integral de los impactos del cambio climático en la calidad del agua de los embalses en una variedad de regiones climáticas.

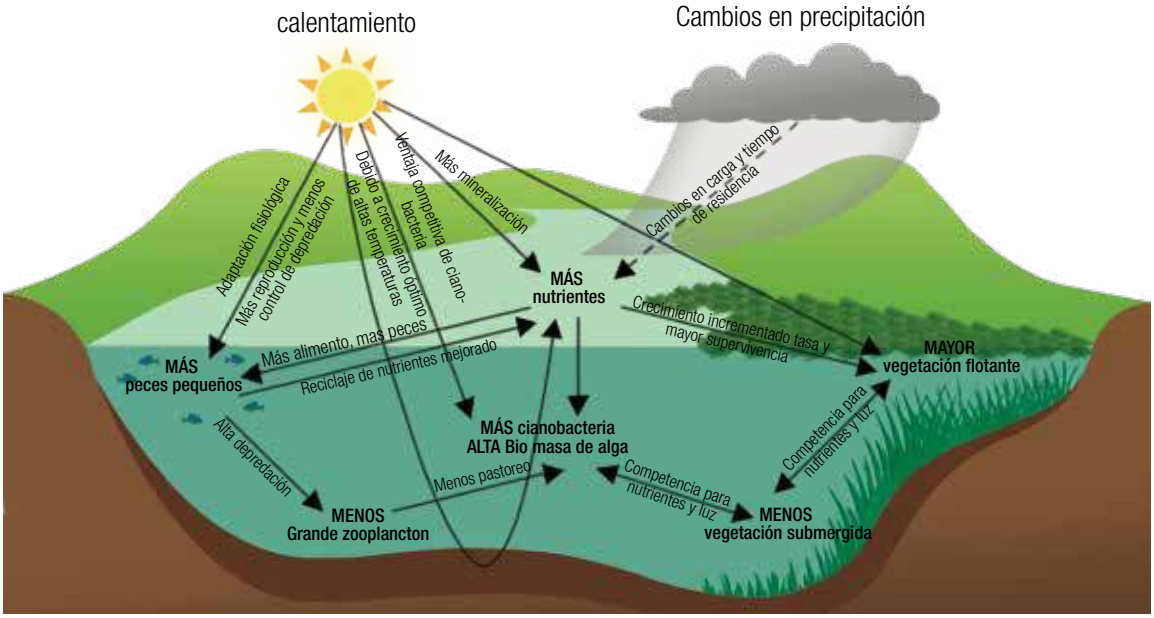


Figura 85.
Eutrofización en climas calientes

El siguiente gráfico muestra los resultados de un modelo de calidad de agua para un embalse, que predice un aumento en los niveles de clorofila como resultado del aumento de las temperaturas y la reducción de las entradas.[80]

El mismo efecto se pronostica en un estudio que examina la futura eutrofización de una muestra de embalses en Japón.[81]

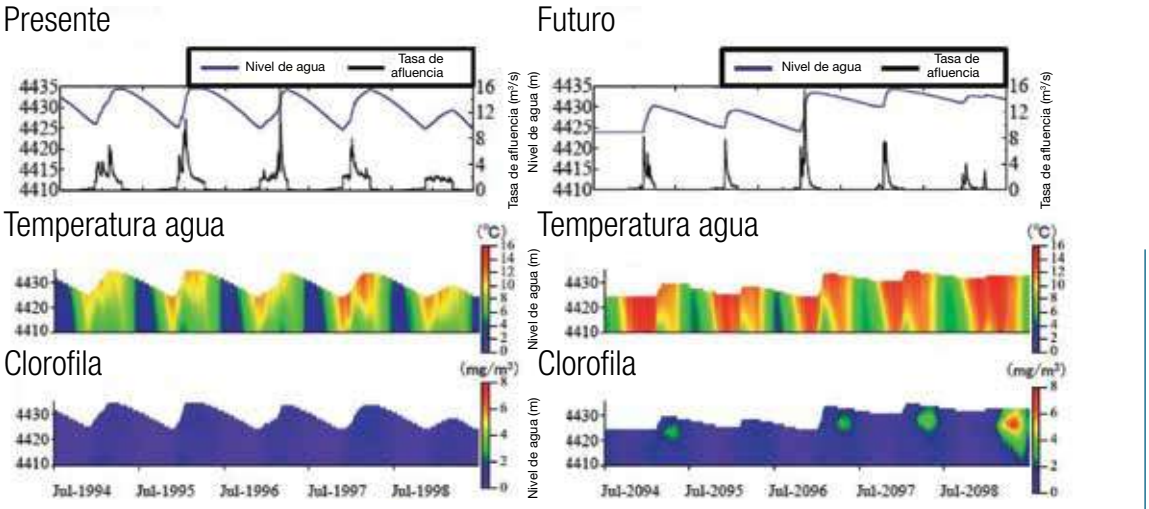


Figura 86.
Niveles de temperatura y clorofila modelados para el embalse Tuni, Bolivia

80 Umeda and Tomioka (2007)

81 Ibíd.

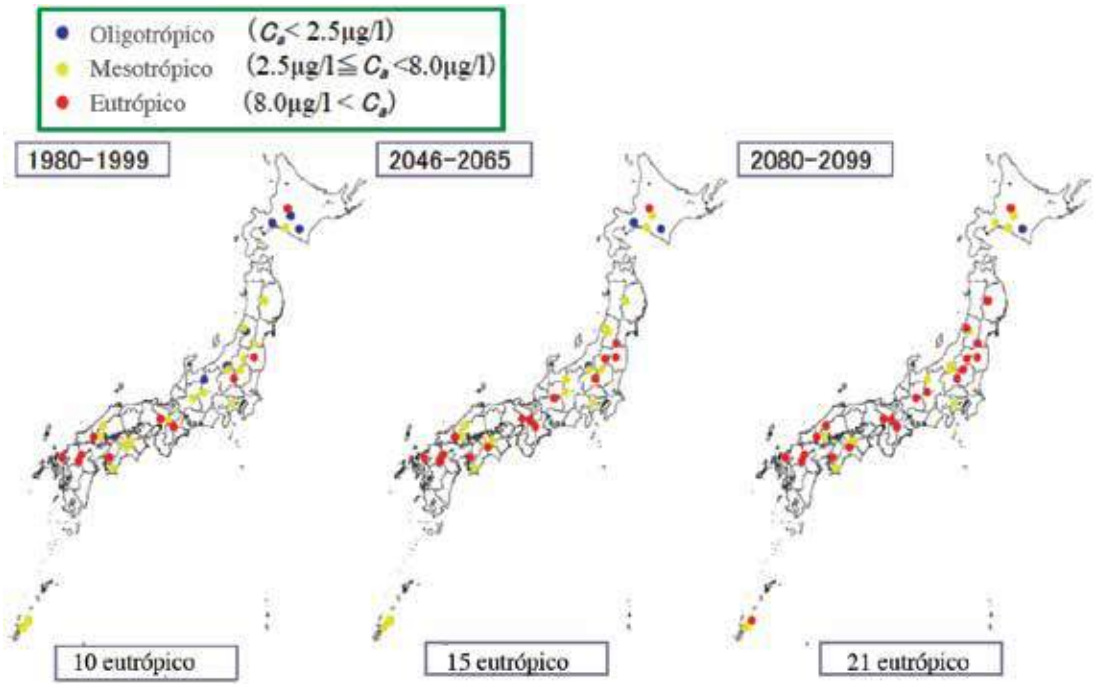


Figura 87.
Futura eutrofización de embalses en Japón

La erosión y la carga de sedimentos también se verán afectadas por el cambio climático, como en el siguiente ejemplo de Tailandia (Figura 88).[82] La pérdida de suelo es una función de la precipitación, la velocidad del viento, la frecuencia de las tormentas, las características del suelo, la cubierta vegetal y la topografía. Dada una vegetación y ecosistemas similares, se espera que las áreas con precipitaciones de alta intensidad, precipitaciones más frecuentes, más viento o más tormentas sufran más erosión.

De estos factores climáticos, la intensidad de la lluvia es el principal determinante de la erosividad.

La composición, la humedad y la compactación del suelo también son factores importantes para determinar la erosividad de la lluvia. Los suelos húmedos y saturados no podrán absorber tanta agua, lo que conducirá a niveles más altos de escorrentía superficial. De igual manera, los suelos más compactados tendrán una mayor cantidad de escorrentía superficial que los suelos menos compactados.

82 Plangoen et al. (2013) Simulating the Impact of Land Use and Climate Change on Erosion in the Mae Nam Nan sub-catchment, Thailand.

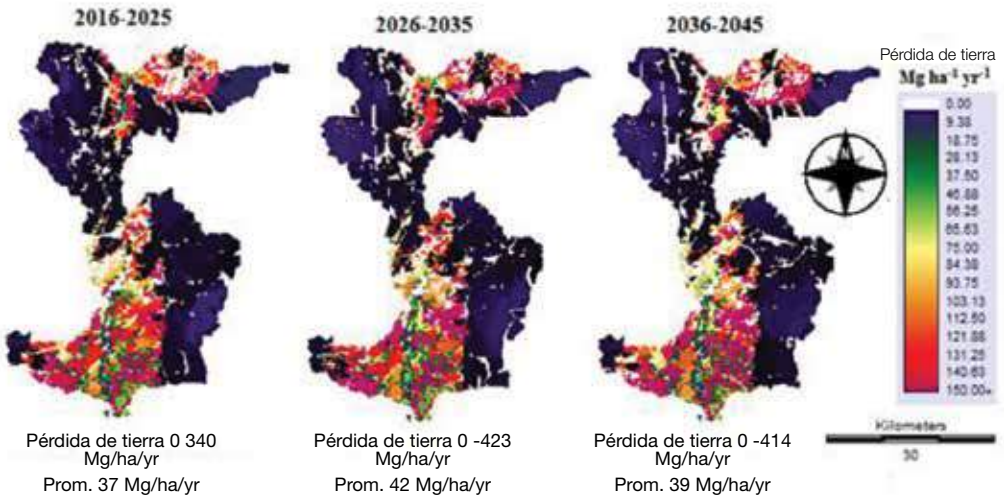


Figura 88.
Predicción de la pérdida de tierra en Tailandia de 2016-2045

La vegetación aumenta la permeabilidad del suelo a la precipitación, lo que disminuye la escorrentía. Protege el suelo de los vientos, lo que resulta en una disminución de la erosión eólica y genera cambios ventajosos en el microclima. Las raíces de las plantas unen el suelo y se entrelazan con otras raíces, formando una masa más sólida que es menos susceptible a la erosión hídrica y eólica. La eliminación de la vegetación aumenta la tasa de erosión de la superficie.

La topografía del terreno determina la velocidad a la que fluirá la escorrentía superficial, que a su vez determina su erosividad. Las pendientes más largas e inclinadas (especialmente aquellas sin cubierta vegetal adecuada) son más susceptibles a altas tasas de erosión que las pendientes más cortas y menos inclinadas. Los terrenos con mayor inclinación también son más propensos a aluviones, deslizamientos de tierra y otras formas de procesos de erosión gravitacional. Esto es un problema particular en los Andes, donde los movimientos en masa de tierra y roca a menudo interfieren con las operaciones hidroeléctricas.

Yang y colaboradores (2003) analizaron el potencial global de pérdida de suelo utilizando el modelo revisado de la ecuación universal de pérdida de suelo, junto con un modelo de sistemas de información geográfica (SIG), basado en datos sobre el uso del suelo, la cubierta vegetal y el cambio climático (duplicando de los niveles de CO_2 para 2090). Desde la década de 1900 hasta la década de 1980, las tasas de pérdida de suelo han aumentado en aproximadamente 1,5 t por hectárea por año (es decir, en ~17%). La tasa global actual de pérdida de suelo es de aproximadamente 10,2 t por hectárea por año. Yang y colaboradores proyectan que para la década de 2090, las tasas de erosión del suelo se incrementarían en un 14% adicional. Alrededor del 65% de este aumento es el resultado del cambio climático y el incremento de la erosividad, y cerca del 35% es producto del crecimiento de la población y los cambios en el uso de la tierra. Se pronostican reducciones en la pérdida de suelo para América del Norte y Europa como resultado de los cambios en el uso del suelo, y adicionalmente en América del Norte debido al cambio de clima[83]. La Figura 89 muestra cuáles regiones del mundo son más susceptibles a la erosión; los Andes pertenecen a estas regiones.

83 Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T. and Musiake, K. 2003. Global potential soil erosion with reference to land use and climate change. Hydrological Processes, Vol. 17. Chichester, UK, Wiley, pp. 2913–28.

Figura 89.
Vulnerabilidad ante la erosión hídrica[84]

Existen varias opciones de gestión de los recursos hídricos para mitigar los efectos del cambio climático en la calidad del agua de los embalses. Primero, la mejora de la calidad del flujo de entrada, mediante el manejo de fuentes puntuales y no puntuales de nutrientes, minimizará la eutrofización debido a las floraciones de algas. Los operadores pueden influir en la estratificación alterando la profundidad de los embalses y de las tomas y, por lo tanto, influir en la densidad de las corrientes. Los procesos biológicos pueden controlarse para limitar las especies invasoras. La sedimentación puede manejarse por medio del mantenimiento operativo (dragado y descarga), lo que influirá en la densidad de las corrientes y protegerá la cuenca de la erosión. Las turbinas y otros flujos de salida también pueden manipularse para manejar los procesos químicos como la oxigenación y la desgasificación.

84 http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/maps/?cid=nrcs142p2_054006

Sesión 3.4 Hidroelectricidad ante la incertidumbre

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión proporciona una visión general de las herramientas de evaluación y planificación ante el cambio climático, con el objetivo de hacer la hidroenergía más resiliente. La atención se centra en los cambios recomendados para los estudios de viabilidad del proyecto (en particular, los estudios hidrológicos y financieros), y las evaluaciones del impacto ambiental y social y la sostenibilidad. Se introducirán nuevos enfoques de planificación para hacer frente a los cambios en la hidrología. Los participantes se familiarizarán con la necesidad de modificar los instrumentos de planificación tradicionales, pero también con los límites e incertidumbres de la planificación a largo plazo.
Contenido	• ¿Cuáles son las principales herramientas para la planificación de la hidroenergía? • ¿Cómo deben adaptarse las herramientas de planificación? • ¿Cómo se aplican los diferentes enfoques de adaptación y toma de decisiones a la hidroenergía?
Aspectos clave	Todas las herramientas utilizadas tradicionalmente para la planificación hidroeléctrica pueden y deben adaptarse para incluir consideraciones sobre el cambio climático. Los términos de referencia para los estudios de viabilidad hidrológica y financiera deben evaluar la sensibilidad al cambio climático, y las EIA deben incluir un análisis de los cambios en curso (clima, población, uso de la tierra, etc.) en el área del proyecto. Se requieren enfoques de planificación que acepten las incertidumbres inevitables y aun así brinden consejos prácticos.
Temas de discusión y ejercicios	Un ejercicio grupal analizará y discutirá la capacidad de recuperación de uno o más proyectos específicos de hidroenergía, siguiendo el enfoque de la Guía IHA. Además, ¿cómo podría una EIA abordar de manera práctica el tema de los “refugios climáticos” para los peces (hábitat adecuado para los peces, que pueden moverse más arriba en la misma cuenca o en diferentes cuencas en latitudes más altas)? Si es difícil a nivel de EIA, ¿hay otras herramientas de planificación que podrían ser necesarias?
Recursos adicionales	Para dar seguimiento a la dimensión ecológica de la planificación: Documento 3.4.5 - Pittock et al. (2008) Running dry: Freshwater biodiversity, protected areas and climate change.
Lecturas clave	Documento 3.4.1 - Major (1998) Climate change and water resources: The role of risk management methods. Documento 3.4.2 - Byer and Yeomans (2007) Methods for Climate Uncertainties in EIAs. Documento 3.4.3 - Hallegatte (2009) Strategies to adapt to an uncertain climate change. Documento 3.4.4 - IHA (2019) Hydropower Sector Climate Resilience Guide.

Hasta el momento hemos visto cómo el cambio climático puede causar cambios significativos en la cantidad y calidad del agua, y también que los ingenieros en hidroenergía tienen muchas opciones de emplazamiento, diseño y operación para enfrentar dichos cambios. Sin embargo, la mayor parte de la planificación hidroeléctrica actual todavía ignora el cambio climático.

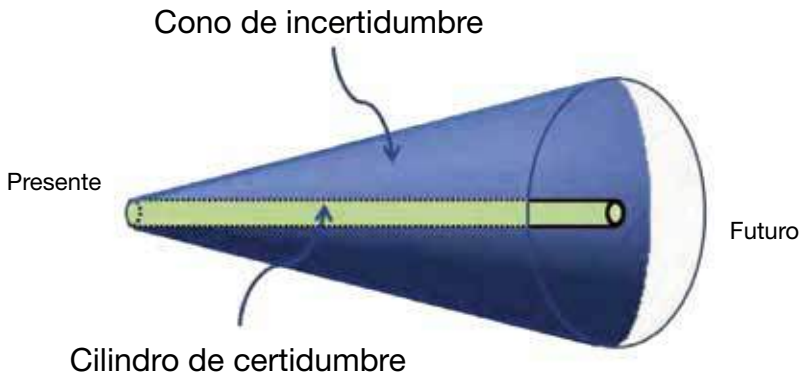


Figura 90.
Planificación para un futuro incierto

La planificación, por su propia naturaleza, trata con la incertidumbre. El futuro siempre es incierto, en particular para largos períodos de tiempo, como la vida útil de una central hidroeléctrica. Sin embargo, a menudo, los planificadores suponen que pueden operar dentro de un "cilindro de certeza" donde el rango de incertidumbre permanece igual en el tiempo. En realidad, la incertidumbre aumenta constantemente con el horizonte de tiempo de predicción, creando un "cono de incertidumbre."[85]

Hay una variedad de puntos de vista entre los planificadores con respecto a la relevancia del cambio climático y alguna resistencia para enfrentarlo. En un extremo, algunos niegan que el cambio climático está ocurriendo o que afectará a su región. Otros pueden estar de acuerdo en que está sucediendo, pero piensan que está demasiado lejos en el futuro para preocuparse ahora. Muchos proyectos hidroeléctricos solo tienen una concesión de 30 años, por ejemplo, y esperan poder entender las condiciones climáticas al menos durante ese período. De hecho, los efectos del cambio climático pueden tardar en hacerse más evidentes. Como lo expresó la Agencia Europea del Medio Ambiente, "la mayoría de los horizontes de planificación del agua terminan antes de la década de 2050, el punto en el que se espera que los cambios variables climáticos se diferencien claramente de la variabilidad climática histórica."[86] Otros planificadores dirán que siempre se han ocupado de la variabilidad y que básicamente no necesitan cambiar sus enfoques de planificación: "La gestión del agua se trata de manejar la variabilidad climática. El cambio climático y la mayor variabilidad climática solo transformarán las condiciones límite para los administradores del agua. Muchos administradores de agua consideran que tales condiciones límite cambiantes no influirán radicalmente en su enfoque básico."[87] Finalmente, hay un número cada vez mayor de planificadores que abogan por una ruptura definitiva con el pasado y que buscan nuevos enfoques: "Sin embargo, en vista de la magnitud y la ubicuidad del cambio hidro-climático que ahora está en marcha, afirmamos que la estacionariedad está muerta y ya no debería servir como una suposición esencial y única en la evaluación del riesgo de los recursos hídricos y la planificación."[88]

85 Waage, M. (2010) Nonstationarity Water Planning Methods. In: Workshop on Nonstationarity, Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management. Boulder, CO at http://www.cwi.colostate.edu/publications/is/109.pdf

86 European Environment Agency (2007) Climate change and water adaptation issues.

87 van Beek (2009) Managing Water under Current Climate Variability, author of chapter in 'Climate Change Adaptation in the Water Sector', edited by F. Ludwig, P. Kabat, H. van Schaik and M. van der Valk, Earthscan, UK.

88 Milly et al. (2008) Stationarity is dead.

Ignorar el cambio climático es insatisfactorio porque: (a) la variabilidad generada por el clima puede llegar antes y tomar formas diferentes de las esperadas, y (b) la vida útil de los proyectos a menudo será más larga que el horizonte de planificación. Los planificadores actuales tienen una responsabilidad más allá de los próximos 30 años, ya que la infraestructura del agua continuará en servicio más allá de ese tiempo. Pero a menudo no está claro cuánto deben cambiarse las "condiciones límite" o qué debe reemplazar la suposición de hidrología "estacionaria".

Esta sesión trata acerca de las ideas emergentes sobre cómo se puede tener en cuenta el cambio climático en la planificación.

Los grandes proyectos de infraestructura, como las centrales hidroeléctricas, requieren el desarrollo de una serie de documentos como pasos del proceso de planificación. Muchos de estos también pueden ser requisitos regulatorios. Tales documentos son:

Plan Maestro

- Plan de expansión de generación eléctrica
- Evaluación ambiental estratégica
- Plan de desarrollo de la cuenca
- Identificación del proyecto / estudio de prefactibilidad
- Estudio de factibilidad (a veces con múltiples subestudios, tales como estudios hidrológicos)
- Diseño detallado
- Evaluación del impacto ambiental y social
- Plan de gestión ambiental y social
- Evaluación de sostenibilidad
- Plan de construcción
- Plan de operaciones

Se debe implementar un enfoque sistemático para lograr que estos planes, estudios y análisis consideren el clima de manera consciente. Nos centraremos aquí en los estudios hidrológicos, EIA y evaluaciones de sostenibilidad.

La hidrología debe abordarse como parte de los análisis de diseño, seguridad y sensibilidad económica. Estos incluyen, como mínimo, incluso para proyectos pequeños: la CDF promedio que es la base para el cálculo de la generación anual promedio y la determinación del caudal de diseño; la CDF del año más seco registrado para el análisis de sensibilidad (para verificar si la deuda puede pagarse incluso durante las sequías); factores de corrección que consideran la calidad de la base de datos (para evaluar la sensibilidad frente a las variaciones de disponibilidad de agua y la influencia de datos faltantes o imprecisos); requisitos de caudal ambiental, y la estimación de eventos de inundación y niveles de agua (para diseñar las estructuras hidráulicas de manera segura).

Para proyectos más grandes y que tienen más recursos disponibles para planificar,[89] primero, las evaluaciones de línea de base se realizan con base en información confiable y disponible. Después, se realizan análisis de tendencias estándar para los registros hidrológicos existentes (esta es una evidencia empírica y no depende del modelado). A continuación, las proyecciones de escenarios para la región particular en cuestión deben obtenerse a partir de modelos climáticos globales (o modelos regionales, si están disponibles). Todos los datos disponibles que podrían servir como insumo para los modelos del siguiente nivel (por ejemplo, modelos de simulación hidrológica) son importantes.

Si hay suficientes datos disponibles, se pueden construir escenarios de escorrentía con modelos hidrológicos deterministas (opción 1). El foco debe estar en la cantidad (volúmenes anuales), la distribución estacional y la variabilidad como los principales productos. Se deben evaluar los posibles cambios en los requisitos de caudal ambiental.

Si no hay resultados suficientes de los modelos climáticos como insumo para los modelos hidrológicos deterministas (opción 2), y también como un enfoque alternativo para fines de control, los planificadores pueden volver al uso de modelos estadísticos.

Los resultados de las opciones 1 y 2 se pueden utilizar en modelos de simulación y se pueden aplicar

89 This approach is derived from Vattenfall Power Consultants AB (2007) Addressing Climate Change-Driven Increased Hydrological Variability in Environmental Assessments for Hydropower Projects – a Scoping Study for World Bank.

técnicas probabilísticas para evaluar los impactos de los diversos escenarios en los recursos hídricos. En estas simulaciones se deben incluir otros usos del agua, a menudo competitivos. Esto permitirá una evaluación de los impactos en la planta hidroeléctrica y las reglas de operación de los embalses y, por lo tanto, en el potencial para la generación de hidroenergía. Esto permite los análisis económicos y de riesgo. La Figura 91 muestra este enfoque por pasos, donde los resultados de un modelo sirven como insumos para el siguiente modelo. Por último, debido a la incertidumbre, se requiere un enfoque de gestión adaptativa que incluya monitoreo, evaluaciones y revisiones regulares, con un posible rediseño del programa de gestión, según sea necesario. Esto debe basarse en un conjunto confiable de indicadores.

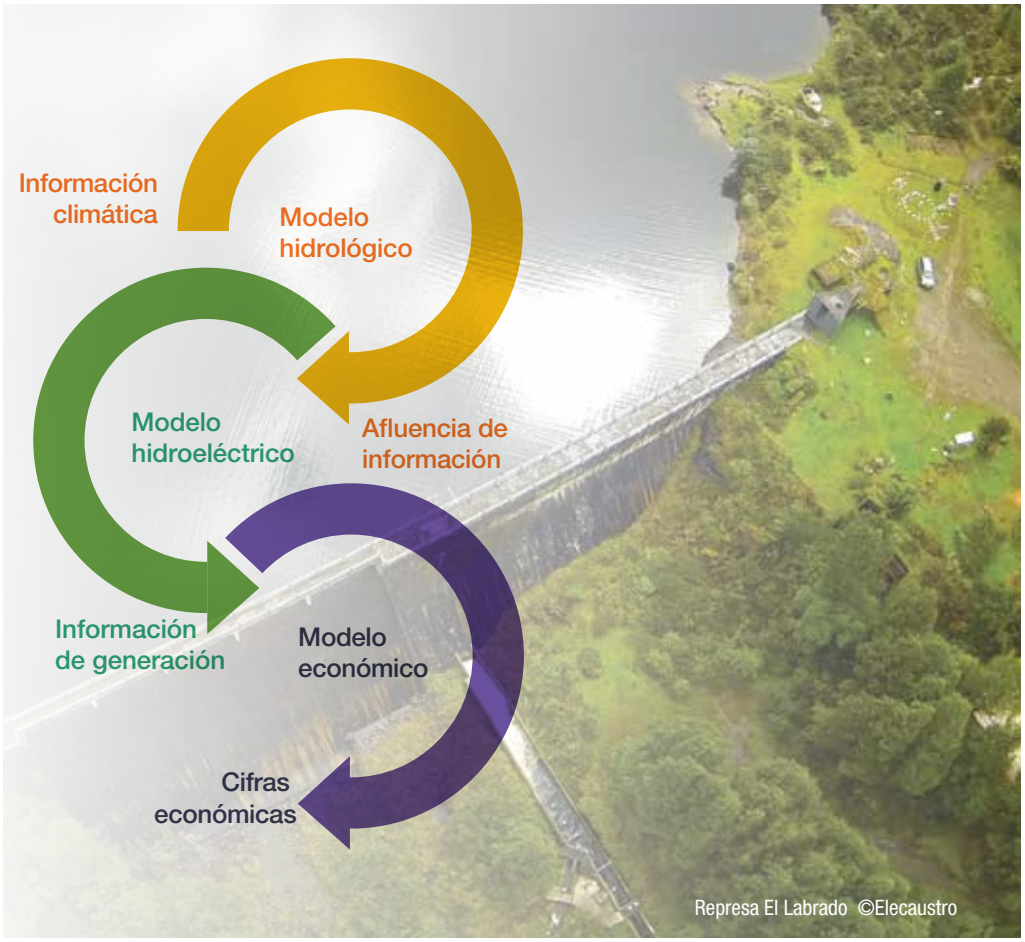


Figura 91.
Enfoque de la evaluación de sensibilidad climática (IHA 2019)

Los estudios de viabilidad incluyen cada vez más pruebas de sensibilidad al cambio climático. La forma más sencilla de hacer esto, como para el proyecto Trung Son en Vietnam.[90] es probar los impactos de aumentos o disminuciones en la generación. En este caso, la generación tendría que caer en una gran cantidad (al 36% de la generación proyectada) antes de que la tasa de rendimiento económico caiga por

90 http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2011/04/07/000356161_20110407010926/Rendered/PDF/579100PAD0P0841OFFICIAL0USE0ONLY191.pdf

debajo del 10% (la "tasa mínima") y el proyecto se vuelva económicamente inviable. Los planificadores pueden considerar la probabilidad de tal caída.

Para evaluar el impacto económico, los enfoques más sofisticados en realidad modelan las operaciones futuras de una sola planta o incluso de la totalidad de las estaciones generadoras. El siguiente ejemplo de la República Dominicana (Figura 92) muestra cuán fuertemente dependen los resultados de tales modelos del escenario climático seleccionado.

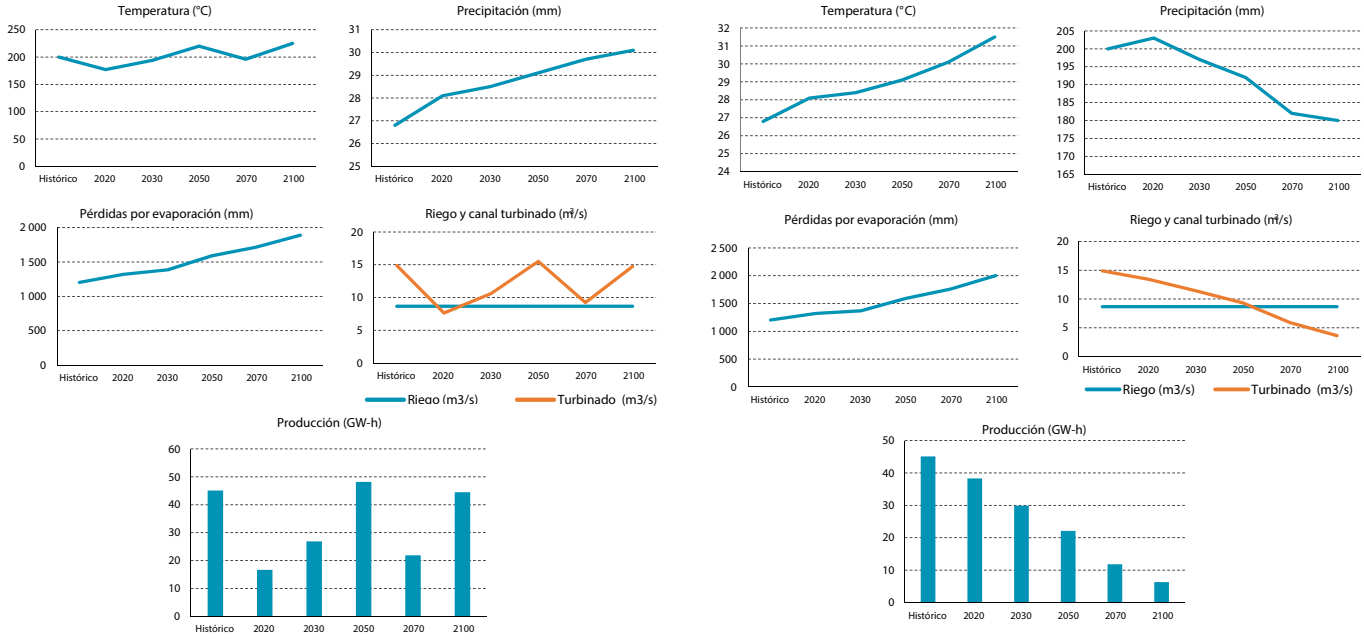


Figura 92.
Sensibilidad de la generación hidroeléctrica a la elección del escenario climático: proyecto Sabana Yegua, modelado con escenarios B2 y A2[91]

Ya se han realizado varios estudios sobre la sensibilidad al cambio climático en el sector hidroeléctrico de Ecuador. Esto incluye una variedad de estudios académicos, así como un proyecto a gran escala en cinco cuencas: Coca, Toachi Pilatón, Paute, Jubones y Zamora, bajo la guía del MEE[92] y el MAE, que utilizó un enfoque gradual similar, como se muestra en la Figura 94. Los resultados cuantitativos de ese proyecto aún no se han publicado.

Carvajal et al. (2017) emprendieron su propio estudio, independientemente del proyecto MEER-MAE, utilizando también un enfoque paso por paso similar. Sus resultados, como se muestra a continuación, sugieren que las entradas son más propensas a aumentar, pero con un amplio rango de incertidumbre.

91 CEPAL, Fondo Nórdico de Desarrollo (FND), BID, Secretaría Nacional de Energía de Panamá, y Ministerio de Energía y Minas de la República Dominicana (2017) Impactos potenciales del cambio climático en el ámbito hidroeléctrico en Panamá y la República Dominicana.

92 El antiguo Ministerio de Electricidad y Energía Renovable ex MEER por sus siglas, ahora se denomina Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables debido a una fusión entre ministerios donde se juntaron las carteras de hidrocarburos, minería y electricidad.

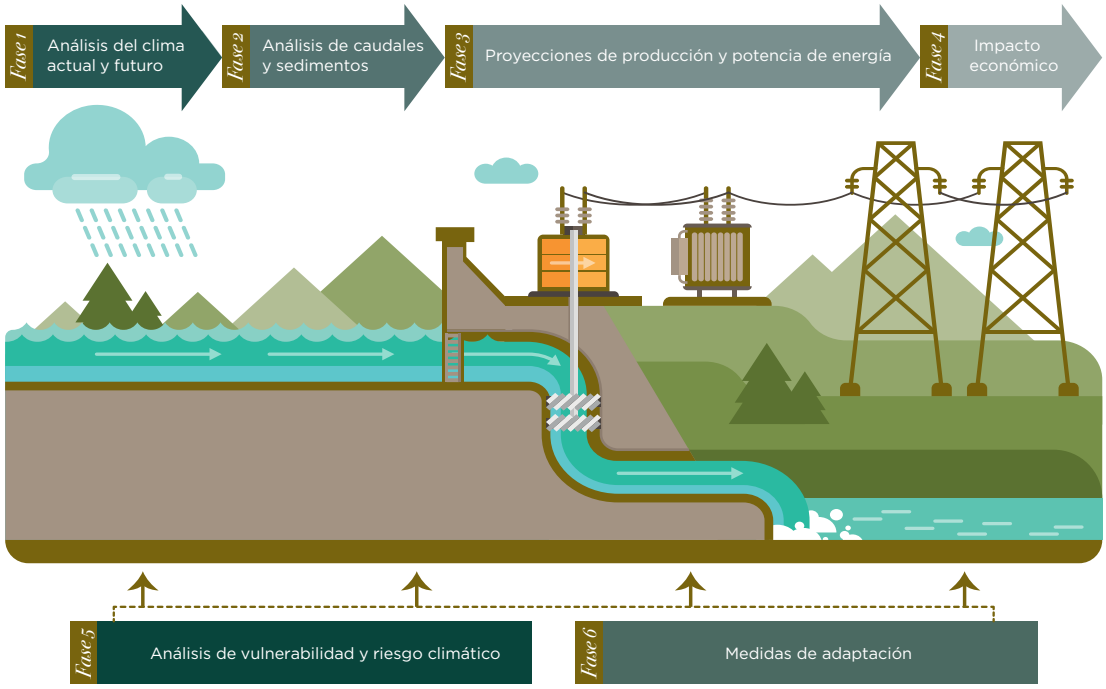


Figura 93.
Secuencias metodológicas para análisis de vulnerabilidad (MAE 2017)

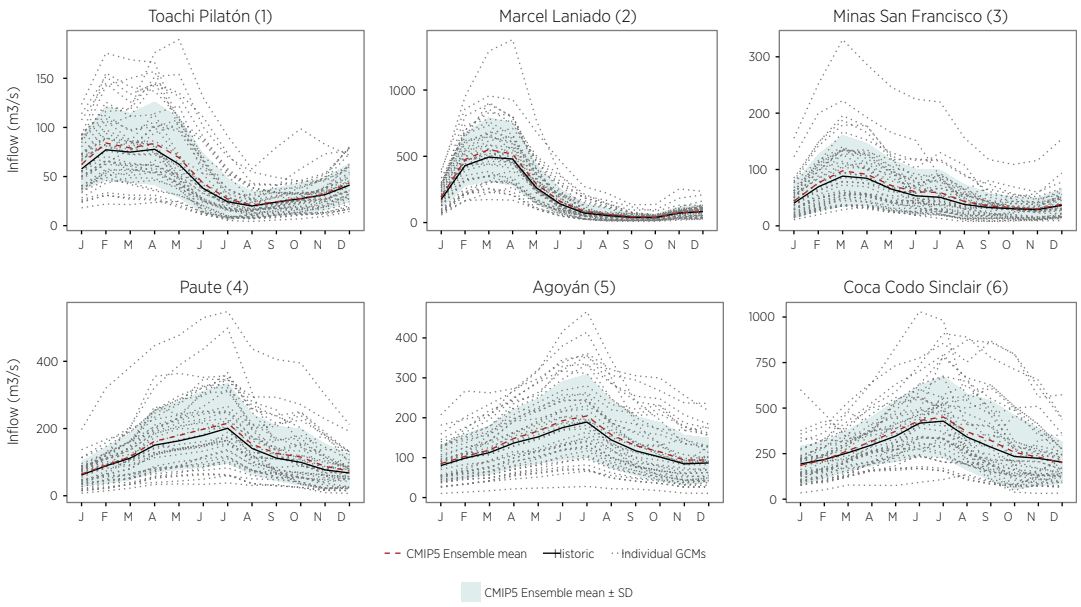


Figura 94.
Las entradas en las principales centrales hidroeléctricas de Ecuador, con la línea de base histórica y las proyecciones para 2071-2100 para cada conjunto de GCM y CMIP5 bajo el escenario RCP 4.5

En los Andes y en los países vecinos, se han realizado varios otros estudios siguiendo enfoques metodológicos similares, es decir, donde las entradas históricas en las centrales hidroeléctricas se modifican para períodos futuros por los resultados de los modelos climáticos, lo que lleva a cambios en la generación y los rendimientos económicos. Estos incluyen estudios para América Central,[93] Panamá y la República Dominicana[94] y para los Andes.[95] Todos los estudios incluyen proyecciones cuantitativas para la generación futura, así como análisis cualitativos de vulnerabilidad y / u opciones de adaptación. Las opciones de adaptación en los diferentes estudios se centran en medidas a diferentes niveles, en la planta de energía individual, en la cuenca o en todo el sistema de energía. En algunos casos, son bastante genéricos, como la "reforestación de la cuenca hidrográfica", y no se basan en una evaluación de riesgos individual específica del sitio y en una rentabilidad del análisis de costo-beneficio. En general, es probable que las prioridades de adaptación difieran sustancialmente de un lugar a otro, lo que refleja la gran variedad de proyectos hidroeléctricos y sus entornos.

En la nueva guía del IHA (2019) se proporciona un resumen de los enfoques actuales para las evaluaciones de riesgo climático o resiliencia climática para la resiliencia hidroeléctrica. La guía enfatiza en lo siguiente:

- uso sistemático de un registro de riesgos y oportunidades,
- selección de proyectos, para determinar si los impactos climáticos pueden ser lo suficientemente relevantes como para realizar una "prueba de estrés" climático cuantitativa,
- opciones más y menos completas para el análisis hidrológico, dependiendo de la disponibilidad de datos,
- manejo del riesgo climático, para adaptar el diseño y las operaciones del proyecto y hacer que sea resiliente frente al clima.
- *(Este enfoque será la base del ejercicio grupal, después de esta sesión).*

Además de los impactos en la generación, el cambio climático probablemente afecta al medio ambiente y a las condiciones sociales en el área del proyecto, por lo cual esto debe formar parte de las Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA). Los impactos del proyecto que son aceptables en el entorno actual pueden no ser aceptables en un entorno futuro, o viceversa. Por ejemplo, una especie en peligro de extinción cuyo rango está cambiando, en el futuro podría necesitar un hábitat que se esté considerando para un proyecto hidroeléctrico. Además, los impactos registrados tradicionalmente como parte de la evaluación de un proyecto pueden ser acumulativos cuando se consideran junto con los impactos del cambio climático. Por lo tanto, los efectos del cambio climático deberían incorporarse a las EIA. Las posibles formas en que esto podría lograrse incluyen:[96]

- Análisis de escenarios: elija una muestra representativa de posibles escenarios futuros e investigue los impactos en el proyecto y su entorno.
- Análisis de sensibilidad: elija un conjunto de cambios en los parámetros e investigue sus impactos en el proyecto y su entorno; en particular, si se podría cruzar algún umbral y si el proyecto o su entorno son vulnerables.
- Análisis probabilístico: identificar factores de riesgo inciertos; evaluar el rango probable y las distribuciones de probabilidad de estos factores de riesgo; simular el rendimiento del sistema con parámetros muestreados de las distribuciones de probabilidad desarrolladas para los diversos factores de riesgo, y resumir los resultados del análisis en un perfil de riesgo para el rendimiento del sistema.

Para las evaluaciones de sostenibilidad, la herramienta mejor conocida es el Protocolo de Evaluación de

93 Esquivel et al (2016) Vulnerabilidad al cambio climático de los sistemas de producción hidroeléctrica en Centroamérica y sus opciones de adaptación. Monografía del BID; 399.

94 Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Fondo Nórdico de Desarrollo (FND), Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Secretaría Nacional de Energía de Panamá, y Ministerio de Energía y Minas de la República Dominicana (2017), Impactos potenciales del cambio climático en el ámbito hidroeléctrico en Panamá y la República Dominicana.

95 http://www.olade.org/noticias/proyecto-vulnerabilidad-al-cambio-climatico-medidas-adaptacion-sistemas-hidroelectricos-paises-andinos-se-encuentra-ejecucion/. This study is still ongoing, with first published results expected for end-2019.

96 Byer & Yeomans (2007)

Sostenibilidad Hidroeléctrica (IHA 2018). En la versión más reciente del Protocolo, se introdujo un tema separado para el cambio climático, que cubre tanto los problemas de mitigación como los de adaptación.

Las "mejores prácticas" de sostenibilidad definidas por el Protocolo incluyen: una amplia comprensión de los problemas, atención a riesgos y oportunidades emergentes, monitoreo y gestión adaptativa. En el tema Mitigación y Resiliencia frente al Cambio Climático (P-24), las mejores prácticas para mitigación son aquellas en que:

- las emisiones del embalse se han estimado por medio de modelos específicos del proyecto que incorporan un amplia gama de escenarios, incertidumbres y riesgos, y se ha establecido una línea base de emisiones previas al embalse;
- se han desarrollado medidas de diseño y gestión para las fases de implementación y operación del proyecto, para responder a riesgos y oportunidades de mitigación, incluidas las emisiones de compensación; los planes de monitoreo incorporan las emisiones de GEI posteriores al confinamiento en el embalse;
- la densidad de potencia se optimiza y el proyecto contribuye a minimizar las emisiones del sistema por kWh.

En cuanto a la resiliencia:

- la evaluación de la resiliencia incorpora análisis de sensibilidad y modelos hidrológicos específicos del proyecto, utilizando modelos climáticos reconocidos;
- las medidas de resiliencia tienen en cuenta una amplia gama de riesgos e interrelaciones, y existen procesos para responder al cambio climático no anticipado y planes para proporcionar servicios de adaptación, si es necesario;
- la evaluación de la resiliencia del proyecto se ha divulgado públicamente;
- el proyecto es resiliente en una amplia gama de escenarios y contribuirá a la adaptación al cambio climático en el ámbito local, regional o nacional.
- Debido a que el cambio climático tiene muchas dimensiones diferentes, también se hace referencia a ello en varios otros temas del Protocolo, como los siguientes:
- Necesidad Demostrada y Ajuste Estratégico (P-3): aborda las necesidades de agua y energía que pueden ser fuertes impulsores del cambio climático, por ejemplo, la necesidad de tener opciones de energía bajas en carbono y la necesidad de mitigar los cambios inducidos por el clima en el suministro de agua.
- Ubicación y Diseño (P-4): considera una variedad de problemas, incluido el potencial de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Recurso Hidrológico (P-7): incluye comprender las tendencias hidrológicas y la disponibilidad de agua a largo plazo, que pueden verse influenciadas por el cambio climático. También incluye la capacidad del proyecto para anticipar y adaptarse a cualquier cambio hidrológico.
- Viabilidad Financiera (P-9): depende de la escorrentía e incluye la financiación del carbono como una opción de financiamiento.
- Planificación del Embalse (P-22): incluye una referencia a la eliminación de vegetación, que puede o no llevarse a cabo con el propósito de tratar las emisiones de GEI.

Específicamente, para el tema Gestión del recurso hidrológico (P-7), la mejor práctica requiere que:

- "se ha realizado una evaluación de la disponibilidad de recursos hidrológicos utilizando los datos disponibles, mediciones de campo, indicadores estadísticos apropiados y un modelo hidrológico; los problemas que pueden afectar la disponibilidad o la confiabilidad del agua se han identificado de manera integral; **y las incertidumbres y riesgos, incluido el cambio climático, se han evaluado exhaustivamente a corto y largo plazo**"; y
- "se ha desarrollado un plan y procesos para las operaciones de generación, para garantizar la eficiencia del uso del agua, basado en el análisis de la disponibilidad de recursos hidrológicos, una variedad de consideraciones técnicas, una comprensión de las oportunidades y limitaciones del sistema de energía, y consideraciones sociales, ambientales y económicas incluidos los regímenes de flujo aguas abajo. **La planificación de operaciones de generación tiene una perspectiva a largo plazo**; toma en consideración

múltiples usos y la gestión integrada de recursos hídricos; optimiza y maximiza completamente la eficiencia del uso del agua; y **tiene la flexibilidad de adaptarse para anticiparse y adaptarse a los cambios futuros** ".

En la práctica, para la mayoría de los proyectos hidroeléctricos, la planificación y la adaptación al cambio climático probablemente sea en gran medida una cuestión de cambio de énfasis. Los tipos de riesgos que los proyectos ya enfrentan (como sequías, inundaciones o deslizamientos de tierra) a menudo serán los mismos que en la situación actual. La principal diferencia es que pueden estar ocurriendo más a menudo o más intensamente que en un futuro hipotético sin cambio climático. En ese sentido, el cambio climático actúa como un "multiplicador de amenazas". Solo algunos riesgos (como las emisiones de los embalses) serán completamente nuevos. Lo mismo puede aplicarse a las oportunidades, algunas de las cuales pueden ser más pronunciadas que antes o modificadas de otro modo, y solo unas pocas completamente nuevas (como las ventas de créditos de carbono).

Por ejemplo, la planta de energía Hidrovictoria en la provincia de Napo, Ecuador, desde el período de construcción tuvo que lidiar con deslizamientos de tierra y desprendimientos de rocas en el área de la captación, lo cual ha interrumpido las actividades de construcción y generación. Si bien la geología inestable se conocía antes de la construcción, estas amenazas se han visto exacerbadas por precipitaciones más intensas de lo previsto, que se espera que se intensifiquen aún más con el cambio climático. Una posible respuesta de adaptación es extender el túnel de admisión y mover la entrada hacia arriba, a un área con una geología más estable.[97]

Hasta ahora, esta sesión ha revisado las herramientas disponibles para realizar las evaluaciones y la planificación y cómo estas incluyen consideraciones de cambio climático. Ahora pasamos a los diferentes enfoques o "estilos" que los planificadores pueden adoptar para guiar la toma de decisiones.

Waage (2010) ha descrito cuatro métodos estándar de planificación de recursos hídricos, que pueden incorporar el cambio climático (Figura 95).

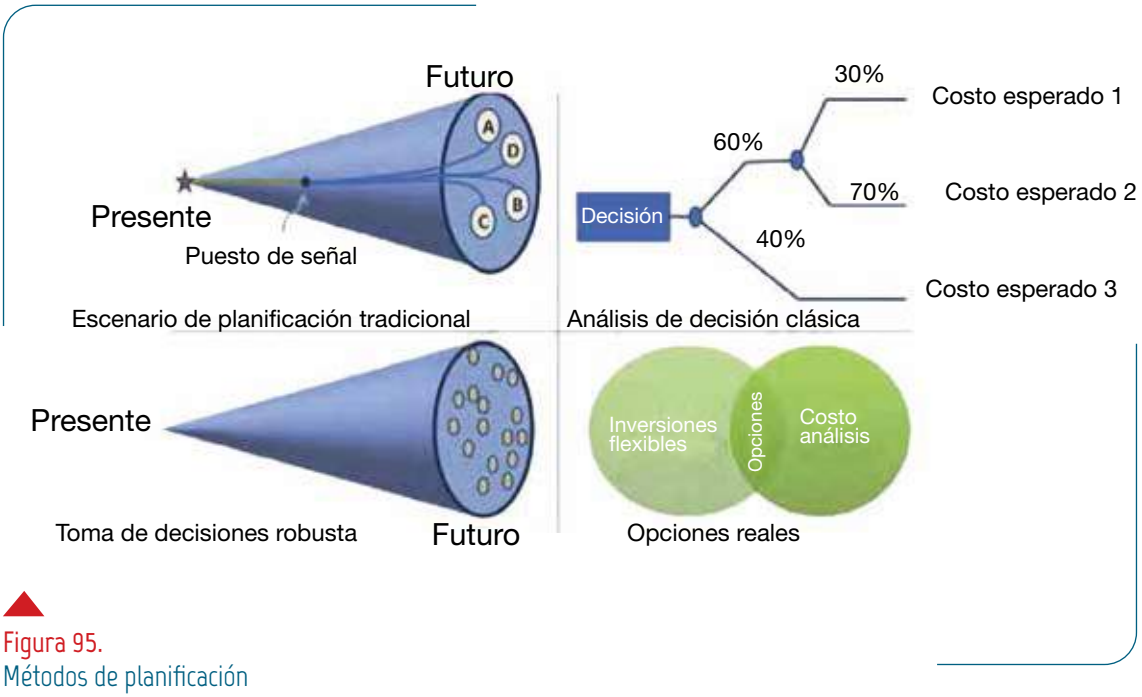


Figura 95.
Métodos de planificación

97 Personal communication from Hidrovictoria staff (2019).

La "planificación tradicional por escenarios" busca identificar acciones a corto plazo que preparen a la empresa para varios escenarios futuros diferentes y plausibles. El objetivo de este enfoque es desarrollar una gama de escenarios futuros que van más allá de la extrapolación de las tendencias actuales y representan condiciones plausibles. Típicamente, los escenarios son tratados como igualmente probables de que ocurran. Se identifican las implicaciones y necesidades futuras para cada escenario y se desarrollan estrategias de adaptación. Se pueden establecer señales para monitorear el desarrollo de los escenarios y determinar cuándo las medidas de adaptación ya no son comunes a todos o a la mayoría de los escenarios. Un beneficio de la planificación tradicional por escenarios es que los involucrados en el proceso de planificación no necesitan ponerse de acuerdo sobre un futuro único al desarrollar el plan.

El "análisis de decisiones clásico" respalda a los planificadores de servicios públicos mediante la catalogación sistemática de información y la evaluación matemática y clasificación de alternativas de decisión, frente a múltiples objetivos de decisión. El proceso se ilustra mediante árboles de decisión o diagramas de influencia. La incertidumbre se maneja mediante el uso de probabilidades. El análisis de decisión clásico se utiliza para encontrar el plan preferido con el mejor valor. Las técnicas clásicas de análisis de decisiones se han utilizado en algunas aplicaciones de planificación del agua durante muchos años. Sin embargo, al considerar la incertidumbre del cambio climático, asignar probabilidades a condiciones futuras puede ser difícil de hacer y de defender.

La "toma de decisiones robusta" utiliza procesos de modelado complejos y combina características del análisis de decisiones y de la planificación por escenarios para desarrollar estrategias preventivas de adaptación para una gran cantidad de condiciones futuras. El enfoque proporciona una forma sistemática de desarrollar una estrategia de gestión del agua para adaptarse mejor a una amplia gama de condiciones futuras posibles. La toma de decisiones robusta es particularmente útil cuando las agencias desean examinar incertidumbres a las que no se les puede asignar probabilidades fácilmente. Además, no requiere un acuerdo por parte de los tomadores de decisiones, expertos o partes interesadas sobre la probabilidad de que ocurran diferentes condiciones futuras. El método es más útil cuando hay muchas alternativas de decisión y no es posible hacer un análisis detallado de cada opción posible.

El método de "opciones reales" consisten en ayudar a los administradores del agua a identificar estrategias que se ajusten con el tiempo y equilibren los riesgos. Se buscan estrategias de inversión flexibles que puedan ajustarse al riesgo con el tiempo y diferirse en el futuro. En este método, las incertidumbres se manejan mediante el uso de probabilidades. Los resultados son flexibles, ya que pueden incorporar retrasos y el trabajo por fases de los proyectos.

Otros distinguen entre enfoques orientados a la predicción y la resiliencia. Los enfoques orientados a la predicción para la adaptación se centran en caracterizar, reducir, gestionar y comunicar la incertidumbre. Esto da como resultado herramientas y técnicas de modelado sofisticadas para describir los climas e impactos futuros. Una vez que el clima futuro se vuelve predecible, se puede diseñar una pieza de infraestructura para ello. Algunos observadores critican los enfoques orientados a la predicción porque crean una falsa sensación de certeza. Basándose en los modelos y las proyecciones climáticas, los planificadores podrían simplemente reemplazar los datos de flujo históricos con datos de flujo futuros generados por el modelo. Sin embargo, estos pueden no ser válidos para la planificación porque:

- puede existir más de un clima durante la vida útil de un proyecto,
- la escala de los modelos climáticos globales no es relevante para la decisión (es decir, las celdas en un modelo climático global son diferentes a las de un área de captación) y la reducción de la escala es imperfecta,
- las diferencias entre las proyecciones de diferentes modelos siguen siendo grandes,
- el principal impulsor de los modelos -las emisiones de GEI- todavía es difícil de predecir,
- el mecanismo científico habitual para mejorar los modelos (verificar las predicciones frente a los datos observados) no funciona bien, porque estos modelos son tan a largo plazo que las observaciones climáticas solo estarán disponibles dentro de

décadas, demasiado tarde para confirmar o rechazar los modelos que se requieren para tomar decisiones hoy.

Los enfoques de "adaptación orientada a la resiliencia" reconocen que algunas incertidumbres no pueden ser reducidas y enfatizan aprender de la experiencia. Un planificador dudaría en comprometerse con un determinado diseño y valoraría el poder cambiar el diseño en una etapa posterior. Esto puede requerir cierta preparación técnica, pero el costo que implica puede verse como el precio de la flexibilidad.

Como ejemplo, ¿cómo aplicarían estos conceptos los ingenieros de recursos hídricos en el diseño de un dique? Un enfoque orientado a la predicción calcularía un margen de seguridad de ingeniería para gestionar las incertidumbres en los procesos físicos que influirán en el nivel de un cuerpo de agua, como se puede observar en la Figura 97.

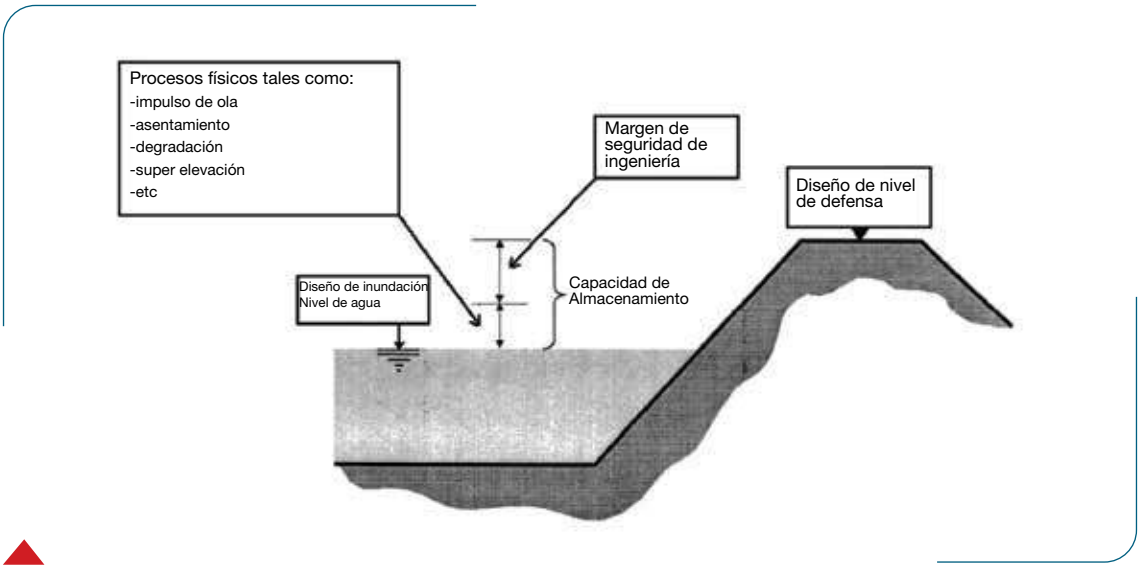


Figura 96.
Enfoque orientado a la predicción para adaptación[98]

Un enfoque orientado a la resiliencia podría tener en cuenta un margen adicional en la parte superior del diseño ingenieril para dar cuenta de cualquier escenario a largo plazo que pueda ser hipotetizado (por ejemplo, en el caso de diques costeros, un nivel del mar más alto de lo esperado). Debido a que en esta etapa se desconoce si el margen adicional es necesario, se construye una base más sólida y amplia para que el dique se pueda levantar en el futuro, y el interior del dique esté protegido de intrusiones. (Uno de los problemas que hizo a Nueva Orleans tan vulnerable a la marejada ciclónica del huracán Katrina fue que los diques no podían levantarse ya que la gente había construido sus casas demasiado cerca del dique).

Tubería de presión, central Hidroeléctrica Saymirín ©Elecaustro

98 Dessai and van der Sluijs (2007) at http://www.nusap.net/downloads/reports/ucca_scoping_study.pdf

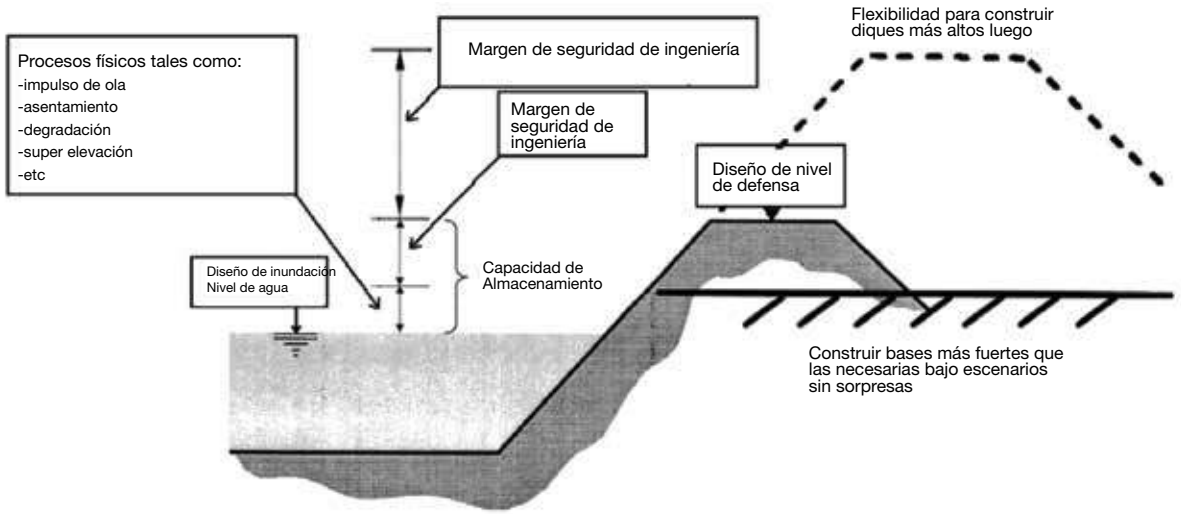


Figura 97.
Enfoque de resiliencia orientado a la adaptación[99]

Debido a las incertidumbres involucradas en la predicción, existe un amplio acuerdo en cuanto a que los planificadores deben buscar diseños robustos que puedan lidiar con una gama más amplia de condiciones climáticas. En general, los diseños más robustos son aquellos que producen buenos resultados en todas las circunstancias, son reversibles (a bajo costo), incluyen márgenes de seguridad, se basan en una combinación de instrumentos "blandos" y "duros" (por ejemplo, una nueva estrategia operativa combinada con una modificación física) o reducen los horizontes de tiempo en la toma de decisiones.

Un resumen de las recomendaciones de planificación de recursos hídricos frente al cambio climático proporcionó los siguientes ejemplos para diseñar estrategias robustas:[100]

- Interconexión de sistemas para proporcionar respaldo adicional en condiciones regionales cambiantes.
- Construcción incremental, donde sea posible y económicamente factible (por ejemplo, varios sistemas pequeños en lugar de uno grande), para permitir la adaptación a las circunstancias cambiantes.
- Elección de diseños robustos en los que el diseño elegido sea bastante bueno en una amplia gama de resultados, en lugar de ser óptimo solamente para un único resultado.
- Aplazamiento de decisiones irreversibles (o muy costosas de revertir).
- Uso de una variedad de técnicas formales de decisión, que incluyen el análisis de escenarios, análisis de sensibilidad, métodos de Monte Carlo y otros.
- Diseño para condiciones extremas. Utilizando flujos históricos o sintetizados, el planificador de recursos hídricos puede sugerir enfoques que aborden eventos extremos (inundaciones y sequías), en lugar de simplemente maximizar el valor esperado de los beneficios netos.
- Reasignación del almacenamiento. Una vez que se construyen los proyectos y cambian las circunstancias, el almacenamiento se puede

99 Ibíd.

100 Major (1998)

reasignar para mejorar el rendimiento del proyecto en condiciones climáticas cambiantes.

- Reasignación del suministro mediante el desarrollo de mercados de agua.
- Desarrollo de medidas no estructurales, como los sistemas de alerta. Los sistemas de advertencia de inundaciones y tormentas se pueden utilizar para adaptarse a los riesgos e incertidumbres de las inundaciones.
- Medidas de gestión de la demanda. Medidas como la implementación de esquemas de precios, la necesidad de dispositivos de baja demanda o la formulación de planes de contingencia durante sequías, pueden usarse para controlar la demanda y, por lo tanto, proporcionar una medida de seguridad de los suministros disponibles.
- Preservación de los ecosistemas. Como una medida de ajuste a la incertidumbre, las áreas se pueden preservar para protegerse contra los efectos inciertos del cambio climático en los ecosistemas.

Si bien estas estrategias son aplicables en algún grado a la hidroenergía, todavía hay muy poca experiencia documentada sobre su aplicación a la planificación hidroeléctrica.

Represa Chanlud ©Elecaustro

Módulo 4.
Energía hidroeléctrica y adaptación

Sesión 4.1 Adaptación a los cambios en la demanda de agua y electricidad

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión proporciona una visión general de tres cambios impulsados por el clima adicionales que se pueden esperar en el sector del agua y la electricidad, y la necesidad del sector hidroeléctrico de adaptarse a dichos cambios: aumento de la demanda de refrigeración; aumento de la evaporación de los embalses, y la creciente demanda de agua de otros sectores, como el riego. Los participantes podrán comprender las múltiples vías a través de las cuales el cambio climático afecta la hidroenergía, más allá de los cambios más obvios en la hidrología.
Contenido	Además de los cambios en la hidrología, la hidroenergía estará expuesta a otros cambios: • ¿Cuán sensible al cambio climático es la demanda de electricidad para enfriamiento? • ¿Cuán sensible al cambio climático es la evaporación de los embalses? • ¿Cuán sensible al cambio climático es la demanda de agua de otros sectores?
Aspectos clave	La demanda de todas las formas de electricidad, incluida la hidroenergía, para fines de refrigeración aumentará. La hidroenergía tiene que adaptarse no solo a los cambios de escorrentía, sino también a otros cambios en las cuencas que probablemente reducirán la disponibilidad de agua.
Temas de discusión y ejercicios	Proyecto Toshka Lakes: Discuta las opciones de gestión del agua de Egipto frente al cambio climático.
Recursos adicionales	Documento 4.1.5 - Mideksa and Kallbecken (2010) The impact of climate change on the electricity market.
Lecturas Clave	Documento 4.1.1 - Cox (2013) Cooling a warming planet. Documento 4.1.2 - Parkpoom et al. (n.d.) Climate Change Impacts on Electricity Demand in Thailand. Documento 4.1.3 – Mekonnen and Hoekstra (2012) The blue water footprint of electricity from hydropower. Documento 4.1.4 - Doell (2002) Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements.

Esta sesión analiza cómo afecta el cambio climático al sector hidroeléctrico a través de vías adicionales. En sesiones anteriores, se discutieron los efectos hidrológicos y ambientales, que tradicionalmente son el foco de atención. Los cambios comerciales (mediante políticas de mitigación) se cubrirán en la sesión 4.2. En esta sesión se discutirán otros tres impactos que son potencialmente relevantes en los países andinos:

- incrementos en la demanda de electricidad (debido a mayores requisitos de enfriamiento),
- incrementos en la evaporación de los embalses, que pueden hacer que estos sean menos atractivos, y
- incrementos en la demanda de agua (especialmente para riego), que pueden reducir la disponibilidad de agua para la hidroenergía.

La demanda de electricidad está aumentando por muchas razones, y se espera que crezca rápidamente (en un 3,5% anual) en la región de América Latina y el Caribe. Una parte del crecimiento de la demanda podría depender directamente del aumento de las temperaturas. El grado en que la demanda de electricidad en un país determinado es sensible a los cambios climáticos depende de su tipo de clima, su matriz energética y su nivel de desarrollo económico. El impacto en la demanda de electricidad también depende de la combinación de recursos utilizados para calefacción y refrigeración. Los sistemas de enfriamiento como el aire acondicionado requieren más energía que una cantidad similar de calefacción. Existen otras opciones de calefacción, como la leña y el gas, mientras que la refrigeración solo puede funcionar con electricidad.

La demanda de electricidad tiene una elasticidad significativa ante los cambios de temperatura. Esto cambios impactarán de manera diferente en la demanda de electricidad según la ubicación y el clima local. Un clima más cálido en latitudes altas tenderá a reducir la demanda de calefacción (efecto de calentamiento) mientras que un clima más cálido en latitudes más bajas aumentará las cargas de enfriamiento (efecto de enfriamiento). Esto significa que el cambio climático aumentará la demanda de electricidad, pero el uso total de energía podría disminuir. Se estima que para el año 2100 los beneficios del cambio climático en el sector energético (calefacción reducida) ascenderán al 0,75% del PIB a nivel mundial, mientras que las desventajas (mayor enfriamiento) ascenderían aproximadamente un 0,45%.[101]

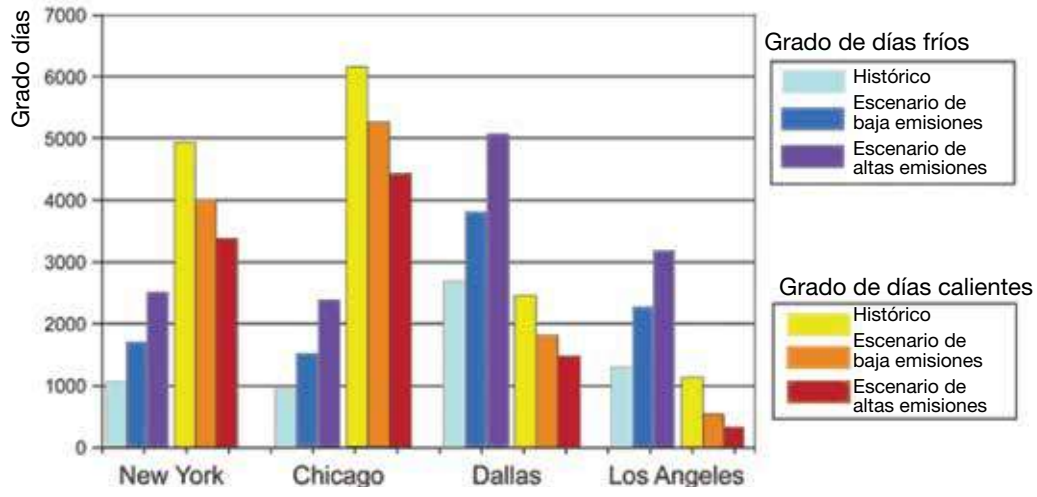


Figura 98.
Sensibilidad de la demanda de energía al cambio climático. Ciudades de Estados Unidos

Como ejemplo de estos efectos, la Figura 98 muestra cómo el cambio climático afectará la necesidad de calefacción o refrigeración en cuatro ciudades con diferentes climas en los Estados Unidos.[102] Un día-grado se refiere a la suma de la cantidad de grados en que la temperatura promedio del día es más caliente o más fría que la temperatura base (~18-22 °C, es decir, donde no se requiere calefacción o enfriamiento).

Por ejemplo, históricamente, Nueva York tiene casi 5.000 grados-días/año de calefacción, donde se necesitaban fuentes de calefacción porque la temperatura estaba por debajo de la temperatura base. En el escenario de cambio climático más severo, el número de grados por día de calentamiento disminuirá a ~3.200. Históricamente, Nueva York experimentó ~1.000 grados-días de enfriamiento, donde se requerían fuentes de enfriamiento porque

101 Mideksa & Kallbecken (2010) Impact of climate change on the electricity market.

102 United States Global Change Research Program. https://archive.epa.gov/epa/climate-impacts/climate-impacts-energy.html#Supply%20and%20demand

la temperatura estaba por encima de la temperatura base. Bajo el escenario de cambio climático más severo, el número de grados-días de enfriamiento será más del doble, pudiendo llegar a ~2.500.

A medida que cambian las temperaturas, los consumidores ajustarán su comportamiento con respecto a la demanda de electricidad. La Tabla 17 muestra el impacto de un aumento del 1% en la temperatura sobre la demanda de electricidad, bajo diferentes condiciones.[103]

	Países de clima cálido %	**Países de clima frio %**
Verano	1,17	- 0,21
Invierno	0,10	- 0,07

Tabla 17. Elasticidad de la demanda de electricidad frente a los cambios de temperatura

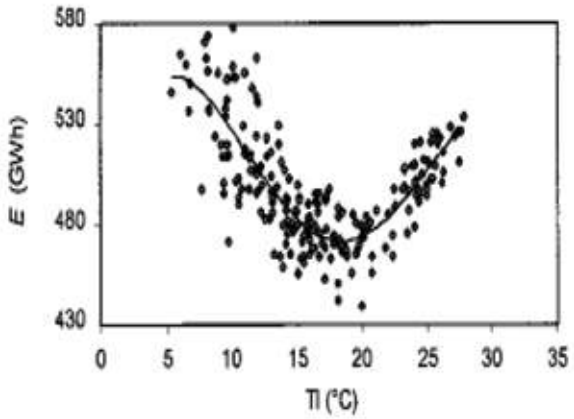


Figura 99.
Elasticidad de la demanda de electricidad frente a la temperatura (España)

La Figura 99 muestra gráficamente un ejemplo de esta relación entre la demanda de electricidad (GWh) y un índice de temperatura (°C), durante la semana en 1998 en España.[104] Las pendientes de las curvas a la izquierda y a la derecha de la temperatura base (~ 19 °C) indican la elasticidad.

A corto plazo, los consumidores trabajarán con su ***stock*** de capital existente y querrán mantener las temperaturas a las que están acostumbradas. A largo plazo, pueden adaptar su sensibilidad a la temperatura y pueden comprar nuevos equipos de calefacción o refrigeración. Por lo tanto, se espera que la elasticidad a largo plazo sea menor.

Estos principios se pueden aplicar a los cambios a corto y largo plazo en la demanda de electricidad en diferentes países, por ejemplo en Tailandia. A través del análisis cuantitativo, se demostró que un aumento de temperatura de 4 °C aumenta la demanda en 1.400 MW (una cantidad equivalente a 2,6% /°C en la demanda máxima del sistema). Esto se derivó de una fuerte correlación entre la demanda y la temperatura (Figura 100). En el mediano plazo (aproximadamente más de una semana), la demanda de electricidad depende más de la hora del día y de los días de entre semana en comparación con los días de fin de semana. En cambio, a largo plazo depende de múltiples factores, incluida una buena correlación entre la demanda y el crecimiento del PIB. Por ejemplo, en Tailandia el crecimiento del PIB y la demanda de energía durante el período comprendido entre 1994 y 2004 tuvo un coeficiente de correlación de 0,77.[105] Por lo tanto, los pronósticos del incremento futuro de la demanda de electricidad deben tener en cuenta tanto el crecimiento económico como el cambio climático.

103 Mideksa & Kallbecken (2010)

104 Valor et al. (2001) Daily Air Temperature and Electricity Load in Spain.

105 Parkpoom et al. (n.d.) Climate change impacts on electricity demand.

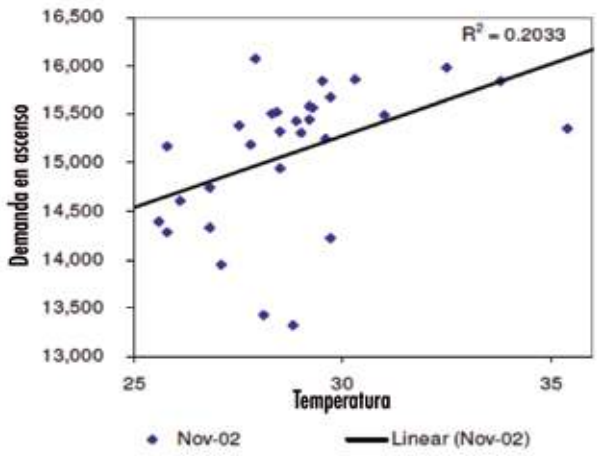


Figura 100.
Tailandia: demanda máxima de electricidad versus temperatura (a corto plazo)

El aumento de la evapotranspiración (ET) es otro efecto del cambio climático que afectará el desarrollo de la hidroenergía. Se compone de "evaporación" (un proceso físico por el cual el agua a cielo abierto se convierte en vapor) y la "transpiración" (un proceso biológico por el cual el agua almacenada en las plantas se convierte en vapor). La evapotranspiración potencial (ETP) es la ET esperada si la disponibilidad de agua no fuera un factor limitante. La evapotranspiración real (ETR) es la cantidad de agua que realmente se pierde. La proporción de ET a ETP es baja en áreas áridas debido a las limitaciones de agua, mientras que la ET es aproximadamente equivalente a la ETP en áreas húmedas (Tabla 18).[106]

Cantidad anual (mm/a)	Tropical húmedo (Singapur)	Árido (Iraq)	Temperatura húmeda (Holanda)
Precipitación	2.500	150	750
Evaporación de agua a cielo abierto	1.500	2.250	650
ET potencial	1.400	1.800	525
ET real	1.200	100	450

Tabla 18. Precipitación, evaporación y evapotranspiración para varios climas

La evaporación afecta a toda la cuenca hidrográfica por encima de una estación hidroeléctrica, pero aquí nos centraremos en la evaporación del embalse.

La evaporación del embalse es una función de los controles climáticos en la tasa de evaporación (es decir, radiación neta, humedad, velocidad del viento y temperatura), así como de la cantidad de calor almacenado en el embalse. También es importante en algunos embalses la estabilidad de la columna de aire y, por lo tanto, el transporte ascendente del vapor de agua, que se ve afectado por la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie del agua.

106 https://www.scribd.com/document/272165409/Hydrology-LN0262-09-1. Vea también Arnell and Hulme (2000) Implications of climate change for large dams and their management. Working paper prepared for the World Commision on Dams Secretariat.

La evaporación total de las superficies de los embalses es muy grande, en el mismo orden de magnitud que toda la extracción de agua para fines industriales y domésticos.

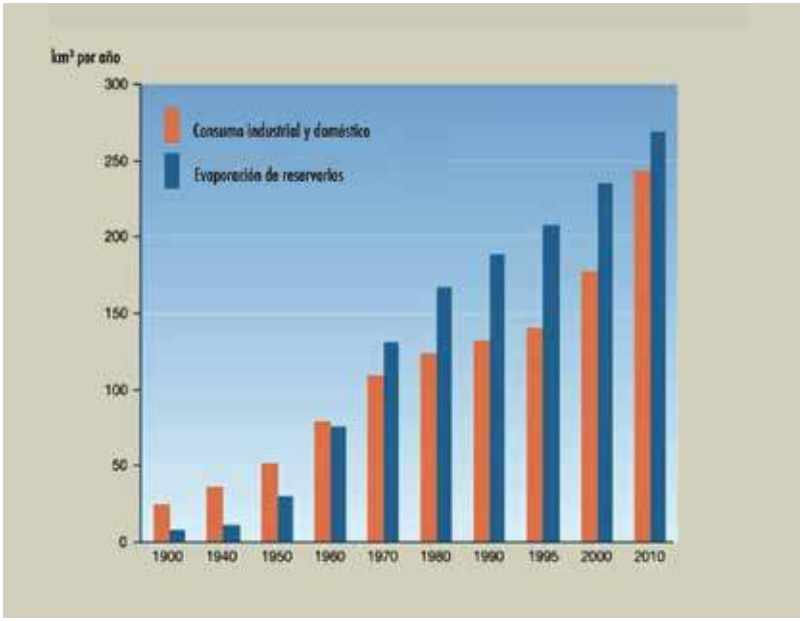


Figura 101.
Evaporación de embalses a escala mundial, comparada con el consumo industrial y doméstico de agua

En otros estudios se han alcanzado estimaciones similares, de una evaporación total de la superficie de los embalses de 346 km³/año, lo que demuestra que los embalses latinoamericanos pierden la segunda mayor cantidad de agua, después de los del este y sur de Asia.[107]

Muy pocos estudios han considerado las implicaciones del cambio climático para la evaporación de lagos y embalses. La falta de tales estudios significa que, en la actualidad, los efectos generalmente solo se estiman de manera muy aproximada. Por ejemplo, la Autoridad del Río Zambeze (Zambezi River Authority, ZRA) estableció que la evaporación de los embalses hidroeléctricos es, con mucho, el mayor uso de agua en la cuenca (16,5% de la escorrentía), pero en las proyecciones para 2025, el ZRA solo incluyó áreas de superficie de embalses adicionales, pero no mayores tasas de evaporación por m². Tampoco se consideraron los cambios en la escorrentía (Tabla 19).[108]

107 http://www.fao.org/3/a-bc814e.pdf

108 SADC-WD/ Zambezi River Authority; SIDA/ DANIDA, Norwegian Embassy Lusaka (2008) Integrated Water Resources Management Strategy and Implementation Plan for the Zambezi River Basin

	M³	%
Flujo de agua disponible	103,224	100
Consumo doméstico rural	24	0.02
Consumo doméstico urbano	175	0.17
Consumo industrial	25	0.02
Minería	120	0.12
Descargas ambientales / inundaciones	1,202	1.16
Agricultura por irrigación	1,478	1,43
Ganado	113	0.11
Hidroenergía (evaporación)	16,969	16.46
Total de uso consuntivo del agua	20,126	19.49

	M³	%
Flujo de agua disponible	103,224	100
Demanda de agua		
Consumo doméstico rural	43	0.04
Consumo doméstico urbano	676	0.65
Consumo industrial	55	0.08
Minería	408	0.40
Descargas ambientales/inundación	6,445	6.24
Agricultura por irrigación (2005)	1,477	1.43
Adicional bajo un escenario parcial (50%)	2,217	2.15
Adicional bajo un escenario total (100%)	4,635	4.49
Ganado	167	0.16
Hidroenergía	16,989	16.46
Adicional bajo un escenario moderado	175	0.17
Adicional bajo un escenario mediano	1,365	1.32
Adicional bajo un escenario a gran escala	7,609	7.37
Total (escenario de alto desempeño)	38,534	37.32

Tabla 19. Uso actual (izquierda) y futuro (2025; derecha) del agua en la cuenca del río Zambeze

Lo siguiente puede considerarse como posibles efectos del cambio climático en los embalses:[109]

- Las tasas de evaporación estarán más influenciadas por los cambios en la velocidad del viento y el almacenamiento de calor del lago, que es una función del cambio de temperatura durante todo el año.
- El cambio climático puede afectar la estabilidad del aire sobre grandes embalses al cambiar el diferencial entre las temperaturas del aire y del agua. Esto afectaría las tasas de evaporación, dependiendo del cambio relativo en las temperaturas.
- La evaporación en embalses pequeños será sensible a los cambios en la presión de vapor. El déficit de presión de vapor no es una limitación para la evaporación en grandes embalses porque el aire que pasa estos se saturará por la evaporación de la superficie del agua.
- En latitudes altas, los cambios en la capa de hielo del lago pueden alterar las tasas de evaporación.

Más recientemente, el concepto de "huella hídrica" se ha utilizado en un esfuerzo por comprender los impactos en el agua generados por diferentes procesos industriales y agrícolas. Las evaluaciones de los volúmenes de agua consumida y contaminada pueden formar parte de los esfuerzos de planificación para proyectos industriales.

El impacto más significativo de la huella hídrica de la hidroenergía se produce durante la fase de almacenamiento, debido a la evaporación. Las discusiones metodológicas sobre el cálculo de la evaporación están en curso. A menudo, los efectos de la evaporación total o bruta se incluyen en las evaluaciones de la huella hídrica. Un mejor enfoque sería incluir la evaporación neta, que es la diferencia de evaporación en contrate con una condición de referencia natural. En otras palabras, cuál habría sido la evaporación de la tierra si la presa no se hubiera construido. Con la evaporación neta, también debe tenerse en cuenta la captación de lluvia, que de otro modo no se habría captado. Además, cuando un embalse cumple múltiples funciones, las pérdidas por evaporación no solo deben atribuirse a la generación de hidroelectricidad.

109 Uhlenbrook. https://ocw.tudelft.nl/courses/hydrology-of-catchments-rivers-and-deltas/

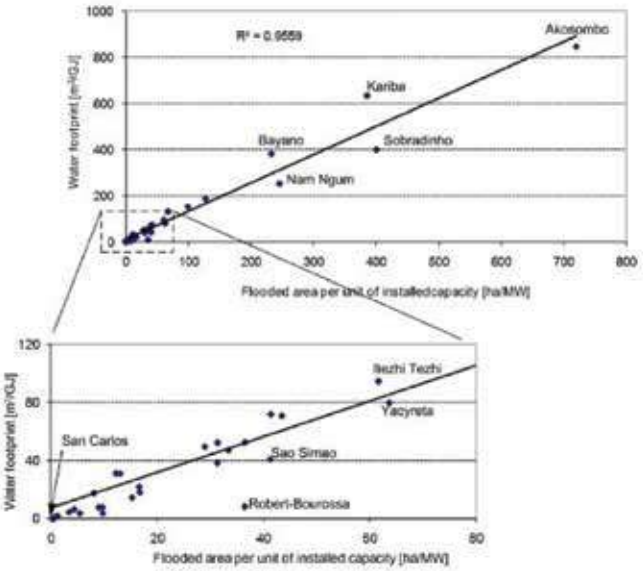


Figura 102.
Huella hídrica en relación con el área inundada en una muestra de embalses

Los resultados de una evaluación de la huella hídrica para la hidroenergía dependen profundamente de qué enfoques se utilizan. El estudio de Mekonnen y Hoekstra (2012) calcula la huella hídrica azul de la hidroelectricidad a partir de un estudio de 35 represas (Figura 102). Su método utiliza la evaporación bruta en oposición a la evaporación neta, y atribuye todas las pérdidas por evaporación a la generación de hidroenergía. Según ellos, la superficie del embalse en relación con la capacidad instalada es el principal factor determinante de la dimensión de la huella hídrica.

En 2011, Manitoba Hydro completó una evaluación de su huella hídrica que utilizó la evaporación neta en lugar de la evaporación bruta.[110] En este estudio, debido al clima frío y las altas precipitaciones, el embalse en realidad resultó en una ganancia neta de agua porque captó más lluvia de la que se evaporó del embalse. Un estudio de caso en Nueva Zelanda también utilizó un enfoque neto en lugar de un enfoque bruto. El estudio demostró que comparar la evaporación con la evapotranspiración que habría ocurrido si la presa no se hubiera construido tiene profundas consecuencias en el tamaño de la huella hídrica.[111] Pegram et al. (2011) afirman que la pérdida por evaporación neta es la medida adecuada para reflejar el impacto del uso del agua en los recursos hídricos locales. Se debe tener precaución al comparar los resultados de las evaluaciones de la huella hídrica, ya que los diferentes enfoques pueden dar lugar a errores de comparación.[112]

Los efectos del cambio climático en la agricultura, el mayor usuario de agua en la mayoría de los países, se considerarán como la tercera categoría de impacto en la hidroenergía. El grado de este efecto depende en gran medida de la cantidad y el momento de la precipitación que abastece de agua a la agricultura de secano y de los suministros de agua utilizados en la agricultura de regadío. Demasiada precipitación causará erosión del suelo y daños directos a los cultivos,

110 Adams (2011)

111 Herath et al. (2011)

112 Hastings and Pegram (2012)

mientras que muy poca precipitación también los dañará directamente. El deshielo temprano puede causar escasez de agua durante la temporada de crecimiento de verano. Además, existen fuertes diferencias espaciales y sociales. Los menos capaces de hacer frente a estos fenómenos (es decir, los pequeños agricultores en áreas marginales) se verán afectados de manera más significativa. El cambio climático puede tener efectos adicionales, como la fertilización de las plantas a través de mayores concentraciones de CO_2 y temporadas de crecimiento más largas.

América del Sur tiene hoy demandas de riego de mediana escala, en comparación con otras regiones (Figura 103 y Tabla 20). La Figura 104 muestra áreas potenciales de irrigación en Ecuador, donde el 81% del agua extraída es utilizada para la agricultura.

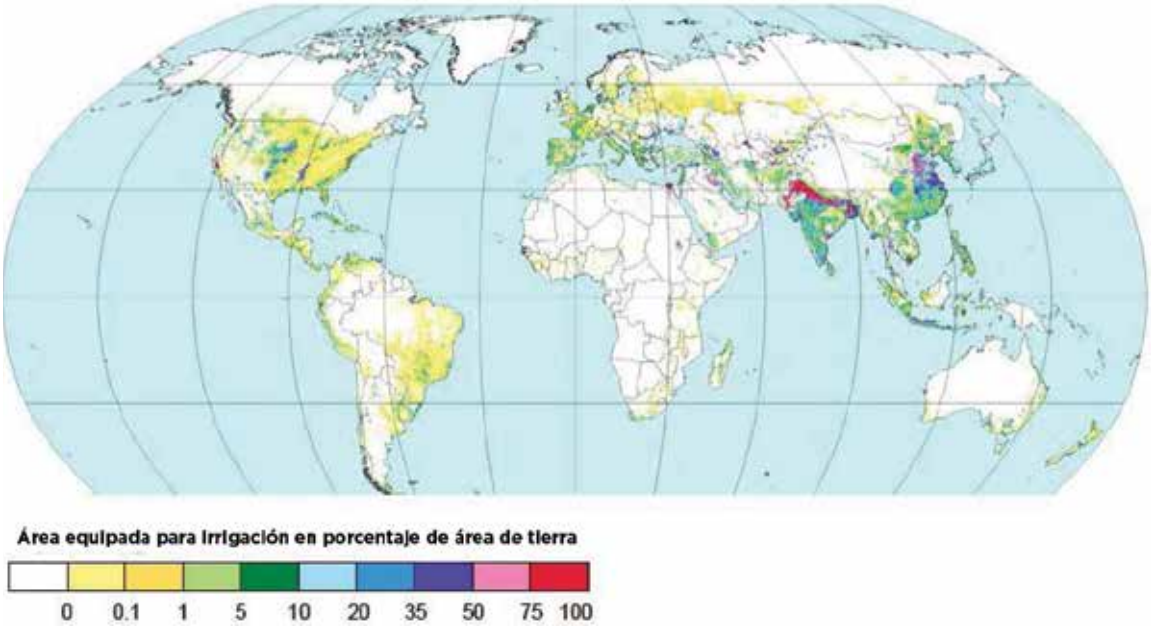


Figura 103.
Mapa de tierras irrigadas[113]

113 Siebert et al. (2013) Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas to Version 5.

	ÁREA Irrigada en 1995: 1000 km²	Intensidad de cosecha	Promedio a largo plazo 1 Rnet, km³/año				
			Línea de base	2020 s		2070	
				ECHAM 4	HadCM3	ECHAM 4	HadCM3
Canadá	7.1	1.0	2.4	2.9	2.7	3.3	2.9
Estados Unidos	235.6	1.0	112.0	120.6	117.9	123.0	117.9
América Central	80.2	1.0	17.5	17.0	17.6	18.1	19.7
América del Sur	98.3	1.0	26.6	27.1	27.5	28.2	29.1
África del Norte	59.4	1.5	66.4	62.7	65.3	56.0	57.7
África Occidental	8.3	1.0	2.5	2.2	2.4	2.4	2.6
África Oriental	35.8	1.0	12.3	13.1	12.2	14.5	14.3
Sur de África	18.6	1.0	7.1	7.0	7.4	6.4	7.2
OCDE Europa	118.0	1.0	52.4	55.8	55.2	56.5	57.8
Europa del Este	49.4	1.0	16.7	18.4	19.0	19.7	22.1
Ex Unión Soviética	218.7	0.8	104.6	106.6	112.1	104.4	108.7
Medio Oriente	185.3	1.0	144.7	138.7	142.4	126.5	137.8
Sur de Asia	734.6	1.3	366.4	389.8	400.4	410.7	422.0
Este de Asia	492.5	1.5	123.8	126.0	126.6	131.3	127.1
Sudeste de Asia	154.4	1.2	17.1	20.3	18.8	30.4	28.6
Oceanía	26.1	1.5	17.7	17.8	17.6	18.2	19.7
Japón	27.0	1.5	1.3	1.3	1.8	1.4	1.5
Mundo	2549.1		1091.5	1127.5	1147.0	1151.0	1176.8

Áreas irrigadas en 1995, según observación clima promedio en 1961-1990 (línea de base) y escalados con escenarios de cambio climático ECHAM4/OPYC3 o HadCM3 de 2020-2029 (2020) y 2070-2079 (2070)

Tabla 20. Impacto del cambio climático en requerimientos mundiales de riego[114]

Existe un debate científico en curso sobre los requisitos de agua de riego, con una incertidumbre significativa, por ejemplo, sobre los efectos de la fertilización con CO_2 en la productividad de los cultivos.

Los efectos difieren según el cultivo y la presencia de otras limitaciones, como la disponibilidad de agua y la temperatura.

114 Doell (2002)

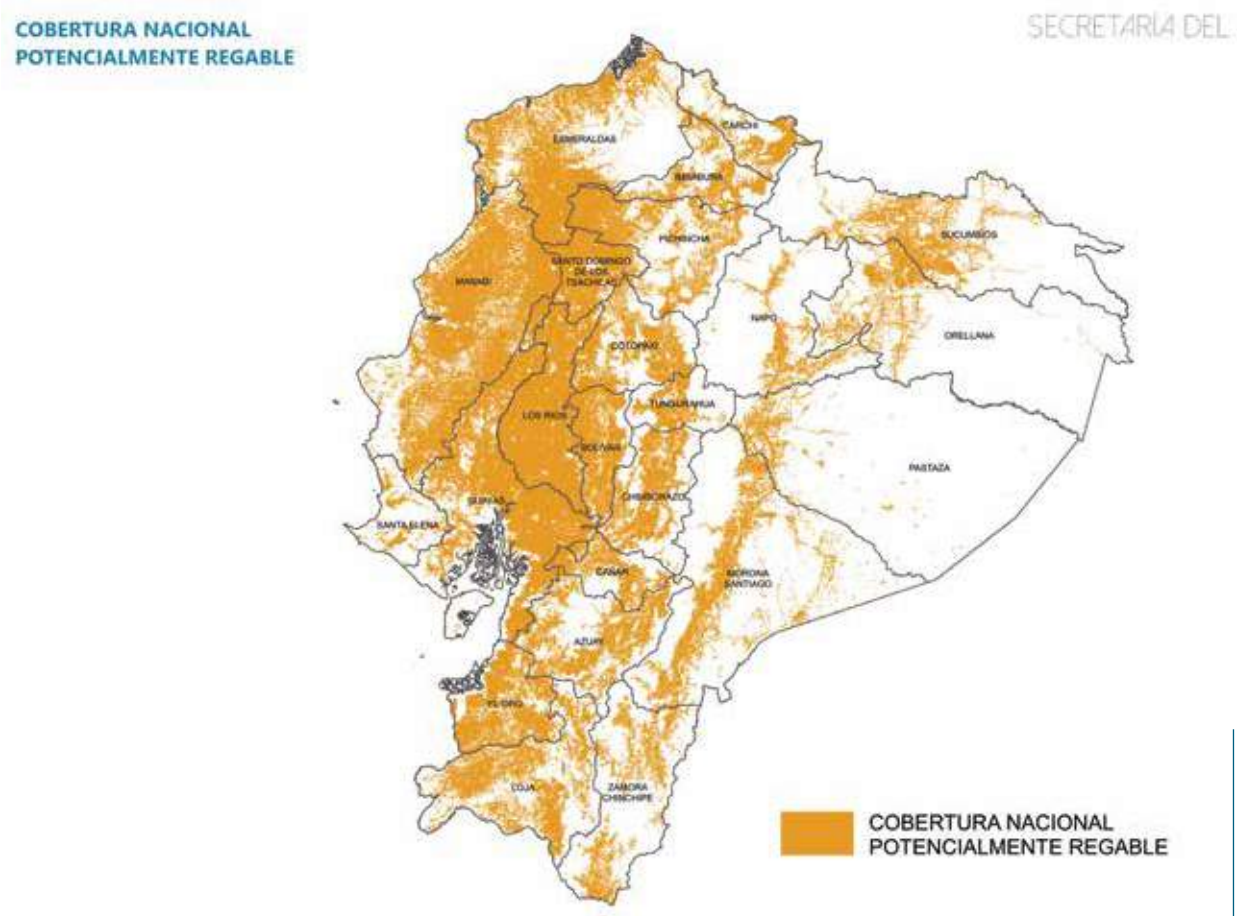


Figura 104.
Cobertura Nacional potencialmente irrigable en Ecuador, SENAGUA 2018

El desvío de una mayor cantidad de agua de riego de los ríos debido al aumento de la demanda de irrigación puede tener varios impactos:

- La capacidad existente del sistema de riego, incluida la capacidad de almacenamiento, puede no ser suficiente para satisfacer las mayores demandas; esto puede requerir inversiones adicionales.
- El aumento de la desviación de agua para irrigación reducirá el flujo en la estación seca, lo que puede afectar significativamente la ecología del río y a los usuarios aguas abajo, incluida la hidroenergía.

Además del riego, también es posible que aumenten otras extracciones aguas arriba debido al cambio climático.

Sesión 4.2 Adaptación a los cambios en el contexto comercial

Propósito y objetivos de aprendizaje	La sesión proporciona una visión general de los mercados de electricidad inestables bajo el cambio climático (variabilidad de los precios de la electricidad y cambios regulatorios como impuestos y subsidios, mercados de carbono, tarifas de electricidad y de agua) que pueden hacer que la hidroenergía sea comercialmente menos competitiva y atractiva. Los participantes tendrán una idea de cómo evolucionará la viabilidad financiera y económica de la hidroenergía, con consecuencias para la inversión, el diseño y las decisiones operativas.
Contenido	• ¿Cómo influirá el cambio climático en otras fuentes de electricidad, físicamente y mediante las políticas de mitigación? • ¿Cómo se verá afectada la hidroenergía por las políticas para promover las energías renovables? • ¿Cómo influirá una combinación energética cambiante en el atractivo de la hidroenergía?
Aspectos clave	El contexto comercial de la hidroenergía cambiará porque las diversas fuentes de electricidad se ven afectadas de manera diferente por las políticas de mitigación. Una combinación energética en evolución, con una mayor proporción de nuevas energías renovables, presentará un nuevo entorno, con algunas influencias positivas y otras negativas para el atractivo de la hidroenergía.
Temas de discusión y ejercicios	¿Cuáles son las políticas e iniciativas renovables actuales en su país y cómo están influyendo en la inversión en hidroenergía?
Lectura clave	Documento 4.2.1. - REN21 (2019) Global Status Report. Chapter 2: Policy Landscape.

El cambio climático influirá en otros aspectos del sector eléctrico, además de la generación de hidroenergía, tanto a través de los cambios ambientales como de las políticas de mitigación. Las inversiones en hidroenergía se verán afectadas por cambios comerciales, como la reducción o el aumento de la eficiencia y los costos de las fuentes de electricidad. La 21 muestra los resultados de una revisión de la literatura sobre los cambios que pueden esperarse.

	Demanda	**Suministro termal**	**Suministro renovable**	**Transmisión**
Cambio en temperatura	Cambio en días de grado de calor y frio (debidamente estudiado en algunas regiones)	Incremento en temperatura de agua y aire baja la eficiencia de enfriamiento termal (algunas investigaciones para ciertas regiones)	Baja en hielo incrementa eficiencia de potencia de viento (poca investigación)	Pérdidas incrementadas de transmisión debido a altas temperaturas (poca o no investigación)
				Impacto negativo de deshielo permafrost (poca investigación) Cableado bajo tierra debido a altas temperaturas y tierras áridas (poca o no investigación)
Cambios en precipitación	Opción de combustible (poca investigación)	Cambio en el flujo de río afecta el enfriamiento en planta de poder termal (poca o no investigación)	Potencial hidroeléctrico afectada por cambios en flujo de rio y evaporación (alguna investigación para lagunas regiones)	(no existe investigación en esta reseña)
Eventos de clima extremos	(no existe investigación en esta reseña)	(no existe investigación en esta reseña)	Seguridad de presa afectada por frecuencia de flujo errático de rio (poca investigación)	Interrupción de suministro, potencialmente costoso (poca investigación
Cambios en velocidad de viento	(no existe investigación en esta reseña)	(no existe investigación en esta reseña)	Cambio potencial alto a poder potencial de viento (comparativamente bien estudiado en algunas regiones, aunque no para velocidades de viento extremo)	(no existe investigación en esta reseña)
Incremento nivel de mar, subsidencia y otros efectos	(no existe investigación en esta reseña)	Daño debido a inundación y subsidencia (poco no investigación)	Daño debido a inundación y subsidencia (poco no investigación)	(no existe investigación en esta reseña)

Tabla 21. Impactos del clima en el sector de la electricidad, según tipos de cambio climático[115]

115 Mideksa and Kallbecken (2010)

Aunque no existe mucha investigación sobre las posibles vías de impacto, se ha afirmado que "el impacto del cambio climático en el sector energético probablemente no sea tan grande como los posibles impactos de las políticas de cambio climático."[116] Un impacto importante en la hidroenergía es, por ejemplo, la rápida caída en los costos de las nuevas energías renovables variables, causadas inicialmente por las políticas. Otro impacto importante es el aumento de la demanda de energía para calefacción y transporte, ya que las políticas de mitigación apuntan a reemplazar los combustibles fósiles en estas aplicaciones.

Los esquemas financieros tales como los impuestos al carbono, los esquemas de límites y mercados de carbono, los beneficios y subsidios tributarios nacionales o internacionales (por ejemplo, mediante el financiamiento por debajo de la tasa de interés de mercado) y las tarifas de sustentación (***feed-in tariffs***) pueden alterar el atractivo de la inversión en hidroenergía, como en cualquier otra tecnología renovable. Los objetivos de cartera de energías renovables o los créditos negociables de energía renovable también incentivarán las tecnologías renovables, como la hidroenergía. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Las tarifas de sustentación para proyectos hidroeléctricos en Alemania son garantizadas (según el tamaño de la instalación) durante 20 años si son nuevos o mejoran sustancialmente desde el punto de vista técnico, y si pueden demostrar el cumplimiento ecológico.
- Los impuestos sobre el carbono aumentaron indirectamente las ganancias de Hydro Tasmania en AUD 70 millones en 2012-2013 porque el impuesto de AUD 23 por tonelada de CO_2 aumentó los precios de la electricidad en Australia.
- Los objetivos de cartera de energías renovables se establecen en 29 estados de los Estados Unidos, con diversas normas sobre la elegibilidad de la hidroenergía.
- El banco brasileño de desarrollo BNDES ha financiado cerca de 50 GW de proyectos hidroeléctricos en los últimos 10 años, incluido su mayor préstamo de la historia, USD 10.800 millones para el proyecto Belo Monte. BNDES financia proyectos de generación de hidroenergía durante 20 años, hasta el 70% de los costos del proyecto, a tasas relativamente bajas.

Muchas de estas políticas de apoyo a las energías renovables se están implementando en la Región Andina. Ecuador ha incorporado, por ejemplo, tarifas de introducción de energías renovables, mandatos de biocombustibles, esquemas de licitación para energías renovables, incentivos fiscales e inversiones públicas.[117]

Otra estrategia que se aplica es el comercio de carbono. El mayor esquema comercial regional es el Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea. El mayor esquema internacional fue el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que ahora se está reduciendo gradualmente hasta la finalización del segundo período de compromiso del Protocolo de Kioto, el 31 de diciembre de 2020, pero que puede ser reemplazado por esquemas similares en el futuro. Creado a través del Artículo 12 del Protocolo de Kioto, el MDL permitió que un país con un compromiso de emisiones pudiera implementar un proyecto de reducción de emisiones en países en desarrollo. Dichos proyectos podrían obtener créditos de reducción de emisiones certificadas comercializables (CER), cada uno equivalente a una tonelada de CO_2, que puede contarse para cumplir con los objetivos de Kioto. El MDL en realidad no reduce las emisiones, sino que disminuye el costo de las reducciones de emisiones, lo que facilita ampliar las metas de mitigación. Su mecanismo de implementación se detalla en la Figura 105.

116 Ibíd.

117 REN21 (2019)

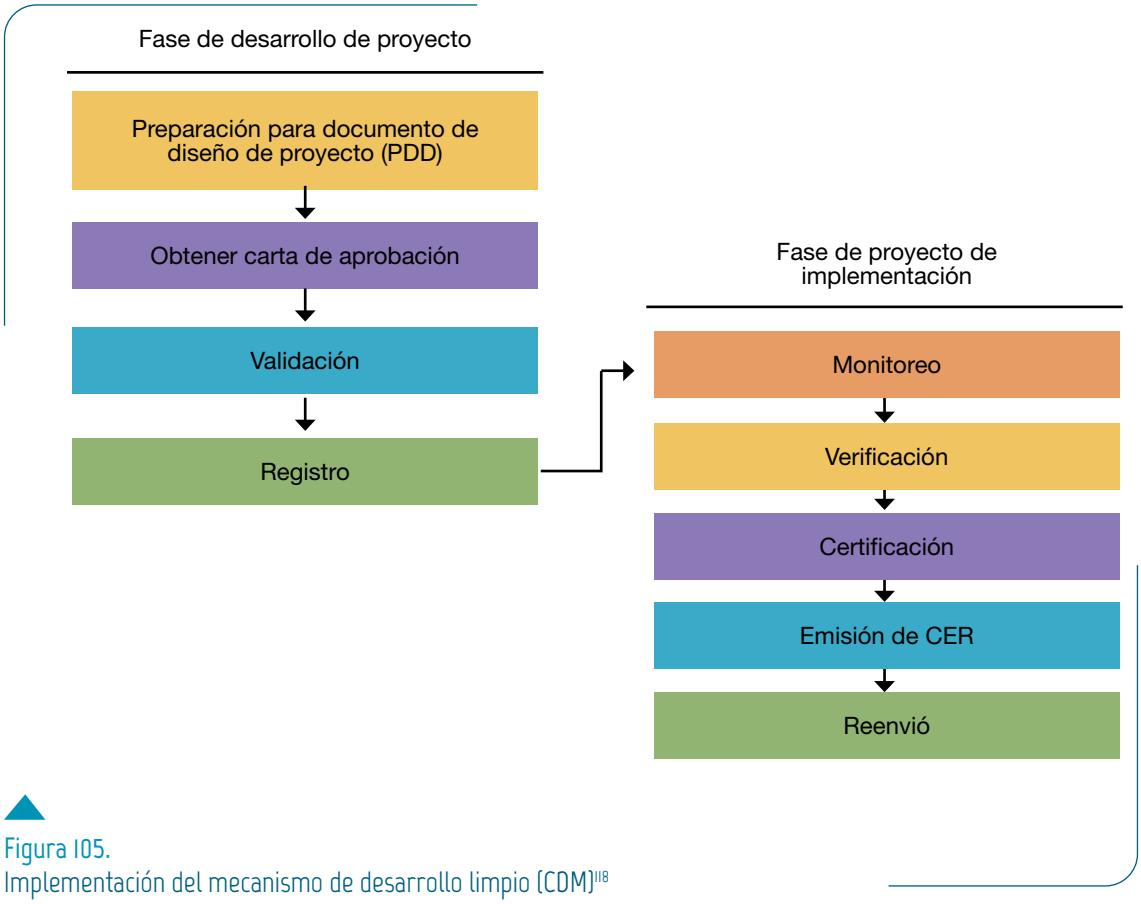


Figura 105.
Implementación del mecanismo de desarrollo limpio (CDM)[118]

Un proyecto MDL tenía que proporcionar una reducción de emisiones en el país anfitrión que fuera adicional a lo que de otro modo habría ocurrido. Los proyectos podían provenir de cualquier sector, pero tenían que ser calificados mediante un proceso de registro público. Se han registrado un total de 8.100 proyectos en 111 países, que respaldan una inversión de USD 300 mil millones y han evitado 2 mil millones de toneladas de CO_2. En la fase más activa del MDL, la energía eólica e hidroeléctrica fueron las tecnologías más frecuentemente apoyadas, con la mayoría de los proyectos hidroeléctricos en China (Figura 106, Figura 107).

118 Elaboración propia.

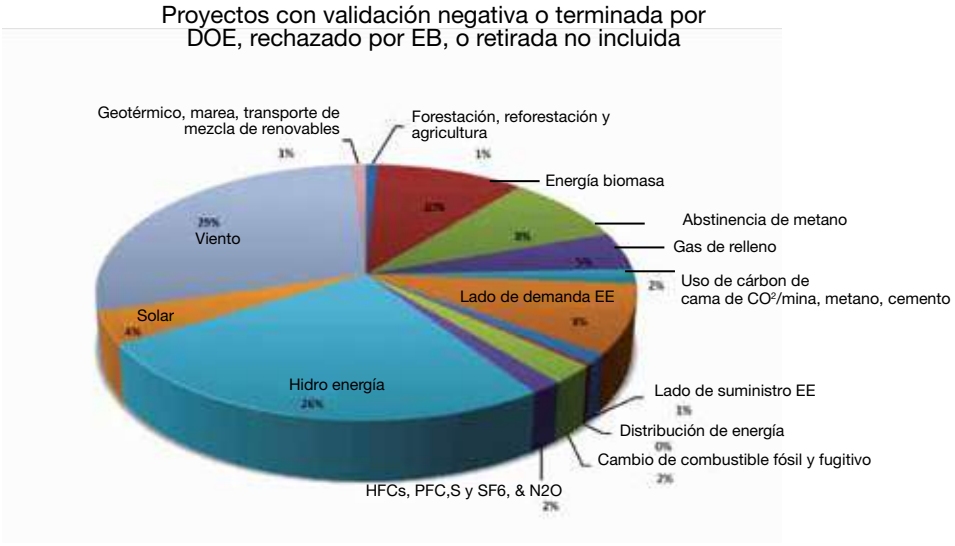


Figura 106.
Porcentaje de proyectos de MDL, por tipo[119]

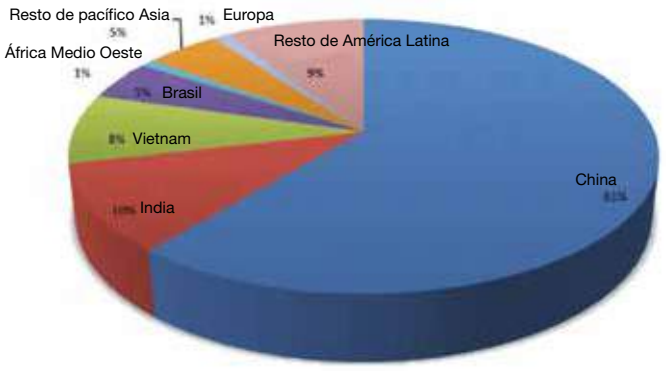


Figura 107.
Porcentaje de todos los proyectos MDL por país/región[120]

Los precios de los créditos de carbono están en gran medida determinados políticamente. El esquema de la Unión Europea, por ejemplo, ha experimentado grandes variaciones de precios con el tiempo. Los precios en el MDL han sido demasiado bajos para proporcionar fuertes incentivos para la mayoría de los proyectos amigables con el carbono, pero nuevamente, los futuros marcos de comercio de carbono pueden establecerse para valorarlo a tasas más altas. El Acuerdo de París, en virtud del Artículo 6.4, establece un mecanismo centralizado de crédito de carbono, pero las reglas para este mecanismo todavía no se han acordado.

119 http://www.internationalrivers.org/blogs/246/crunching-the-hydro-numbers-2012-cdm-update

120 Ibíd.

Un cambio comercial adicional e importante para la hidroenergía proviene de la creciente cantidad de fuentes renovables nuevas e intermitentes. No todos los mercados de energía realmente premian la prestación de servicios auxiliares (como la capacidad de reserva), pero se espera que cada vez más mercados lo hagan.

En muchos lugares, esto otorgará una prima a la energía entregable, que la hidroenergía de almacenamiento (pero no de filo de río) puede proporcionar. Esto fomentará el desarrollo de la hidroenergía de almacenamiento, potencialmente incluso del almacenamiento bombeado. Sin embargo, también puede haber casos en los que el tiempo de generación máxima de las energías renovables variables sea tal que se reduzca el valor de los esquemas hidroeléctricos.

La Figura 108 muestra un ejemplo de Alemania. Los precios al por mayor se mueven durante el día, en respuesta al cambio en la demanda y al suministro de energía eólica y solar fotovoltaica. Si bien los precios suben hacia el mediodía, a las 2 p. m. se generan más de 45 GW de energía eólica y solar, y los precios vuelven a caer. La hidroenergía de almacenamiento se despacha cuando los precios sean altos, en las horas de la mañana y de la tarde.

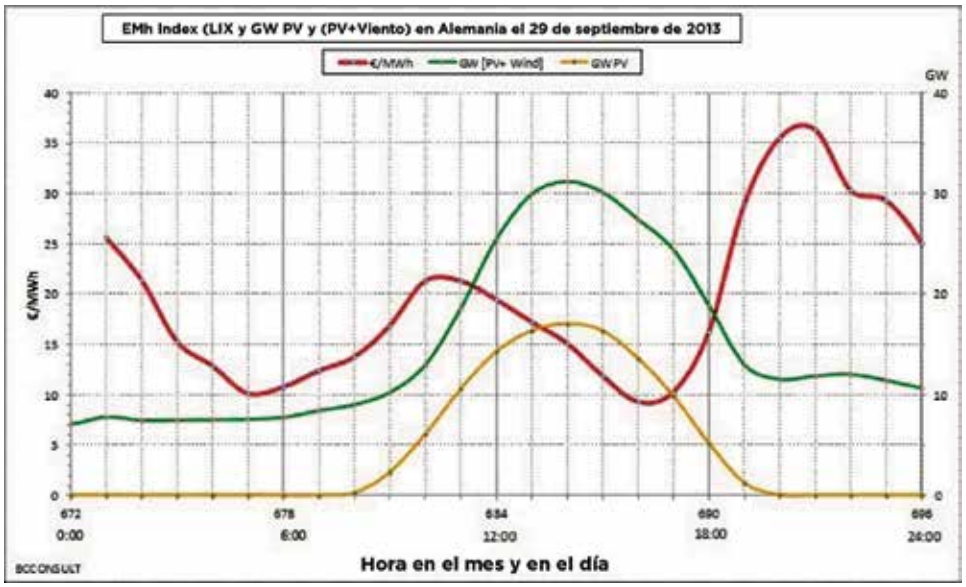


Figura 108.
La dependencia de los precios de la electricidad en el mercado clave de las energías renovables intermitentes

Algunos sistemas pueden tener una proporción tan alta de fuentes renovables que, dependiendo en gran medida del tiempo, en algunos días la generación solar y eólica es mayor que la demanda (Figura 109). Dado que el costo marginal por KWh de las energías renovables es muy bajo, siempre se despachan primero. Los precios pueden llegar a ser negativos si hay demasiada generación renovable en el mercado: a los generadores se les paga por apagar sus máquinas (Figura 110). En los días en que hay una brecha entre la generación renovable y la demanda, otras centrales eléctricas tienen que llenar la brecha y los precios de la energía suben.

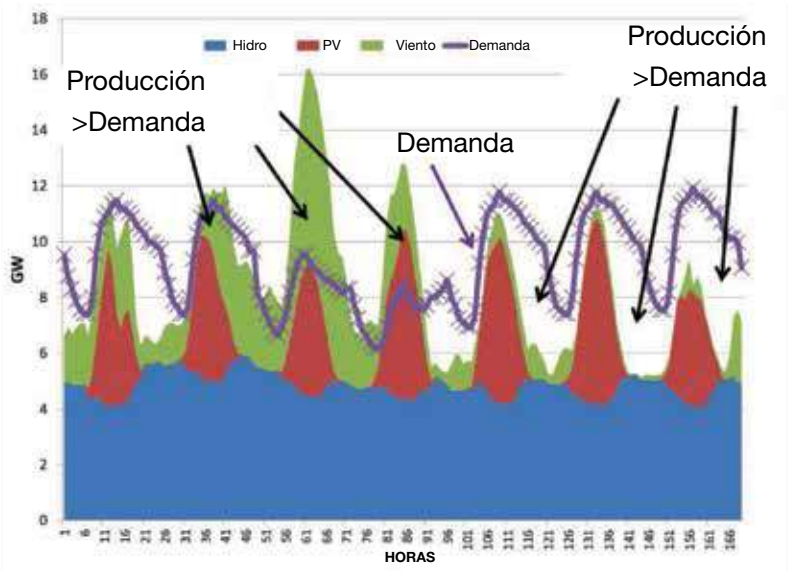


Figura 109.
Generación de energía renovable a lo largo del tiempo[121]

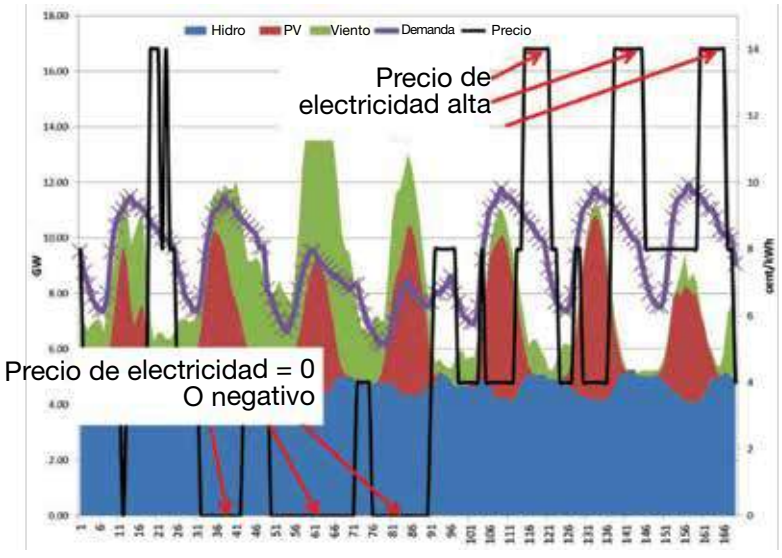


Figura 110.
Efectos del precio de la generación renovable a lo largo del tiempo[122]

121 https://qz.com/680661/germany-had-so-much-renewable-energy-on-sunday-that-it-had-to-pay-people-to-use-electricity/

122 Ibíd.

Otro ejemplo de Alemania demuestra que la energía solar (que alcanza su punto máximo al medio día) en realidad sigue a la demanda y puede hacer que los precios sean menos volátiles (Figura 111) y que se reduzca el diferencial de precio para las fuentes de energía entregables. Esto se usa cada vez más como argumento contra el almacenamiento por bombeo en los Alpes. Pero es igualmente posible encontrar períodos donde las energías renovables variables aumentan la volatilidad. Esto crea una nueva fuente de incertidumbre sobre el valor de las fuentes entregables.

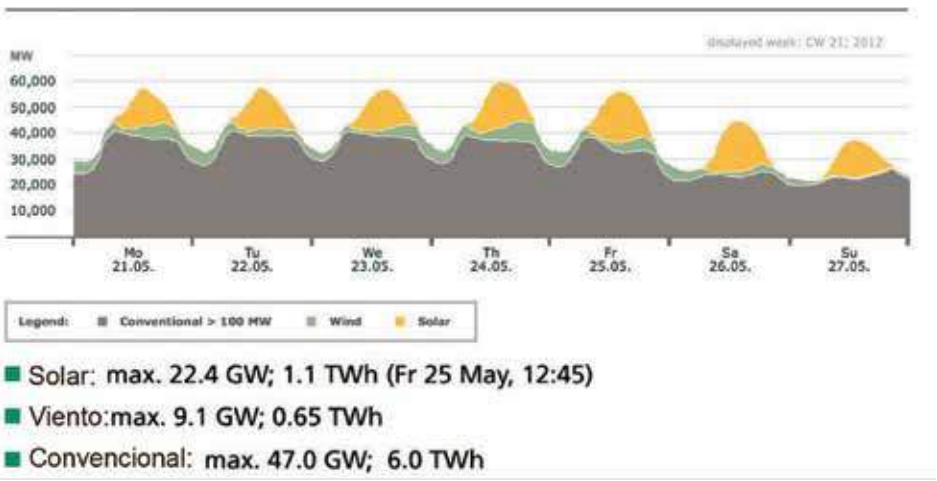


Figura III.
Producción de energía durante una semana[123]

Una consideración final con implicaciones comerciales es que los costos de oportunidad de la tierra o el agua pueden aumentar. Las tarifas de agua para la hidroenergía suelen ser bajas y no reflejan el costo total de oportunidad del agua. Las instalaciones de hidroenergía pueden tener que pagar tarifas más altas en el futuro, que reflejen su creciente consumo de agua y el mayor valor de este recurso para otros sectores. El costo de la tierra que se requiere para los proyectos también podría incrementarse a medida que aumenta el valor de la producción agrícola. Algunas tierras utilizadas para proyectos hidroeléctricos son de alta calidad, tierras de fondo de valle con potencial de riego, y los agricultores pueden requerir pagos de compensación más altos.

Es difícil decir cuál será el entorno comercial de una estación hidroeléctrica durante su vida útil. Lo que está cada vez más claro es que el cambio climático influirá en ese entorno, por múltiples vías, en paralelo con el efecto más obvio de la hidrología cambiante.

123 Burger, Fraunhofer ISE. Data: EEX, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Solar_Wind_2012_13a_e.pdf

Sesión 4.3 La hidroelectricidad como instrumento de adaptación

Propósito y objetivos de aprendizaje	La hidroenergía es solo una de las muchas industrias que necesita adaptarse al cambio climático. Pero puede apoyar la adaptación en otros sectores, por medio del almacenamiento de agua que proporciona. Esta sesión analiza cuestiones prácticas de gestión de los recursos hídricos, como los requisitos de almacenamiento y las estrategias de gestión del riesgo de inundación desde una perspectiva de adaptación. Los participantes deben tener confianza para discutir las posibles contribuciones y también las limitaciones de la hidroenergía en un contexto de adaptación.
Contenido	• ¿Cómo se aplican los diferentes enfoques de adaptación y toma de decisiones a los embalses hidroeléctricos? • ¿Qué papel puede desempeñar la hidroenergía para las necesidades más amplias de adaptación de los recursos hídricos?
Aspectos clave	Los proyectos de hidroenergía generalmente no encajan bien en los enfoques “robustos” de adaptación típicos. En algunas circunstancias, los proyectos hidroeléctricos pueden apoyar la adaptación en la gestión de los recursos hídricos.
Temas de discusión y ejercicios	Discusión grupal: ¿Puede señalar ejemplos específicos de su país sobre cómo los proyectos hidroeléctricos están apoyando (u obstaculizando) la adaptación?
Recursos adicionales	Documento 4.3.3 - McCartney & Smakhtin (2010) Water Storage in an Era of Climate Change. IWMI.
Lecturas clave	Documento 4.3.1 - Colombo & Byer (2012) Adaptation, flexibility and project decision-making. Documento 4.3.2 - DFID (2010) Water storage and hydropower: supporting growth, resilience and low carbon development. A DFID evidence-into-action paper.

Esta sesión profundiza la discusión de la sesión 1.3 sobre hidroenergía y adaptación, y también se basa en la sesión 3.4 sobre la toma de decisiones en un contexto de incertidumbre.

A veces se argumenta que la hidroenergía puede ayudar a las sociedades a adaptarse al cambio climático. En general, esto significa que los embalses de hidroenergía se pueden utilizar para almacenar agua para otros fines. Algunos de estos pueden ser compatibles y otros pueden estar en conflicto con la hidroenergía.

La gestión de embalses multipropósito se aborda en varios lugares en este manual. La mayoría de los proyectos de hidroenergía en la Región Andina son de filo de río o se han construido como embalses hidroeléctricos de un solo propósito. Incluso si no hay una intención explícita de utilizarlos para otros fines, estos pueden tener beneficios secundarios, por ejemplo, para el control de inundaciones, y en un contexto de gestión adaptativa, las complementariedades y compensaciones entre diferentes propósitos deben reevaluarse periódicamente.

Deben considerarse varios tipos de adaptación, que pueden ser clasificados por su intención, su escala temporal, su escala espacial o por sus implementadores. La adaptación "autónoma" es espontánea, desencadenada por cambios físicos o de mercado. La adaptación "planificada", en el otro extremo del espectro, es el resultado de una decisión deliberada. La adaptación puede provenir del sector privado o público. Puede ser anticipatoria, es decir, antes de que ocurran los cambios climáticos, o reactiva, en respuesta a dichos cambios. También es importante distinguir la adaptación durante la planificación del proyecto (cuando todavía hay una gran flexibilidad con respecto a la tecnología, la ubicación y el diseño), durante la construcción (cuando puede haber posibilidades de cambios de último minuto) y durante las operaciones (cuando el alcance de la adaptación es más limitado, principalmente en los aspectos operativos, aunque puede haber algunas opciones para cambios en el diseño más adelante, especialmente durante los proyectos de rehabilitación y renovación).

Existe un acuerdo generalizado de que, en algunas circunstancias, aumentar la cantidad de almacenamiento puede ser una opción planificada o anticipada de adaptación inteligente.

Los beneficios de almacenamiento de agua[124]

"Un mejor almacenamiento del agua es un motor para el crecimiento económico. En países pobres con lluvias altamente estacionales y a menudo impredecibles, la falta de almacenamiento adecuado de agua ya causa pérdidas económicas grandes y evitables por inundaciones y sequías y limita el crecimiento a largo plazo.

El almacenamiento de agua multipropósito, justificado económicamente por los retornos de la hidroenergía, se puede utilizar para proporcionar beneficios adicionales, como el riego, para apoyar los medios de vida locales y mejorar la seguridad alimentaria.

El almacenamiento mejorado del agua aumentará la resistencia al cambio climático y respaldará una mayor seguridad alimentaria y de agua en los países pobres y vulnerables. Esto requerirá acciones para mejorar el almacenamiento de agua natural en ríos, lagos, acuíferos, humedales y suelos, así como el almacenamiento construido. En muchos países, el almacenamiento construido de una variedad de tamaños ofrecerá los medios más efectivos para cubrir los riesgos de lluvias más variables. La gestión de la demanda para garantizar el uso eficiente del agua es un complemento crucial para mejorar el almacenamiento".

La hidroenergía es a menudo la única fuente importante de ingresos financieros por el uso de los recursos hídricos, por lo que la iniciativa para construir un embalse puede provenir del sector hidroeléctrico. Los esquemas de riego a menudo no cubren sus costos; las necesidades municipales de suministro de agua son generalmente relativamente pequeñas, y otros usos del agua que podrían beneficiarse del almacenamiento son bienes públicos o tienen bajo potencial de ingresos.

Si esto se acepta, el siguiente paso es considerar las opciones para casos específicos de posibles embalses. Colombo y Byer (2012) han reunido la siguiente categorización de opciones de adaptación, es decir, opciones para planificar enfoques en condiciones de cambio climático.

124 DFID (2010)

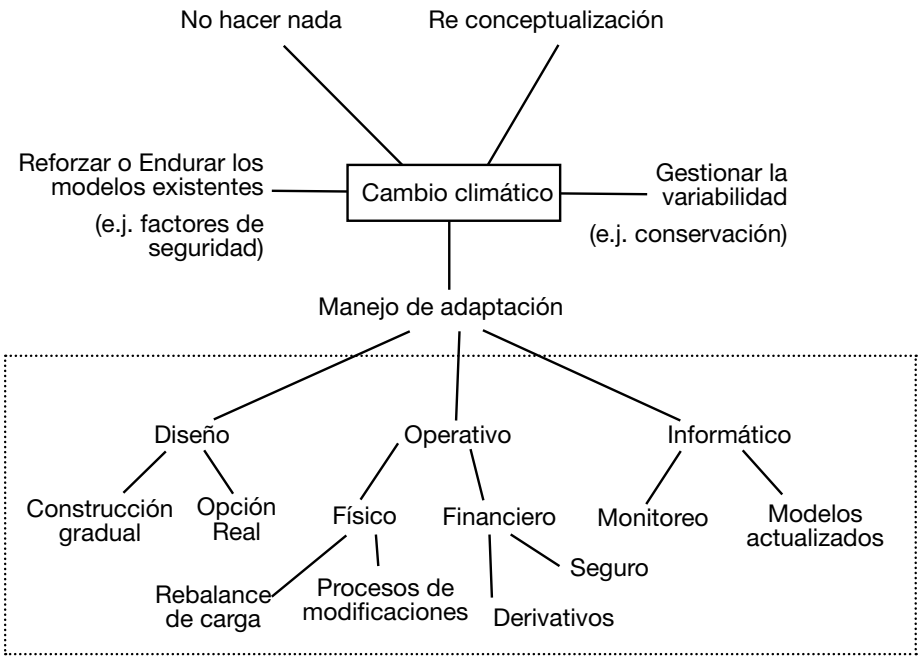


Figura II2.
Clasificación de los enfoques posibles para adaptarse al cambio climático en el nivel del proyecto

Esta categorización sugiere cinco opciones genéricas:

- No hacer nada: construir y operar un embalse sin considerar el cambio climático, es decir, basado en flujos históricos.
- Reforzar o "endurar" los diseños existentes: estructuras más fuertes o más grandes.
- Gestionar la variabilidad: preparar proyectos para una mayor variabilidad.
- Reconceptualización: considerar nuevas tecnologías o elementos de diseño, abordar los problemas de manera diferente.
- Gestión adaptativa: esperar, ver y actuar.

Cualquiera de estas opciones puede preferirse en situaciones específicas y por varias razones. "Esperar y ver" no es una estrategia pasiva, sino que se basa en la observación activa de cómo funcionan las decisiones iniciales. La gestión adaptativa se ha definido como "una estrategia que se puede modificar para lograr un mejor rendimiento a medida que uno aprende más sobre los problemas en cuestión y cómo evoluciona el futuro. Una característica clave de la gestión adaptativa es que los tomadores de decisiones buscan estrategias que pueden modificarse una vez que se obtienen nuevos conocimientos de la experiencia y la investigación. (…) El aprendizaje, la experimentación y la evaluación son clave en este enfoque y se planifican activamente en la toma de decisiones."[125] Esto también se llama "flexibilidad informacional".

Con el apoyo de la "flexibilidad informacional", el diseño y las operaciones de un futuro embalse deberían ser capaces de lidiar de manera más flexible y adaptativa con el cambio climático. En términos de diseño, un proyecto puede ser construido en varias etapas, y se pueden proporcionar opciones técnicas que permitan una expansión más rápida o más barata en el futuro. En términos de operaciones, los procesos físicos (como curvas guías y cronogramas de salidas) pueden ser flexibles, pero también existe la opción de utilizar

125 Quoted in Colombo & Byer (2012).

instrumentos financieros (como seguros y opciones financieras).

Estas opciones no son mutuamente excluyentes, pero pueden funcionar en conjunto. Por ejemplo, la función de control de inundaciones de un embalse puede fortalecerse mediante aliviaderos más grandes y flexibilidad operativa (vaciado oportuno del embalse antes de una inundación) con base en el monitoreo y pronóstico del clima en tiempo real. Pero incluso entonces, la capacidad de controlar las inundaciones siempre será limitada, al menos en el caso de las crecidas más grandes posibles, y puede complementarse con un seguro contra inundaciones para las comunidades aguas abajo.

Sin embargo, lograr una adaptación tan múltiple y relativamente sofisticada presentará muchos desafíos. Actualmente, hay una falta de información de referencia relevante y sistemas insuficientes de monitoreo e intercambio de datos, lo que hace que la identificación, el análisis y el modelado de los efectos sean mucho más difíciles. Los marcos políticos, tecnológicos e institucionales no están diseñados para hacer frente al cambio y la adaptación continuos. La equidad social a menudo no existe en el proceso de toma de decisiones, y los pobres y más vulnerables pueden ser descuidados en el proceso de adaptación y tienen que valerse por sí mismos.

Si la adaptación de los recursos hídricos se trata en gran medida de la gestión del aumento de los riesgos de inundaciones y sequías, durante el proceso de toma de decisiones, los participantes deben comprender la naturaleza y las consecuencias de los riesgos. Al examinar críticamente estos riesgos, la atención pública se centra en las consecuencias sociales de los eventos (que pueden controlarse) en lugar de en los procesos físicos incontrolables. Se puede identificar regiones prioritarias que justifican evaluaciones de riesgos adicionales, nuevas estrategias de adaptación, planes de preparación, educación pública o cambios en el uso de la tierra. El conocimiento adquirido gracias a este proceso sirve como información de referencia para las propuestas de respuesta.

La hidroenergía puede ser capaz de soportar la adaptación al proporcionar almacenamiento, pero esto no significa que el almacenamiento construido sea la única solución. Incluso si se ha identificado que se necesita más capacidad, ya que los flujos se volverán más irregulares y menos predecibles, los nuevos embalses pueden no ser la mejor respuesta. Si bien ofrecen un alto grado de confiabilidad de almacenamiento, su administración es la más compleja de todas las opciones y tiene los mayores costos ambientales y sociales. Quizás se puedan considerar otras opciones de almacenamiento, como la protección o la reforestación de los bosques de la cuenca. La presión para adaptarse puede hacer que los planificadores vuelvan a conceptualizar el problema, salgan de los patrones tradicionales y consideren una gama más amplia de opciones compatibles.

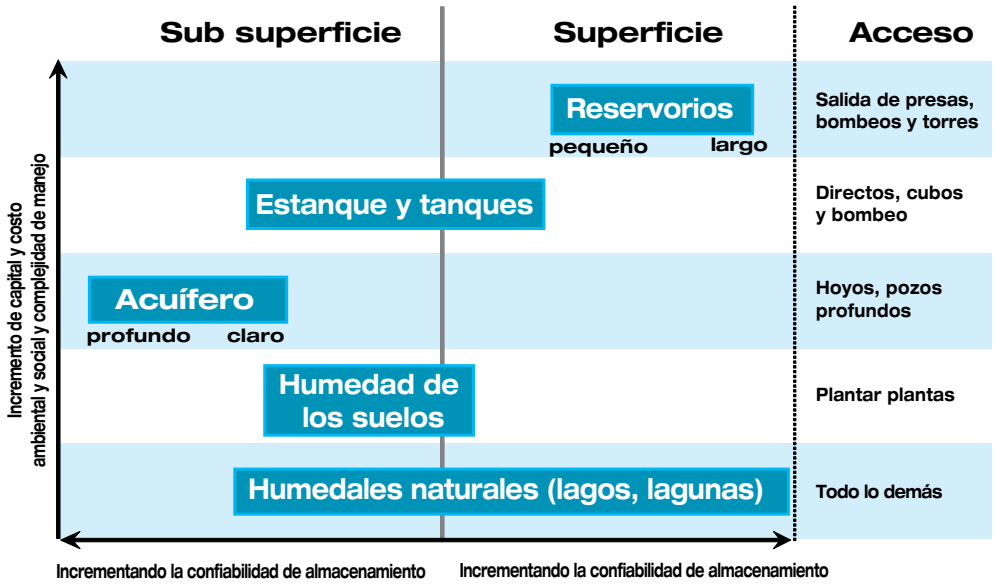


Figura II3.
Opciones de almacenamiento[126]

Estas diferentes opciones de almacenamiento tienen sus ventajas y desventajas, tanto en condiciones de funcionamiento "normales" como bajo el cambio climático. La Tabla 22, a continuación, ofrece una comparación genérica de estas opciones de almacenamiento. Los tomadores de decisiones deben ser conscientes de que, si bien el cambio climático puede ser una razón para buscar una mayor capacidad de almacenamiento, este mismo se verá afectado por el cambio climático.

126 International Water Management Institute at http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Water_Policy_Briefs/PDF/WPB31.pdf

Represa de Chanlud. ©Elecaustro

	Beneficios inherentes (pros)	**Riesgos inherentes (contras)**	**Riesgos posibles del cambio climático**	**Posibles implicaciones sociales y económicas**
Humedales naturales	• El almacenamiento de agua se proporciona como un servicio ecosistémico, sin necesidad de infraestructura costosa	• La utilización excesiva de agua en humedales naturales o río arriba puede debilitar otros servicios ecosistémicos	• Lluvias y entradas de escorrentía reducidas que resultan en desecación • Picos más elevados de inundación que resultan en la expansión de humedales e inundaciones de campos o viviendas • Hábitat propicio para vectores de enfermedades	• Menos posibilidades de cubrir las necesidades de comunidades u hogares • Pérdida de servicios ecosistémicos que dependen del agua • Mayor riesgo de enfermedades que se transmiten por el agua
Humedad de la tierra	• Generalmente, opciones de bajo costo que pueden ser implementadas por agricultores individuales y comunidades	• En lugares donde las propiedades son extremadamente pequeñas, los agricultores no estarán dispuestos a usar sus valiosas tierras para estas intervenciones • Almacenaje limitado, no proveerá agua para más que unos pocos días sin lluvia	• Infiltración reducida o anegamiento/erosión como resultado de la modificación en la intensidad y duración de las lluvias • Humedad reducida de la tierra como resultado de una mayor evaporación Calidad reducida de la tierra (incluida la capacidad de retención de agua, como resultado de patrones de lluvia y temperatura modificados	• Producción decrecida, pérdidas de siembras más frecuentes y reducción en el rendimiento

Agua subterránea	• Las pérdidas por evaporación son bajas o inexistentes • El almacenamiento de varios años se ve desajustado por la variabilidad estacional	• Se necesita información geológica detallada para localizar pozos y estimar los rendimientos • Dependiendo de la geología, puede tener una alta concentración de químicos tóxicos (p. ej., arsénico)	• Recarga reducida como resultado de la modificación en la intensidad de las lluvias • Recarga reducida como resultado de modificaciones en la cobertura del suelo e incremento del déficit de humedad del suelo • Intromisión salina en acuíferos cercanos a la costa	• La disminución de los niveles de agua eleva el costo de acceso al agua subterránea • La baja calidad del agua subterránea hace que esta no sea apta para el uso
Estanques y tanques	• Generalmente, opciones de relativo bajo costo pueden ser implementadas por comunidades y organizaciones no gubernamentales	• Altas pérdidas por evaporación • Contaminación del agua (p. ej., por el agua que ingresa y por el ganado que entra al agua) Riesgo de sedimentación • Proporciona hábitat para vectores de enfermedades	• Flujo reducido, que resulta en períodos más largos entre llenadas • Evaporación más elevada, lo que incrementa la velocidad de reducción del reservorio • Daño en la infraestructura causado por inundaciones más fuertes • Mejor hábitat para vectores de enfermedades • Mayor riesgo de eutrofización, salinización y sedimentación	• Más dificultad para atender las necesidades de comunidades y hogares • Incremento de los requisitos laborales y costos para reparar estructuras • Mayor riesgo de enfermedades de transmisión por agua

Reservorios	• Altos volúmenes de agua almacenada, que puede ser utilizada para varios propósitos • Única opción que permite la producción de electricidad y ofrece protección ante inundaciones	• Inversión significativa de capital • Desplazamiento frecuente de un gran número de personas • Impactos ambientales y sociales significativos por el cambio del flujo del río • Proporciona hábitat para vectores de enfermedades	• Flujo reducido resulta en tiempos más largos para llenar el reservorio • Evaporación más elevada, lo que incrementa la velocidad de reducción del reservorio • Daño a la infraestructura causado por inundaciones más fuertes • Mejor hábitat para vectores de enfermedades • Mayor riesgo de eutrofización, salinización y sedimentación	• Mayor dificultad para alcanzar las especificaciones del diseño (irrigación e hidroenergía, etc.) • Incremento de costos debido a la necesidad de rediseño de la infraestructura (p. ej., aliviaderos) • Mayor riesgo de enfermedades que se transmiten por el agua

Tabla 22. Comparación de opciones de almacenamiento[127]

Quizás el área de gestión de riesgos más obvia y crítica en la planificación de proyectos hidroeléctricos es la posibilidad de inundaciones. De nuevo, el almacenamiento (de cualquier tipo) es solo uno de los muchos enfoques posibles de gestión del riesgo de inundación. Volver a conceptualizar el problema como "la mejor manera de reducir la vulnerabilidad de las personas" frente a las inundaciones, en lugar de cómo detener las inundaciones, permite tener una visión más amplia de las muchas opciones disponibles para reducir el peligro real, la exposición o la vulnerabilidad ante inundaciones.[128]

Represa Agoyán. ©Dani Vega CELEC EP Hidroagoyan

127 McCartney and Smakhtin (2010)

128 USGS Factsheet (2011) Understanding Risk and Resilience to Natural Hazards

Reducción del peligro	Reducción de la exposición	Reducción de la vulnerabilidad
• Retener el agua donde cae (aumento de la infiltración, almacenamiento en los suelos) • Medidas de retención (humedales o depresiones naturales, tanques construidos por personas, etc.) • Presas y embalses • Canales de desvío • Gestión del uso del suelo (p. ej., códigos de construcción de viviendas en áreas urbanas, prácticas de construcción de infraestructura, planificación adecuada del paisaje)	• Medidas estructurales en el río (diques, trabajos de encauzamiento fluvial, como canalización, muros de contención de inundaciones, infraestructura elevada de carreteras y vías férreas) • Medidas y acciones estructurales y no estructurales realizadas por individuos (protección contra inundaciones) • Regulación de tierras • Medidas de emergencia por inundación (advertencia de inundación y evacuación)	• Física: mejoramiento de la infraestructura, el bienestar, las oportunidades ocupacionales y el ambiente de vida • Constitucional: facilitando la igualdad de oportunidades de participación, educación y conciencia, proporcionando habilidades adecuadas y sistemas de apoyo social • Motivación: creando conciencia y facilitando la autoorganización • Económica: seguro contra inundaciones

Tabla 23. Opciones para manejo de riesgos de inundaciones

Para resumir, en algunas circunstancias, los proyectos hidroeléctricos pueden apoyar la adaptación en el sector de los recursos hídricos. Si se diseñan y gestionan adecuadamente, los embalses pueden proporcionar almacenamiento adicional para proteger a las poblaciones río abajo de las inundaciones y las sequías. Sin embargo, a menudo hay otras alternativas para proporcionar el mismo servicio. Además, los proyectos hidroeléctricos generalmente no encajan bien en los enfoques de adaptación "robustos" descritos en la Sesión 3.4 (estrategias de no arrepentimiento , reversibles, de margen de seguridad, blandas o que reducen los horizontes de tiempo para la toma de decisiones); ciertamente estos proyectos no son una opción blanda o reversible. No se pueden construir fácilmente por etapas. Es incierto si puede haber arrepentimientos, dadas las muchas cosas que podrían ocurrir durante la vida útil de un proyecto. También, los márgenes de seguridad pueden ser muy caros.

Dadas estas complejidades, si bien muchas decisiones de adaptación se tomarán de manera espontánea e individual, definitivamente el gobierno tiene la función de garantizar la mejor adaptación planificada posible para y mediante una infraestructura estratégica de larga duración.

Estudio de caso para un problema complejo de adaptación

Las estrategias de adaptación generalmente incluyen equilibrar objetivos competitivos. Estas consideraciones pueden observarse en un ejemplo de adaptación compleja y de alto riesgo: la gestión del agua de Egipto. Este ejemplo muestra los conflictos y sinergias que ya existen, y cómo pueden evolucionar con el cambio climático y en un contexto transfronterizo.

Prácticamente toda el agua de Egipto proviene del Nilo y se almacena en el lago Nasser, un embalse construido y llenado por primera vez en la década de 1960 (tardó una década en llenarse debido a su tamaño).

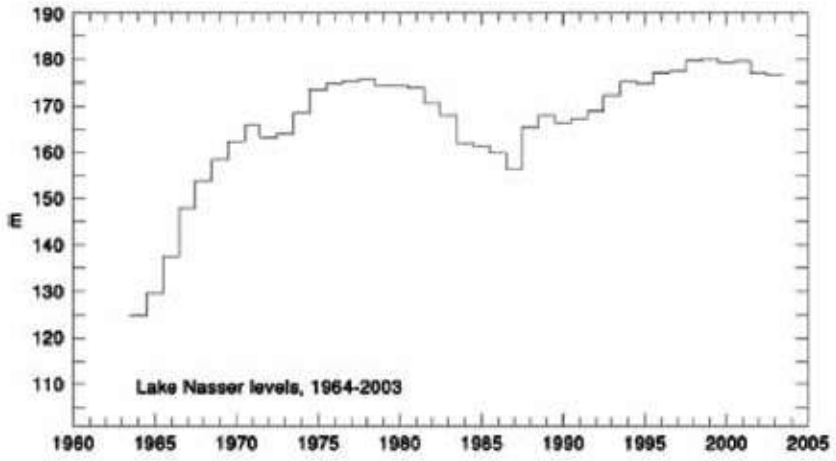


Figura 114.
Lago Nasser, Egipto, niveles entre 1964 y 2003[129]

El lago Nasser tiene varios propósitos; algunos usos de su agua son compatibles entre sí y otros no. Fue capaz de ayudar a Egipto a atravesar diez años de sequía en la década de 1980 (ver en la Figura 115 la caída en los niveles del lago durante este tiempo). El agua almacenada en el lago se libera en el Nilo para su uso en la generación de hidroenergía y para el riego aguas abajo. Sin embargo, el agua almacenada también se puede desviar del lago Nasser directamente a sistemas de riego, impidiendo así su uso aguas abajo.

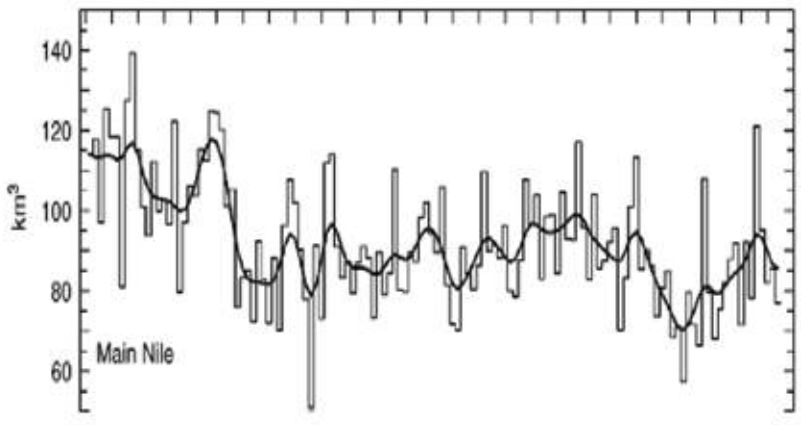


Figura 115.
Flujos históricos del río Nilo

129 Conway (2005) From headwater tributaries to international river: Observing and adapting to climate variability and change in the Nile basin.

Una parte del suministro de agua del lago se usa para irrigar la depresión de Toshka, una región al oeste del lago Nasser en el desierto del Sahara.[130] El requisito de la primera fase (210.000 ha) del Plan de Riego Toshka es de 5 km³/año de agua. Estas demandas adicionales de agua deben integrarse a los usos ya existentes del lago Nasser. El Acuerdo de 1959 sobre las aguas del Nilo entre Sudán y Egipto asignó los derechos del agua en función de un flujo promedio de 84 km³/año en la frontera de Egipto. En realidad, el flujo promedio para las décadas de 1960 y 1990 fue de solamente 76 km³/año, y las predicciones para la década de 2050 muestran una mayor reducción, a 65 km³/año. La evaporación del lago Nasser es de 10 a 14 km³/año.

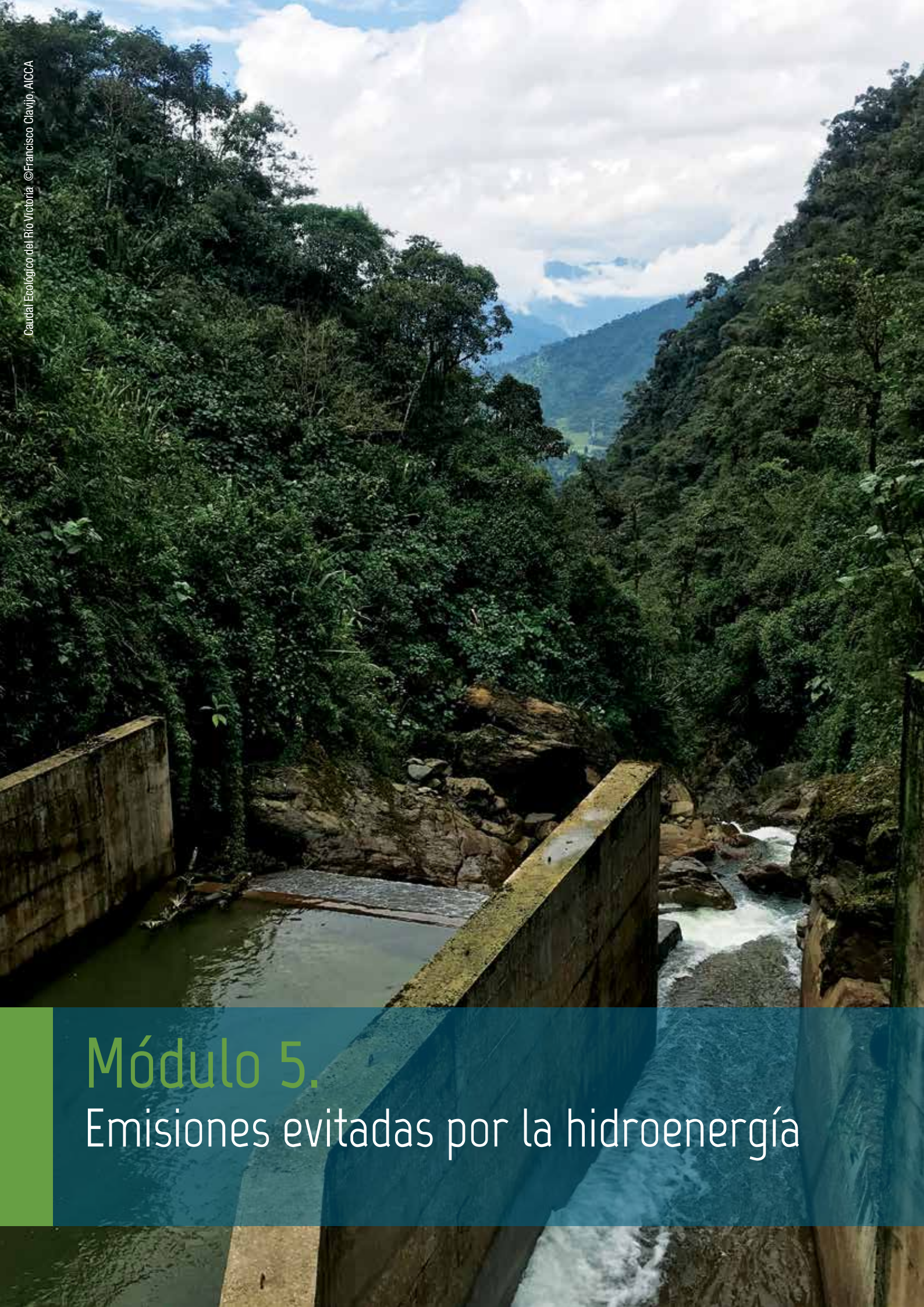
Hay varios costos de oportunidad asociados con el Plan de Riego Toshka. El delta del Nilo comprende el 80% de las tierras agrícolas y los flujos reducidos ya han provocado la pérdida de nutrientes, la intrusión salina, la erosión costera y la reducción en la producción de peces. El ascenso del nivel del mar ahora aumenta la presión sobre el delta. Estos efectos adversos combinados hacen que la población del delta sea vulnerable al desplazamiento y a la pérdida de medios de vida. Se considera que el delta del Nilo (junto con los deltas del Mekong y el Ganges/Brahmaputra) se encuentra entre los más vulnerables del mundo (Figura 116). También hay 2.800 MW de capacidad hidroeléctrica instalada (10% del total de Egipto) aguas abajo del lago Nasser, y toda el agua que se devía a Toshka está reduciendo el potencial de generación.

Figura 116.
Vulnerabilidad relativa de poblaciones en deltas[131]

Los tomadores de decisiones deben equilibrar el aumento en la demanda de alimentos y electricidad de una población en crecimiento, con servicios ambientales que protegen a estas mismas poblaciones, y todo esto en condiciones que cambian constantemente.

130 http://na.unep.net/atlas/onePlanetManyPeople/downloads/conferencePosters/Toshka.pdf

131 https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/xccsc3.html



Caudal Ecológico del Río Victoria. ©Francisco Clavijo, AICCA

Módulo 5.
Emisiones evitadas por la hidroenergía

Sesión 5.1 Emisiones evitadas por la hidroenergía

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión proporciona una visión general de los beneficios de la hidroenergía para evitar las emisiones de gases de efecto invernadero. Cubre tanto la evitación directa de emisiones, mediante el reemplazo de la generación térmica, como la indirecta, al permitir la integración de energías renovables variables, en el ámbito mundial y en la Región Andina. Los participantes aprenderán a comprender y estimar los beneficios para evitar las emisiones de GEI.
Contenido	• ¿Cuántas unidades de emisiones de carbono desplaza la generación hidroeléctrica? • ¿Cómo se aplica esto a la Región Andina?
Aspectos clave	Las emisiones evitadas por la hidroenergía dependen de las características específicas del sistema eléctrico servido, generalmente descrito por el margen operativo y de construcción, como en el MDL. Los beneficios de las emisiones evitadas pueden estimarse mediante el análisis económico y pueden proporcionar ingresos financieros. Los beneficios también incluyen el apoyo a la expansión de nuevas energías renovables, que requieren respaldo y almacenamiento de energía.
Temas de discusión y ejercicios	Discusión de grupo: ¿Qué importancia tienen las posibles emisiones evitadas (de manera directa e indirecta) por la hidroenergía en los países andinos?
Recursos adicionales	El Informe sobre el Cambio Climático de Manitoba Hydro (2015) proporciona una buena visión general de una variedad de asuntos relacionados con el cambio climático para una empresa de hidroenergía, incluidos cuestiones que van más allá de las emisiones evitadas.
Lecturas clave	Documento 5.1.1 - CDM Project Design Document for Baba project (2008). Documento 5.1.2 - Manitoba Hydro (2015) Climate Change Report. Documento 5.1.3 - IRENA (2016) Análisis del Mercado de Energías Renovables: América Latina. Documento 5.1.4 - Barbosa et al. (2017) Hydro, wind and solar power as a base for a 100% renewable energy supply for South and Central America.

La hidroenergía es una tecnología de energía limpia y una de las opciones para reducir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero. Esto se logra directamente mediante el reemplazo de la generación térmica. Para calcular el efecto de suministrar esta energía a la red, se debe conocer la fuente de electricidad que se desplaza (tanto hoy como en el futuro).

Proyecto de GEI	Actividad del proyecto	Efecto principal
Instalar y operar una turbina eólica conectada a la red eléctrica	Generar cero emisiones	Reducir las emisiones de GEI en otras plantas de generación eléctrica
Instalar y operar una central eléctrica de ciclo combinado de gas natural conectada a la red eléctrica	Generar electricidad de bajas emisiones en plantas de gas natural de alta eficiencia	Reducir las emisiones de GEI por combustión de centrales eléctricas (de alta emisión) conectadas a la red eléctrica
Instalar y operar equipos de generación combinada de electricidad y calor en un edificio conectado a la red eléctrica	1. Generar calor y electricidad para consumo in situ, evitando la necesidad de conectarse a la red eléctrica	Reducir las emisiones de GEI por combustión en otras centrales eléctricas y en la calefacción
	2. Generar calor para consumo in situ, evitando la necesidad de una caldera separada	Reducir las emisiones de GEI por combustión mediante la generación de energía (in situ)
Modernizar una central eléctrica de carbón conectada a la red existente para mejorar su eficiencia y capacidad de generación de energía	1. Generar los niveles actuales de producción de electricidad con mayor eficiencia en el uso de combustible	Reducir las emisiones de GEI por combustión por la generación de electricidad fuera de la red
	2. Generar más electricidad conectada a la red, debido a una mayor capacidad y utilidad	Reducir las emisiones de GEI de centrales eléctricas conectadas a la red
Instalar luces fluorescentes en un edificio	Reducir el consumo de energía de la red eléctrica	Reducir las emisiones de GEI por combustión en centrales eléctricas conectadas a la red
Modernizar una planta a diésel para mejorar su eficiencia en la generación de energía	Generar electricidad más eficiente	Reducir las emisiones de GEI por combustión en la generación de electricidad fuera de la red

Tabla 24. Ejemplos de inversiones para la reducción de GEI en el sector de energía[132]

La mayor parte de la discusión metodológica sobre cómo calcular las reducciones de emisiones tiene lugar en el contexto de los mercados de carbono. La herramienta MDL 07 de la CMNUCC[133] determina el factor CO_2 de emisión para el desplazamiento de la electricidad generada por las centrales eléctricas en un sistema eléctrico. Los resultados dependen de varios factores:

- Contexto: exceso de capacidad, demanda suprimida, inversiones fijas.
- Características del proyecto: carga pico o base, generación firme versus no firme.
- Comportamiento del mercado: planes a diferentes escalas de tiempo (a corto plazo frente a largo plazo).
- Tamaño del proyecto: efectos acumulativos de pequeños proyectos, retraso versus desplazamiento de nuevas adiciones de capacidad.

La herramienta 07 calcula el factor de emisión de margen combinado (CM, por sus siglas en inglés) del sistema eléctrico, que es el promedio ponderado de dos factores de emisión: margen operativo (OM) y margen de construcción (BM). El OM es el factor de emisión que se refiere al grupo de centrales eléctricas

132 WRI & WBCSD (2005) Guidelines for Quantifying GHG Reductions from Grid-Connected Electricity Projects

133 https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-07-v7.0.pdf

existentes cuya operación actual se vería afectada por el nuevo proyecto. El BM es el factor de emisión que se refiere al grupo de posibles plantas de energía cuya construcción y operación futura se verían afectadas por el nuevo proyecto (elección y/o calendario de nuevas plantas de energía, o extensión de la vida de las existentes). En sistemas maduros, donde la demanda de electricidad es estable, dominará el OM. En sistemas de rápido crecimiento, dominará el BM.

El CM también se conoce en algunos contextos como "tasa de emisiones de referencia":

$$ER_{baseline} = wBM + (1-w)OM$$

Donde:

$ER_{baseline}$ es la tasa de emisión de referencia (línea de base) con respecto a la generación (p. ej., toneladas de CO_2 equivalente/MWh).

BM es el factor de emisión de margen de construcción (t CO_i^{-e}/MWh)[4]

OM es el factor de emisión de margen operativo (t CO_i^{-e}/MWh).

w es el peso (entre 0 y 1) asignado al margen de construcción.

Para determinar los pesos de BM y OM, se pueden aplicar varias opciones metodológicas. Primero, se podría utilizar un modelo capaz de reflejar todos los efectos, es decir, modelos de simulación u optimización completos y no solo el modelo de despacho a corto plazo. Alternativamente, los modelos o algoritmos podrían estimar cada efecto por separado y luego combinarlos. Finalmente, uno podría decidir si predomina un efecto e ignorar los otros.En un sistema en rápida expansión, el efecto principal de un pequeño proyecto renovable puede ser el retraso de la entrada de nueva capacidad de combustible fósil. Pero el efecto de esto no debe subestimarse: cuanto más tarde se produzcan las emisiones de GEI, mejor

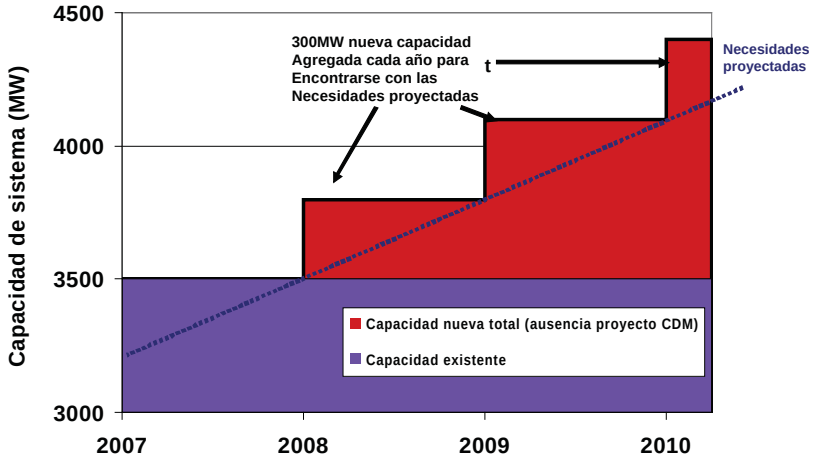


Figura 117.
Expansión del sistema, antes del proyecto de MDL[134]

134 Lazarus (2004) The Combined Margin Approach: Issues and Options. World Bank workshop, Buenos Aires

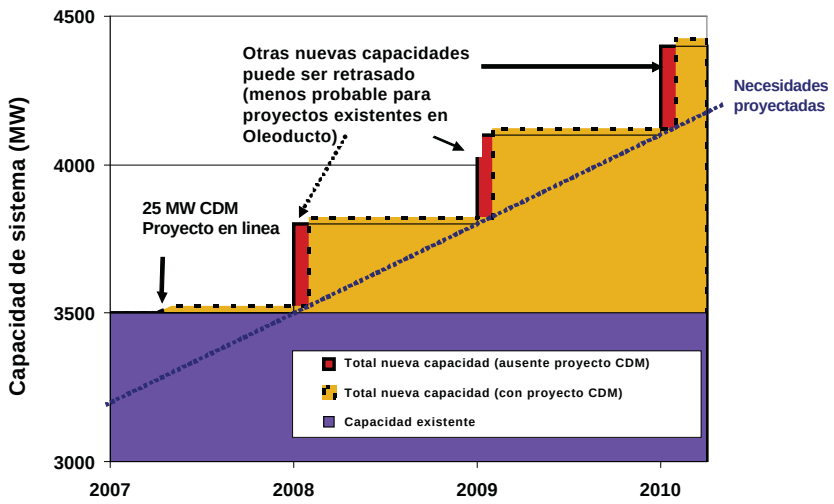


Figura 118.
Posible impacto de un pequeño proyecto hidroeléctrico[135]

Las dificultades prácticas de determinar un margen operativo se pueden ilustrar con una curva de duración de carga típica. La planta marginal que es reemplazada por hidroenergía puede cambiar varias veces durante un día y muchas veces durante una semana. Dónde se encuentra realmente la hidroenergía en un orden de mérito depende de muchos factores, incluido qué tipo de plantas hidroeléctricas están disponibles. Las de filo de río siempre están en la parte inferior del orden de mérito, pero el valor del agua en un proyecto de almacenamiento puede ser bastante alto (considere el almacenamiento por bombeo) y en ese caso el proyecto estará más arriba en el orden.

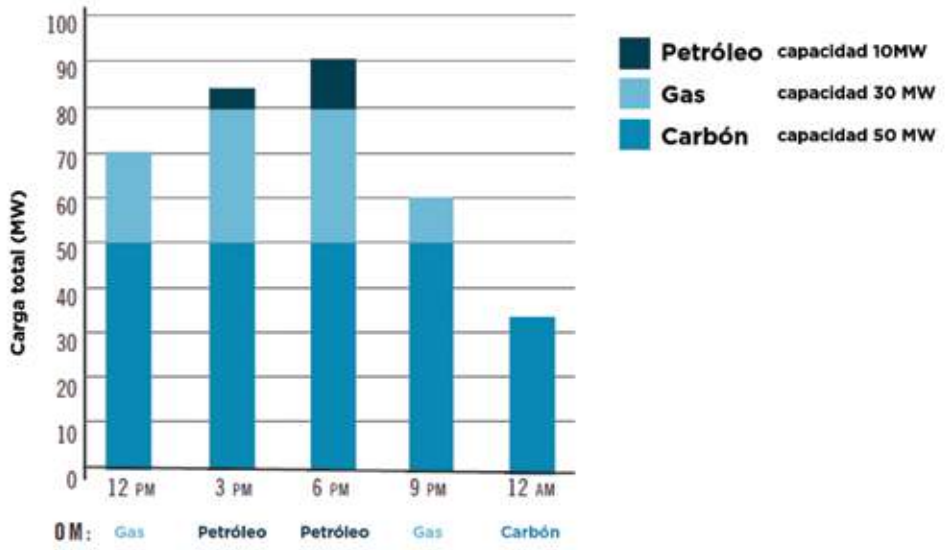


Figura 119.
Cambios en el margen operativo a lo largo de un día[136]

135 Ibíd.

136 WRI & WBCSD (2005) Guidelines for Quantifying GHG Reductions from Grid-Connected Electricity Projects.

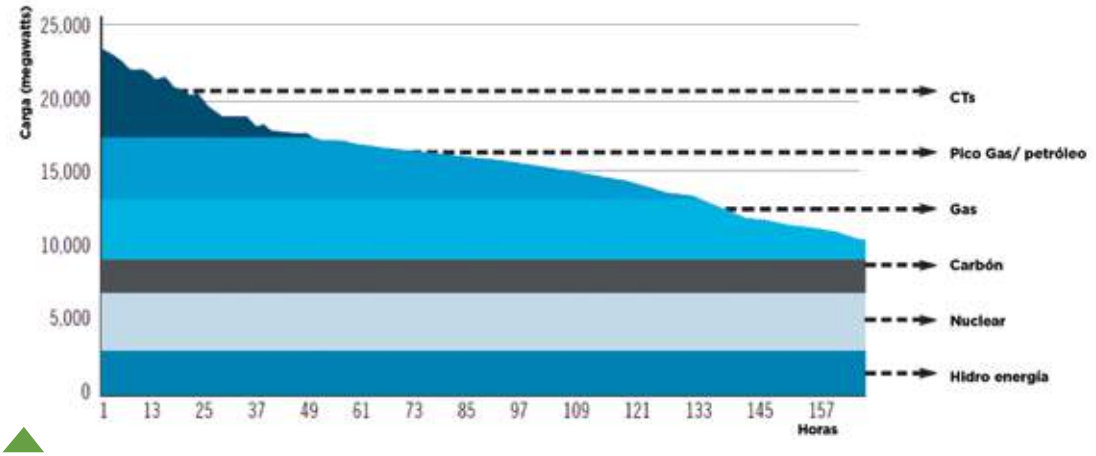


Figura 120.
Cambios en el margen operativo a lo largo de una semana[137]

En la práctica, se hacen suposiciones simplificadoras para calcular el desplazamiento de emisiones. El primer ejemplo a continuación es de dos proyectos MDL en Ecuador, donde los pesos de OM y BM se han determinado como 50% cada uno.

Proyecto	OM (tCO_{2e}/ MWh)	BM (tCO_{2e}/ MWh)	CM (tCO_{2e}/ MWh)	Densidad de potencia (W/m^2)	Generacion (GWh)	Reducción de emisiones (t CO_2/a)
Baba 42 MW	0,6539	0,5997	0,6268	4,2 (emisiones 54.180 t CO2/a)	602	318.991
Paute Sopladora 488 MW	0,7184	0,2213	0,4698	∞	2.807	1.318.625

Tabla 25. Emisiones evitadas por dos proyectos hidroeléctricos MDL pare el mercado ecuatoriano[138]

La tabla anterior también muestra la densidad de potencia para cada proyecto. En el MDL, los embalses hidroeléctricos deben cumplir ciertos umbrales de densidad de potencia para minimizar los riesgos asociados con la incertidumbre científica sobre las emisiones de GEI de los embalses (ver también la sesión 5.2). Plantas hidroeléctricas con densidades de potencia (calculadas a partir de la capacidad instalada de generación de energía, dividida por el área de superficie inundada) que sean:

- menores o iguales a 4 W/m^2, no pueden usar "metodologías actuales";
- mayores a 4 W/m^2 pero menores o iguales a 10 W/m^2, pueden utilizar las metodologías actualmente aprobadas, con un factor de emisión de 90 gCO_2e/kWh para las emisiones del embalse del proyecto; y,
- menores a 10 W/m^2, pueden utilizar las metodologías aprobadas actuales y las emisiones del proyecto del embalse pueden ignorarse.

137 Ibíd.

138 Documentos de diseño de los proyectos en http://cdm.unfccc.int/

En total, Ecuador registró 15 proyectos hidroeléctricos MDL, con una reducción total de emisiones de 3,2 millones de tCO_2e por año. El 77% de todos los CER de Ecuador provenían de proyectos hidroeléctricos. Las emisiones de GEI se abordan con más detalle en la sesión 5.2.

Un segundo ejemplo para calcular el desplazamiento de emisiones es de una empresa con una estrategia integral de cambio climático: Manitoba Hydro (MH)[139]. Actualmente, MH gestiona 5.000 MW de generación hidroeléctrica y ha estado agregando 2.500 MW de capacidad mediante el desarrollo de tres nuevas instalaciones hidroeléctricas: Wuskwatim, Keeyask y Conawapa.

Se estima que estos proyectos desplazarían las emisiones de GEI en aproximadamente 8,7 millones de toneladas de CO_2e anuales (según los valores de emisiones típicos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). Los valores estadounidenses se aplican porque los proyectos de hidroenergía en Canadá a menudo son grandes, pues a veces superan varios cientos de megavatios. Estos incrementos son mucho mayores que los requisitos de carga actuales en Manitoba y MH necesita encontrar mercados de exportación en los Estados Unidos hasta que Manitoba pueda llegar a utilizarlos en su totalidad.

Las exportaciones de electricidad de Canadá han contribuido a importantes reducciones de GEI fuera del país. Desde 2005, las exportaciones anuales de electricidad por MH han promediado más de 10.000 GWh por año. MH también considera tecnologías emergentes de electricidad adicionales en su planificación de generación, e investiga activamente y apoya el desarrollo de su concepto, así como los programas de eficiencia energética y la rehabilitación de las instalaciones existentes.

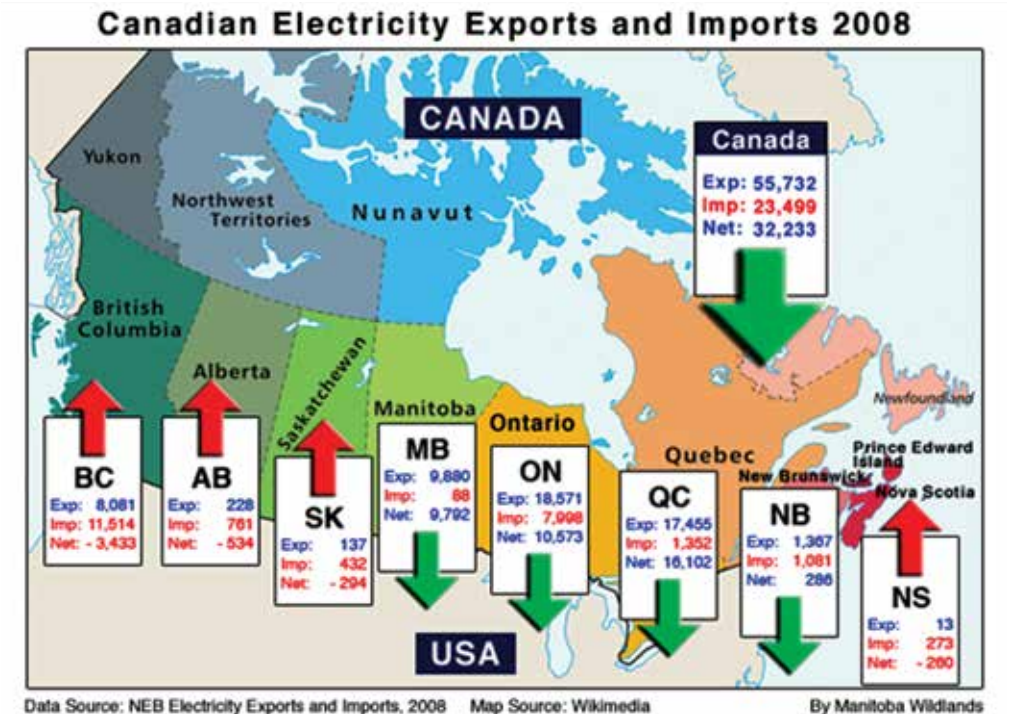


Figura 121.
Exportaciones e importaciones de electricidad canadiense en el 2008[140]

139 Manitoba Hydro (2015) Manitoba Hydro Climate Change Report

140 NEB Electricity Exports and Imports (2008)

En las audiencias públicas sobre alternativas para sus planes de expansión, el potencial de generación de GEI de las diferentes alternativas jugó un papel importante. Se compararon cuatro alternativas principales, desde un escenario preferido con desarrollo hidroeléctrico completo, hasta un escenario de gas natural. El siguiente gráfico muestra cuáles componentes principales de generación se encargarían en qué año, en los cuatro escenarios.

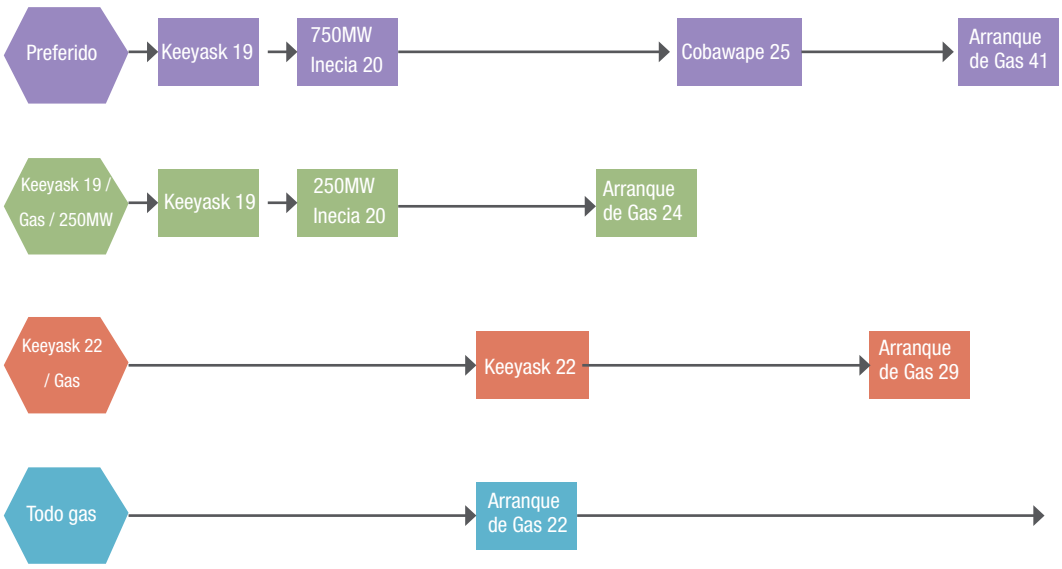


Figura 122.
Cuatro escenarios de expansión Manitoba Hydro[141]

Para los cuatro escenarios, la FIgura 123 a continuación muestra la reducción de las emisiones de GEI frente a una hipotética alternativa "sin proyecto". La reducción en el desplazamiento de GEI a largo plazo en todos los escenarios se debe al hecho de que, a medida que crece la demanda en Manitoba, se exporta menos energía.

Pato rojizo andino ©PNCCza, Ministerio del Ambiente y Agua

141 Manitoba Hydro (2013) Needs for and Alternatives to (NFAT) report.

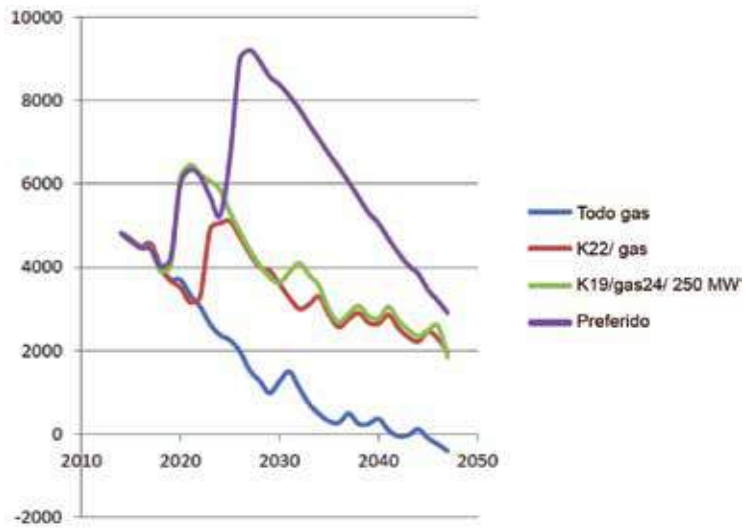


Figura 123.
Reducción de emisiones de GEI relacionadas con la generación térmica a lo largo del tiempo (´000 t de CO_2)[142]

En la valoración de los diferentes escenarios, se supuso que MH tendría que pagar por sus emisiones de carbono. El momento y el nivel de los cargos dependen de las políticas futuras en Manitoba y Canadá con respecto a los nuevos impuestos a las emisiones, o la membresía en un sistema de límite y comercio. En ausencia de políticas definidas, se consideró el precio del carbono de otras regiones. Para el análisis del escenario de referencia, se supuso que el cargo por emisiones de GEI por la generación térmica a gas natural era de aproximadamente CAD 5 por tonelada de CO_2 en 2015, que aumentaría a aproximadamente CAD 25 por tonelada de CO_2 para 2048. Sin embargo, estos cargos asumidos no reflejan el costo social total de las emisiones de GEI. Estimaciones recientes del costo social son más altas que los cargos por emisiones de carbono.[143] Los cuatro escenarios finalmente se compararon con respecto a: (a) los costos financieros esperados, y (b) los costos externos esperados de las emisiones de GEI. La Tabla 26 muestra los ahorros del escenario preferido en comparación con los otros tres.

142 Ibíd.

143 Manitoba Hydro NFAT report: "Environment Canada ha estimado que el costo social de las emisiones de GEI, basado en el valor presente de los costos esperados del cambio climático, actualmente supera los USD 28 / tonelada de CO_2, llegando a casi USD 60 / tonelada de CO_2 para 2050 (en dólares constantes de 2011). Incluyendo la consideración de la disposición a pagar para evitar inciertos, pero potencialmente catastróficos, el impacto del cambio climático eleva el costo estimado a más de USD 112 / tonelada de CO_2. Del mismo modo, un equipo interinstitucional del gobierno de los Estados Unidos Estimó recientemente que el costo social de las emisiones de GEI fue de USD 38 / tonelada de CO_2 en 2015 y aumentó a USD 71 / tonelada de CO_2 en 2050 (en dólares constantes de 2007), y reconoció que el costo sería mucho mayor. más que la gente está dispuesta a pagar para evitar daños en el futuro (cuanto menor es la tasa de descuento), y más está dispuesta a pagar para evitar riesgos inciertos y catastróficos ".

	Plan de desarrollo preferido	**K19/G24/250MW**	**K22/Gas**	**AB Gss**
Costo social estimado de emisiones de GEI	188.8	472.6	427.6	620.4
Impuesto de carbón y pagos de cambio de carga de carbón	38.6	113.8	103.1	149.9
Costo externo de emisiones de GEI	150.2	358.8	324.5	470.5
Diferencia del plan de desarrollo preferido	::::::	208.6	174.3	320.3

Tabla 26. Costo externo de las emisiones de GEI relacionadas con la generación térmica de Manitoba (en millones de dólares canadienses)

Hasta el momento hemos analizado el desplazamiento directo de las emisiones. Pero los beneficios de la hidroenergía para la mitigación de los GEI también pueden ser indirectos, al permitir que otras energías renovables ingresen al mercado. La siguiente tabla del IPCC muestra las características de diferentes tecnologías renovables. Un concepto clave en la tabla es el crédito por capacidad, que es otra forma de expresar "capacidad firme". Por ejemplo, si se instalan 10 GW de plantas de energía eólica en una región, y su crédito por capacidad es del 10%, entonces habrá una reducción de 1 GW en la cantidad requerida de otras plantas, en comparación con una situación sin capacidad eólica.

Tecnología		Planta Tamaño Rango	Variabilidad: Tiempo característico Escala de poder Operación del sistema	Despachabilidad	Geografía Diversidad Potencial	Predicción	Capacidad del rango de factor	Capacidad de rango crediticio	Potencia activa, control de frecuencia	Tensión, control de potencia reactiva
	(MW)	Escala de tiempo	Ver leyenda	Ver leyenda	Ver leyenda	%	%	Ver leyenda	Ver leyenda	
Bioenergía		0.1 – 100	Estación (Depende de la disponibilidad de la biomasa)	+++	+	++	50 – 90	Similar al térmico y al CHP	++	++
Energía solar	PV	0.004 – 100 modular	Minutos al año	+	++	+	12 - 27	<25 - 75	+	+
	CSP con almacenamiento térmico	50 – 250	Horas al año	++	+**	++	35 – 42	90	++	++
Energía geotérmica		2 - 100	años	+++	N/A	++	60 - 90	Similar al térmico	++	++
Hidroenergía	caudal del rio	0.1 - 1500	Horas al año	++	+	++	20 - 95	0 - 90	++	++
	Reservorios	1 – 20000	Días al año	+++	+	++	30 - 60	Similar al térmico	++	++
Energía oceánica	Rango de marea	0.1 – 300	Horas al día	+	+	++	22.5 – 28.5	< 10	+	++
	Corriente de marea	1 – 200	Horas al día	+	+	++	19 - 60	10 - 20	+	++
	ola	1 – 200	Minutos al día	+	++	+	22 - 31	16	+	+
Energía eólica		5 - 300	Minutos al día	+	++	+	20 – 40 en tierra, 30 – 45 costa fuera	5 - 40	+	++

Tabla 27. Características de las diferentes energías renovables para la integración en la red[144]

144 Kumar et al. (2011)

A modo de ilustración, el siguiente cuadro muestra la producción de dos parques eólicos durante una semana, sin períodos de generación. También muestra que los dos parques tienen perfiles de generación ligeramente diferentes. Mientras más parques eólicos estén conectados en una región geográfica más amplia, mayor será su capacidad de crédito.

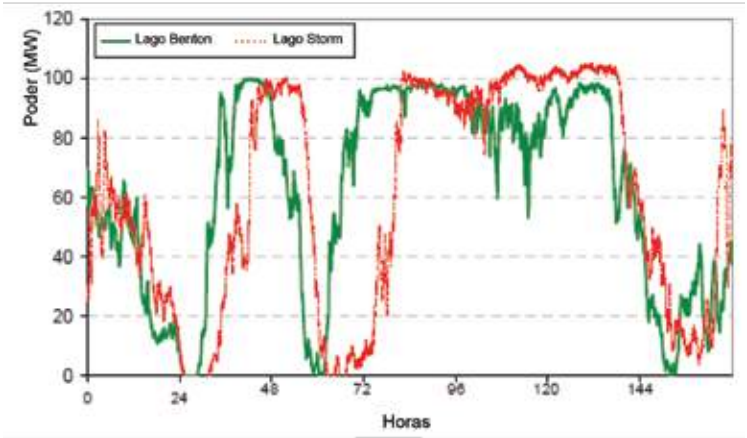


Figura 124.
Producción de energía eólica durante una semana en dos parques eólicos en el medio oeste de Estados Unidos (CEATI 2011)

La variabilidad del viento es importante en términos de regulación del voltaje (de segundos a minutos), el seguimiento de la carga (decenas de minutos a horas) y días (con respecto a la programación de generación). En todas estas escalas de tiempo, la hidroenergía puede respaldar la integración eólica.

En Dinamarca, por ejemplo, la alta variabilidad de la generación eólica se gestiona en parte mediante fuertes interconexiones (1,7 GW) con Noruega, donde existen importantes embalses de hidroenergía. Técnicamente, solo Noruega tiene un potencial a largo plazo para agregar instalaciones de almacenamiento por bombeo en el rango de 10 a 25 GW y para permitir el almacenamiento de energía durante períodos desde horas a varias semanas en sus embalses.[145]

	Total	Viento	Hidroenergía	Termal
Dinamarca	32	15	-	8
Noruega	147	4	140	3

Tabla 28. Generación de energía en 2018 en Dinamarca y Noruega (TWh)

¿Cuán relevantes son estas consideraciones para Ecuador y los países vecinos o, en otras palabras, cuánto potencial existe en estos países para la reducción de emisiones de GEI por medio de la hidroenergía? Los tres factores más relevantes para responder esta pregunta son:

- los fósiles en la combinación energética existente (margen operativo), más se los puede reemplazar mediante una adición determinada de energías renovables;
- cuanto mayor sea el crecimiento de la demanda, más rápido se introducirá la nueva capacidad (margen de construcción); y,

145 IEA - ENARD (2010)

- cuanto mayor sea el potencial restante, tanto para la hidroenergía como para las energías renovables variables que requieren respaldo, más factibles serán las adiciones de capacidad.

Una evaluación cualitativa de estos factores muestra que la hidroenergía tiene un papel potencialmente significativo para la mitigación del cambio climático.

	Alta proporción de combustibles fósiles en la combinación energética	**Crecimiento económico**	**Alto potencial para renovables**
Ecuador	+	++	++
Perú	++	++	++
Colombia	+	++	++
Bolivia	++	+++	++

Tabla 29. Posibles emisiones evitadas de la hidroenergía en los países andinos

Durante el período 2007-2017, tanto el consumo de electricidad como las emisiones de carbono han aumentado más rápidamente en Ecuador que en el resto de América Latina en general. En términos del crecimiento futuro de la demanda de electricidad, el mejor predictor es probablemente la brecha entre el consumo actual per cápita y los promedios globales o regionales. Esto supone que la mayoría de los países eventualmente alcanzarán niveles similares de consumo, y esta suposición puede ser más confiable que estimar el crecimiento económico per cápita y la relación entre el PIB y el consumo de energía. En este sentido, el consumo per cápita en la mayoría de los países andinos está por debajo del promedio regional de América Latina y el Caribe, lo que indica que todavía hay un margen sustancial para el crecimiento.

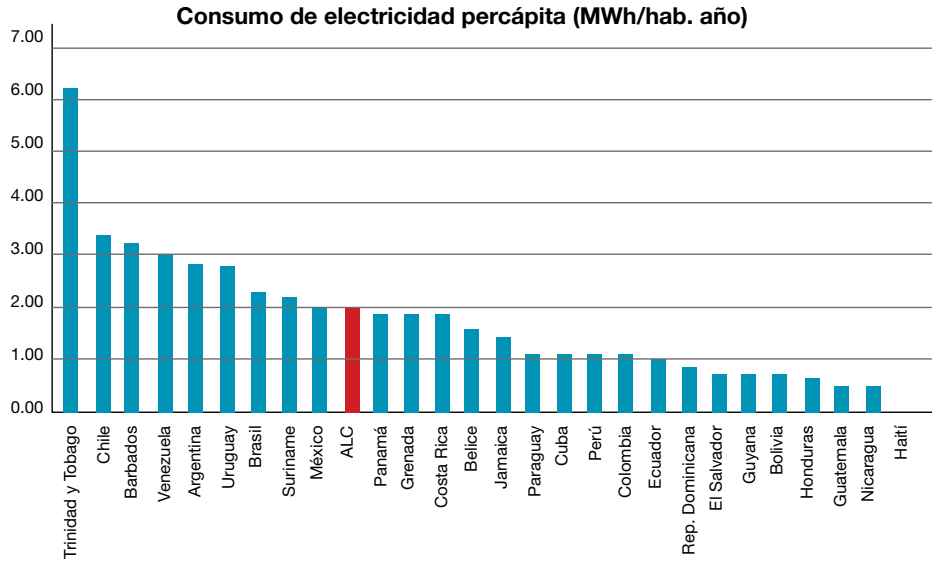


Figura 125. Consumo de electricidad per cápita en América Latina y el Caribe (OLADE)

En el futuro, no solo la hidroenergía, sino también la eólica y la solar desplazarán la generación térmica y reducirán las emisiones de GEI en los países andinos. Esto dependerá de varios factores, incluidos los siguientes:

- La calidad y previsibilidad de los recursos solares y eólicos. La generación solar es bastante predecible y alcanza su punto máximo durante las horas de alta demanda. La generación eólica es menos predecible. El potencial solar y eólico en Ecuador es de calidad media. Hay países en América del Sur (como Argentina para la energía eólica y Chile para la energía solar) con mucho mejores recursos.[146]
- El nivel de penetración en la red. Solo en niveles mucho más altos de penetración en la red, la integración de las energías eólica y solar requeriría un análisis y gestión detallados, lo que podría causar costos adicionales para ser respaldadas por la hidroenergía y el gas natural, así como para la integración de la transmisión o la modificación de las operaciones.

En resumen, las emisiones evitadas por la hidroenergía dependen de las características específicas del sistema eléctrico servido, generalmente descrito por el margen operativo y de construcción, como en el MDL. Los beneficios de las emisiones evitadas pueden estimarse por medio del análisis económico y también pueden proporcionar ingresos financieros. Los beneficios también incluyen el soporte para la expansión de nuevas energías renovables, que requieren respaldo y almacenamiento de energía.

146 https://globalsolaratlas.info/; https://globalwindatlas.info/

Sesión 5.2 Emisiones provenientes de la hidroenergía

Propósito y objetivos de aprendizaje	La sesión proporciona una introducción a las emisiones de GEI causadas por proyectos hidroeléctricos, en una perspectiva de ciclo de vida. Se proporcionan ejemplos de proyectos hidroeléctricos del norte y tropicales, y se revisa con más detalle el componente clave de las emisiones de GEI (emisiones de los embalses). Los participantes obtendrán un sentido de escala de tales emisiones en comparación con las de otras fuentes de electricidad.
Contenido	• ¿Qué tipos y cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero produce la hidroenergía? • ¿Cómo se aplica esto a la Región Andina?
Aspectos clave	Si bien las emisiones de GEI de la construcción, la operación y el desmantelamiento de la hidroenergía con frecuencia son bajas, no son insignificantes, especialmente en climas cálidos. Existen técnicas para predecir y mitigar parcialmente las emisiones.
Temas de discusión y ejercicios	¿Cómo las decisiones de ubicación, diseño y operación pueden o deben tomar en cuenta las emisiones de GEI de los embalses?
Recursos adicionales	Para un estudio de caso sobre emisiones de embalses: Documento 5.2.2 - Deshmukh (2012) Greenhouse gases (CH_4, CO_2 and N_2O) emissions from a newly flooded hydroelectric reservoir in subtropical South Asia: case of Nam Theun 2 Reservoir, Lao PDR (capítulos 7 y 8).
Lecturas clave	Documento 5.1.2 - Manitoba Hydro (2015) Climate Change Report. Documento 5.2.1 - World Bank (2017) Greenhouse Gases from Reservoirs Caused by Biogeochemical Processes.

Una evaluación del ciclo de vida (ECV) es una técnica para evaluar los impactos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto, desde la cuna hasta la tumba (es decir, desde la extracción de materia prima hasta el procesamiento, fabricación, distribución, uso, reparación y reposición de materiales, mantenimiento y eliminación o reciclaje). Las ECV pueden ayudar a evitar una perspectiva limitada sobre las preocupaciones ambientales ya que permiten:

- Compilar un inventario de todos losregistros relevantes de energía y materiales, y las descargas ambientales.
- Evaluar los posibles impactos asociados con los registros y las descargas identificadas.
- Interpretar los resultados para ayudar a tomar decisiones más informadas.

A veces, la ECV está integrada en las evaluaciones de impacto ambiental. La ECV también se puede aplicar al producto "electricidad". Los impactos del ciclo de vida generalmente se miden por unidad (como un kWh). Con frecuencia, el impacto de mayor interés son las emisiones de GEI. La siguiente tabla muestra el rango de datos recientes sobre el ciclo de vida de las emisiones de GEI de varias tecnologías de generación de electricidad.

Valores	Bio-poder	Solar		Energía geotérmica	Hidroenergía	Energía Océanos	Energía Vientos	Energía Nuclear	Gas Natural	Petróleo	Carbón
		PV	CSP								
Mínimo	-633	5	7	6	0	2	2	1	290	510	675
25	360	29	14	20	3	6	8	8	422	722	877
50	18	46	22	45	4	8	12	16	469	840	1001
75	37	80	32	57	7	9	20	45	548	907	1130
Máximo	75	217	89	79	43	23	81	220	930	1170	1689
CCS min	-1368								65		98
CCS max	-594								245		396

Note: CCS; CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO PV FOTOVOLTAICO CSP ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA

Tabla 30. Emisiones de GEI durante el ciclo de vida de las tecnologías de generación en gCO_2e/kWh[147]

Las fases de un proyecto hidroeléctrico que se considerarían en una ECV incluyen: construcción, operación y mantenimiento, y (a veces) desmantelamiento.

- En la fase de construcción, las emisiones primarias de GEI provienen de la producción y el transporte de materiales (por ejemplo, concreto, acero, etc.) y del uso de equipos y materiales de obra civil para la construcción de la instalación (por ejemplo, motores a diésel).
- En la fase de operación y mantenimiento, las actividades de operación y mantenimiento que pueden generar emisiones de GEI son, por ejemplo, sistemas de calefacción o refrigeración de edificios, unidades auxiliares de generación a diésel o transporte de personal en el sitio para actividades de mantenimiento. Además, debe considerarse el cambio en el uso de la tierra inducido por la creación de embalses y la modificación asociada del ciclo del carbono terrestre, que puede conducir a emisiones netas de GEI del embalse durante la operación.
- Las presas también pueden ser clausuradas por razones económicas, de seguridad o ambientales. Hasta ahora, solo se han eliminado algunas presas relativamente pequeñas, principalmente en los Estados Unidos y en Europa. Las emisiones relacionadas con esta etapa rara vez se han incluido en las ECV.

Las diferentes actividades en los diversos métodos de hidroenergía (embalse, filo de agua y almacenamiento por bombeo) generarán diferentes valores de ECV (Figura 126).[148] En la práctica, los factores naturales (como la ubicación de una planta) y las decisiones de gestión tienen una influencia significativa sobre las emisiones de GEI en cada una de estas fases, lo que explica la amplia gama de estimaciones que se encuentra en la literatura. Asimismo, la vida útil de un proyecto influye fuertemente en cuántos años se necesitan para amortizar las emisiones por construcción y desmantelamiento.

147 http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Annex_II.pdf

148 Kumar et al. (2011)

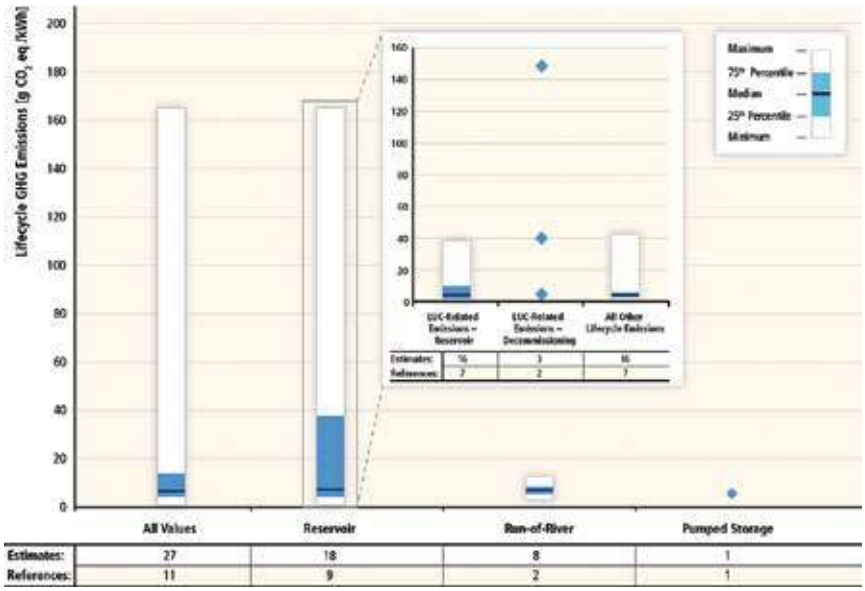


Figura 126.
Emisiones del ciclo de vida de la hidroenergía: datos empíricos[149]

La Figura 127 sobre Manitoba Hydro muestra un ejemplo específico de las emisiones de GEI en sus nuevos proyectos hidroeléctricos, en comparación con las tecnologías de viento, gas y carbón.

Obra de captación de HidroVictoria ©Francisco Clavijo, AICCA

149 Manitoba Hydro (2013) Manitoba Hydro Climate Change Report

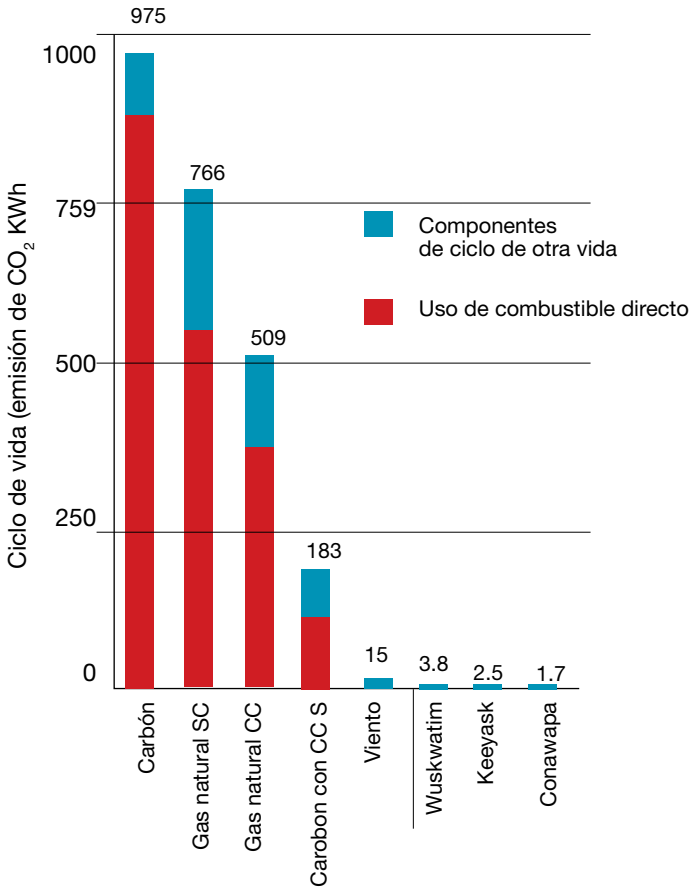


Figura 127.
Emisiones del ciclo de vida para diversas tecnologías de generación[150]

Desarenador y sistema de conducción HidroVictoria ©Francisco Clavijo, AICCA

150 Manitoba Hydro (2013) Needs for and Alternatives to report, Appendix 7.3

El análisis de las emisiones de GEI de la instalación de Keeyask muestra que más de la mitad de estas se deben al cambio en el uso del suelo (pérdida de vegetación y emisiones del embalse) y casi otro 50% proviene solamente de la fase de construcción.

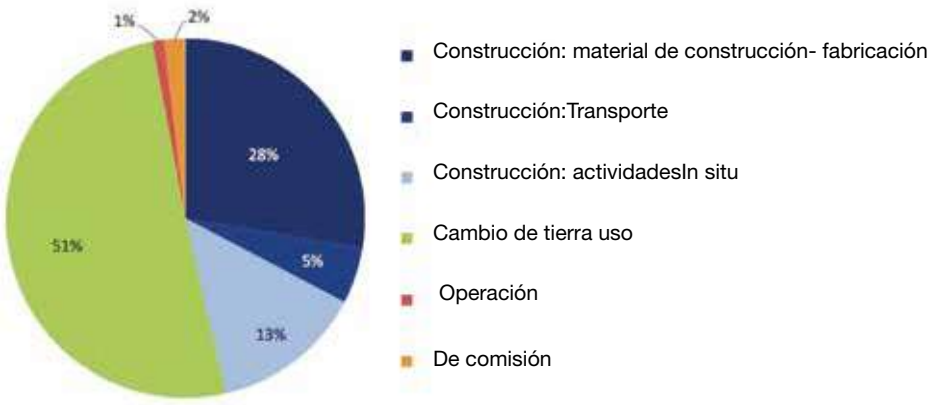


Figura 128.
Desglose de las emisiones del ciclo de vida de Keeyask

Otra infraestructura asociada con los proyectos de Manitoba Hydro –por ejemplo, una nueva línea principal de transmisión– también ha sido sometida a análisis de GEI (Figura 129).[151] También en este caso, la fase de construcción y edificación y los cambios en el uso del suelo representan aproximadamente tres cuartas partes de las emisiones totales de GEI.

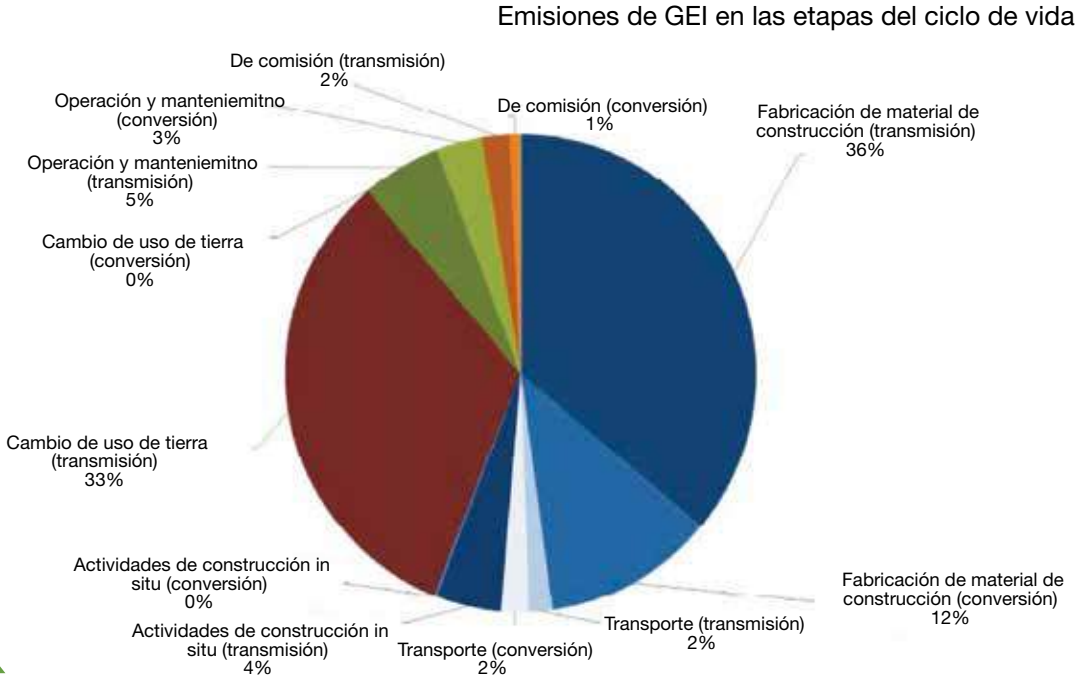


Figura 129.
Emisiones del ciclo de vida de la nueva línea de transmisión Manitoba Hydro

151 https://www.hydro.mb.ca/regulatory_affairs/projects/bipole3/pdfs/eis/BPIII_Greenhouse_Gas_Lifecycle_Assessment_Technical_Report_November_2011.pdf

Para los proyectos de embalses, los componentes más importantes en las ACV son las actividades que involucran al embalse en sí. Ahora pasamos a comprender mejor esas emisiones. Como se muestra en Figura 130, las vías para las emisiones de GEI a la atmósfera desde los embalses incluyen:[152]

- Flujo difusivo: descarga de los GEI CO_2, CH_4 y N_2O de la interfaz aire-agua de un cuerpo de agua.
- Burbujeo: descarga en forma de burbujas de gas, como resultado de los flujos de burbujas de carbonatación, evaporación o fermentación. Esta es una vía importante para el CH_4, a través de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica en los sedimentos, principalmente en aguas poco profundas.
- Desgasificación: una emisión que ocurre en la descarga de salidas de bajo nivel (incluidas las aguas de cola de la turbina) inducida por cambios de presión drásticos justo aguas abajo de la(s) salida(s) del embalse.
- Aumento de los flujos difusivos a lo largo del curso del río aguas abajo de un embalse.

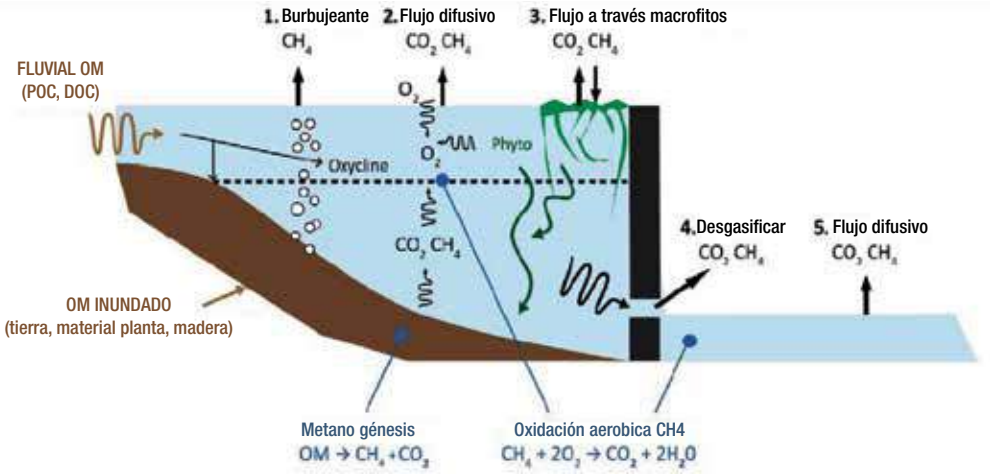


Figura 130.
Vías de emisión de GEI en un embalse con un hipolimnion anóxico

Algunos de los principales parámetros o factores que afectan la producción de GEI son:

- el carbono y los nutrientes descargados en el embalse;
- la lluvia;
- el tipo de suelo y uso de la tierra;
- la biomasa de plantas, algas, bacterias y animales en el embalse y en la zona de extracción;
- la temperatura de agua;
- la profundidad del agua;
- el tiempo de residencia;
- la estratificación del cuerpo del embalse;
- la edad del embalse;
- la exposición de la zona de extracción (cambios en la profundidad del agua);
- la velocidad y dirección del viento;
- la presencia de salidas de bajo nivel;
- la mayor turbulencia aguas abajo de la presa asociada con estructuras auxiliares, por ejemplo, aliviaderos;
- la forma del embalse (relación orilla - radio de superficie);
- la profundidad del agua.

152 IHA (2010) Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs

Persiste un debate significativo sobre la importancia de las contribuciones de GEI de los embalses. El país con la investigación más profunda puede ser Canadá. En un estudio, se evaluaron las mediciones de los flujos de carbono de 57 embalses hidroeléctricos en cuatro provincias canadienses (Quebec, Manitoba, Columbia Británica y Terranova / Labrador). De estos embalses medidos, se seleccionó un subconjunto de 25 para desarrollar una curva de emisión nacional para un período de 50 años después de llenar el embalse (Figura 131).[153] Esto indicaría que las emisiones disminuyen con el tiempo y que los embalses eventualmente pueden convertirse en un sumidero de carbono.

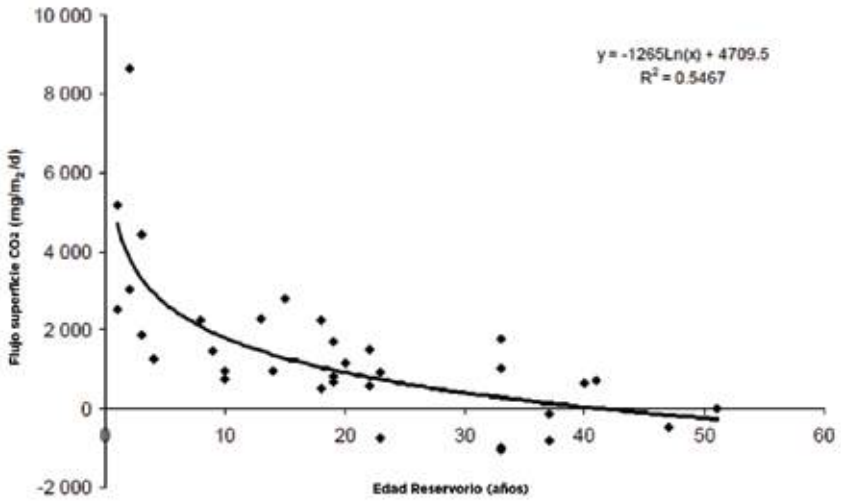


Figura 131.
Emisiones de GEI de embalses en Canadá a lo largo del tiempo

En un ejemplo del sudeste asiático, se examinaron las emisiones de GEI del embalse Nam Theun 2 en Laos. La construcción de la presa se completó en 2008 y el llenado del embalse terminó en 2010. Este fue uno de los primeros estudios que evaluó sistemáticamente las emisiones de GEI del área del embalse antes ser llenado, a fin de poder proporcionar datos de emisiones netas en lugar de brutas.

La Tabla 31 proporciona los valores de GEI previos y posteriores al llenado para el área del embalse.[154].Las emisiones aumentaron significativamente (casi 10 veces más) después de la inundación. Los factores de emisión de GEI por kWh fueron 310 y 300 gCO_2e para los años 2010 y 2011. Al comparar estos valores con la Tabla 32 y la Figura 126 antes mencionada, debe tenerse en cuenta que: (a) estos son valores para los primeros años después del llenado, cuando se esperan emisiones excepcionalmente altas que probablemente no sean representativas de la vida útil total del embalse, y (b) se esperarían emisiones superiores a la media de un embalse tropical poco profundo como Nam Theun 2.

153 Canada (2011) National Inventory Report

154 Deshmukh et al. (2012) GHG budget in a young subtropical hydroelectric reservoir: Nam Theun 2 case study

	Intercambio preembalse	Intercambio posembalse		Huella neta de GEI	
GEI	**2008**	**2010**	**2011**	**2010**	**2011**
Total CO_2	- 73 ± 225	1307 ± 244	1551 ± 197	1380 ± 332	1624 ± 299
TotalCH_4- CO_{2eq}	7 ± 11	768 ± 206	473 ± 91	761 ± 206	466 ± 92
Total N_2OCO_{2eq}	345 ± 258	93 ± 162	109 ± 170	-252 ± 305	-236 ± 309
Total CO_{2eq}	279 ± 343	2168 ± 358	2133 ± 276	1889 ± 496	1854 ± 440

Tabla 31. Emisiones de GEI del embalse Nam Theun 2

La base de datos más completa de emisiones, utilizando una metodología comparable, fue construida por UNESCO-IHA en el proceso de desarrollo y aplicación de la herramienta de resolución G-Res.[155] La Figura 132 muestra que la mayoría de los embalses tienen emisiones de menos de 100 gCO_2/kWh y solo unos pocos valores atípicos tienen emisiones más altas. Los embalses con una alta densidad de potencia generalmente tienen una menor intensidad de emisiones. La ubicación del embalse en diferentes zonas climáticas también parece desempeñar un papel importante.

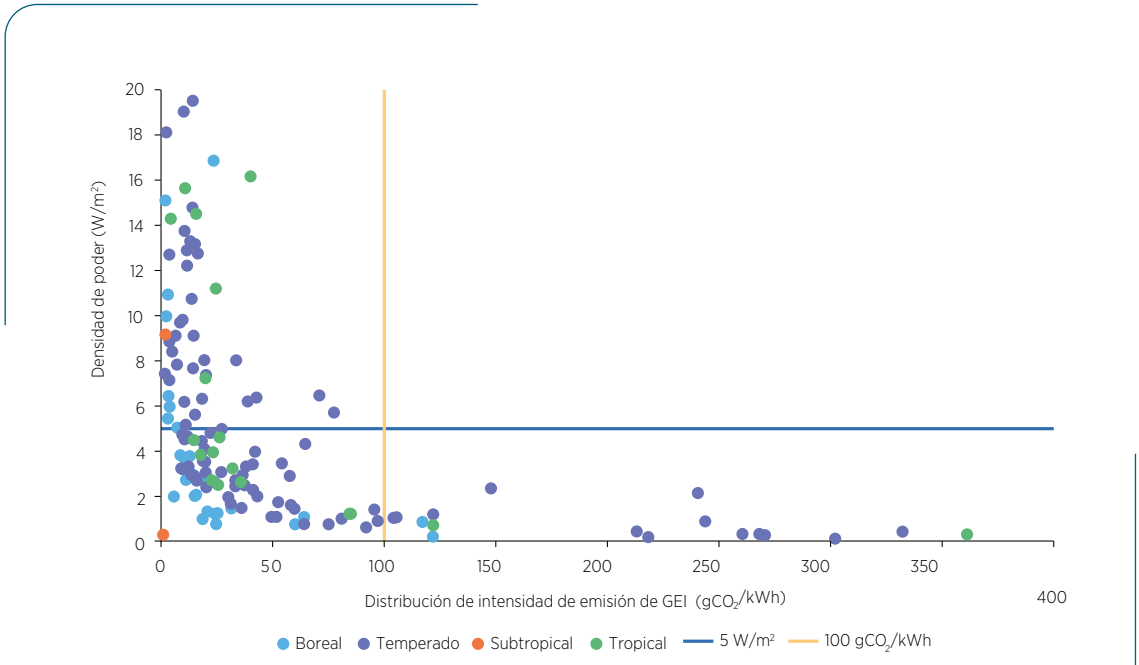


Figura 132.
Densidad de potencia e intensidad de emisiones de GEI de una muestra de embalses (WB 2017)

155 https://g-res.hydropower.org/

Con base en estos datos y en mediciones de campo, la herramienta G-Res puede estimar las emisiones netas de los embalses existentes y futuros. Dichas estimaciones son cada vez más necesarias para los proyectos hidroeléctricos, por ejemplo, en el contexto de la iniciativa de los Bonos Climáticos[156] o para inventarios de gases de efecto invernadero.

Un análisis de riesgos puede ayudar a predecir las emisiones de GEI de los embalses y determinar si puede ser necesaria una evaluación completa de las emisiones. El primer paso en este análisis de riesgos debe incluir los factores que determinan el suministro de carbono. Estos incluyen:

- el material orgánico en la captación,
- el uso de la tierra en la captación,
- la biomasa en el embalse y áreas de extracción,
- las prácticas agrícolas (que influyen en las reservas de carbono y nutrientes y en la entrada de carbono y nutrientes),
- la lluvia.

El segundo paso incluye factores que afectan la capacidad de crear GEI, como:

- el tiempo de residencia,
- la temperatura,
- la estratificación,
- la exposición de zona de extracción,
- la edad del embalse,

El tercer paso incluye factores que influyen en la capacidad de liberar GEI, como:

- el viento,
- la profundidad del agua,
- la forma del embalse (relación superficie - radio de orilla),
- las salidas de bajo nivel.

La ubicación, el diseño y las prácticas operativas influyen en todos estos factores.

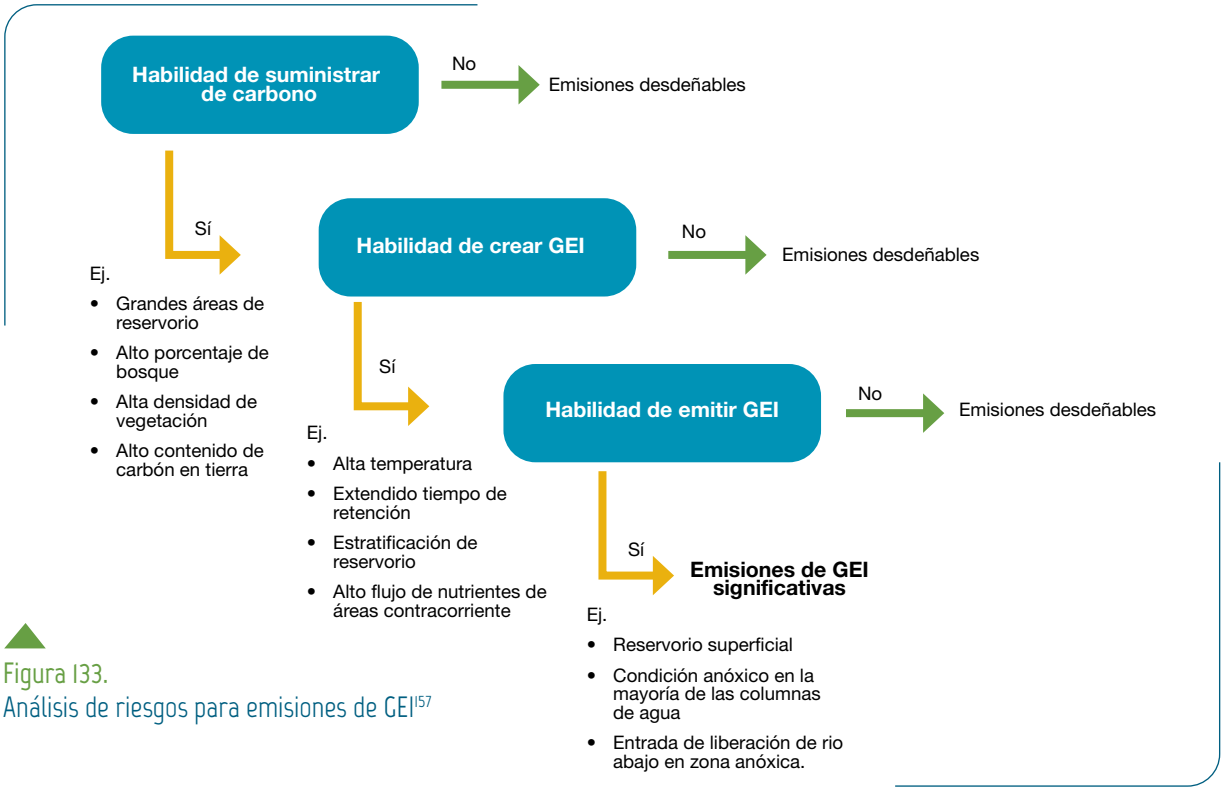


Figura 133.
Análisis de riesgos para emisiones de GEI[157]

156 https://www.climatebonds.net/hydropower

157 WB (2013) basado en IHA (2010) Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs.

Represa Labrado ©Elecaustro

Módulo 6.
Implicaciones para el desarrollo sostenible en la Región

Sesión 6.1 Sistema de energías sostenibles

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión aborda la sostenibilidad en una escala intermedia, entre el proyecto individual y el nivel macro de toda la sociedad. Analiza las proyecciones de desarrollo del sector eléctrico en la Región Andina y considera las opciones de políticas para influir en las direcciones que tomarán los sectores eléctricos. Se discutirá el papel cuantitativo y cualitativo de la hidroenergía dentro de los sectores de energía sostenible. Los participantes aprenderán a apreciar la complejidad de las decisiones de inversión en energía en un contexto donde son inciertos no solo el clima, sino también muchos otros factores.
Contenido	• ¿Qué políticas se pueden usar para promover la sostenibilidad en un sector energético? • ¿Qué escenarios se proyectan para los sectores de energía en los países andinos? • ¿Cuál es el papel esperado de la hidroenergía en estos sectores?
Aspectos clave	La generación de energía en los países andinos se expandirá rápidamente. Las decisiones de inversión se toman bajo múltiples incertidumbres. Las políticas sectoriales pueden influir en las vías de crecimiento.
Temas de discusión y ejercicios	• ¿Cuán ambiciosas deberían ser las políticas sectoriales para lograr un sector energético con bajas emisiones de carbono y transformado cualitativamente? • ¿Cómo afectaría esto la posición competitiva y el papel de la hidroenergía en los sistemas de energía?
Lecturas clave	Documento 6.1.1 - BID (2017) La Red del futuro: desarrollo de una red eléctrica limpia y sostenible para América Latina.

Esta sesión aborda la sostenibilidad a una escala intermedia de nivel sectorial, entre el proyecto individual y el nivel macro de toda la sociedad. Un sistema de energía sostenible incluye proyectos de energía sostenible, así como políticas sostenibles y marcos regulatorios.

Los objetivos de política típicos para el sector eléctrico incluyen:

- Proporcionar acceso universal al servicio, para poner a disposición los beneficios socioeconómicos de la electrificación rural.
- Garantizar la seguridad del suministro, ya que la confiabilidad aumenta los incentivos para invertir y reduce los costos por las interrupciones del suministro.
- Uso de recursos locales para reducir la dependencia de las importaciones.
- Minimizar los costos directos de suministro mediante una planificación de menor costo y/o mediante la competencia.
- Minimizar las externalidades negativas (costos indirectos).

Estos objetivos de política pueden diferir según la localización (es decir, en las naciones en desarrollo o en las desarrolladas) y el momento (es decir, la etapa de desarrollo del sector eléctrico). Por ejemplo, la importancia de utilizar los recursos locales se amplifica en países con situaciones de seguridad difíciles. En Israel, por ejemplo, la seguridad y la independencia energética tienen prioridad frente a todos los demás objetivos.[158]

La hidroenergía puede respaldar, pero también presenta desafíos para algunos de estos objetivos de política. Por ejemplo, la seguridad del suministro depende de la confiabilidad de los flujos, la disponibilidad de almacenamiento y las capacidades de generación suficientes. La hidroenergía es un recurso local, pero los ríos transfronterizos presentan algunos límites a la independencia de su manejo. Las externalidades negativas, como los impactos ambientales y sociales, pueden ser altas, incluso si hay bajas emisiones de GEI.

Los objetivos estándar de las políticas pueden modificarse ante el cambio climático. En lugar de simplemente proporcionar acceso universal a la calefacción, un objetivo modificado, más ambicioso, puede ser proporcionar electricidad para la calefacción, en lugar de utilizar combustibles fósiles. Para garantizar la seguridad del suministro, los generadores de emergencia a diésel pueden reemplazarse por líneas de transmisión reforzadas. De hecho, muchos países han actualizado sus políticas del sector energético en los últimos años para tener en cuenta el cambio climático.

Se pueden utilizar varios instrumentos de política en el sector eléctrico para alentar el crecimiento de las tecnologías renovables y superar las barreras para la implementación, por ejemplo:

- planificación indicativa o vinculante;
- políticas estructurales y de competencia;
- regulación de las compañías eléctricas;
- licenciamiento de centrales eléctricas y líneas de transmisión;
- impuestos, subsidios y financiación a empresas y consumidores;
- inversión de empresas estatales; y
- medidas para asegurar y expandir el suministro de combustible.

La Tabla 32 muestra algunos ejemplos específicos de posibles políticas sectoriales en los países en desarrollo y una serie de barreras por superar.

158 Israeli Ministry of National Infrastructures, Energy, and Water Resources. 2014. http://energy.gov.il/English/Subjects/RenewableEnergy/Pages/GxmsMniRenewableEnergyAbout.aspx

Cuenca alta del Río Quijos, Napo ©Francisco Clavijo, AICCA

Reforma política	Barreras por superar
Eliminar los subsidios, para garantizar un uso más eficiente de la electricidad. Permitir a las empresas de generación cobrar tarifas competitivas.	Preocupaciones sociales de que aumentar las tarifas afectará el acceso a energía asequible.
Reformar el sistema de planificación para que no perjudique la energía limpia.	Dependencia histórica de fuentes fósiles. Preocupación por la fiabilidad de las fuentes renovables.
Impuesto sobre el carbono o tarifas de sustentación para aumentar la competitividad renovable.	Oposición política alas facturas del consumidor crecientes. Requisitos para obtener niveles correctos para inducir cambios.
Capacidad de planificación a largo plazo.	Las limitaciones de capital y los cuellos de botella de la oferta significan que las perspectivas a corto plazo dominan.
Reducir las pérdidas en el sistema T&D, incluida la reducción en el uso no autorizado.	Restricciones de capital para actualizar. Falta de capacidad administrativa para hacer frente a la falta de pago o robo.
Promoción de energías renovables descentralizadas, por ejemplo, mediante subsidios.	Requerimientos de capital. Problemas relacionados con la capacidad de mantenimiento tecnológico.
Mejore las conexiones a la red regional para garantizar la confiabilidad del suministro y los flujos de energía baja en carbono	Deben establecerse acuerdos multinacionales; gran capital.
Reducir los riesgos de prospección energética, p. ej., brindar evaluaciones de perforación geotérmica o garantizar que haya buenos datos de monitoreo del viento.	Gastos desembolsados sin garantía de inversión.

Tabla 32. Pasos hacia la transformación a un sector energético bajo en carbono

Antes de considerar cómo transformarse en un sector energético con bajas emisiones de carbono, es útil establecer primero el estado actual del sector: ¿cuánta energía se utiliza y con cuánta eficiencia?159

Existe una estrecha relación entre el PIB per cápita y el uso de energía, como se puede observar en la Figura 134, pero algunos países pueden lograr la misma prosperidad económica con menos energía, es decir, con una "intensidad energética" más baja. India, por ejemplo, se encuentra por debajo de la curva promedio, mientras que China está por encima. También es interesante que los países puedan reducir inicialmente el uso de energía (por ejemplo, reemplazando los métodos ineficientes de calefacción y cocción), que también pueden hacerlo en economías muy avanzadas. Ecuador, con un PIB per cápita de aproximadamente USD 6.500, estaba utilizando 889 kg de petróleo equivalente per cápita en 2014.[160]

159 Pye et al. (2010) The Economics of Low Carbon, Climate Resilient Patterns of Growth in Developing Countries: A Review of the Evidence. Report for DFID

160 https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE

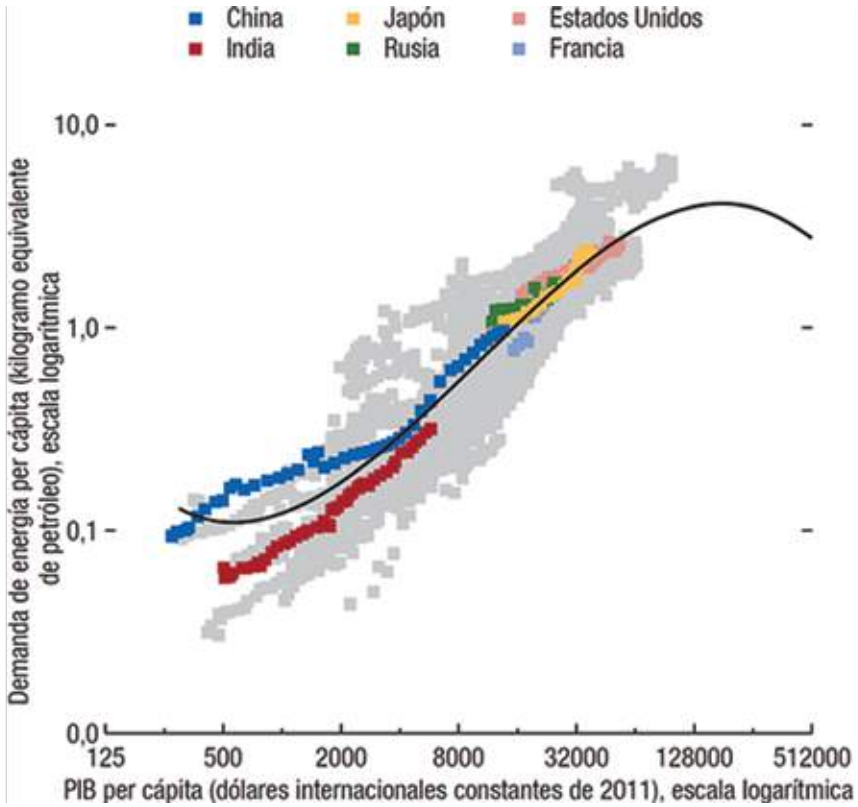


Figura 134.
Relación entre el uso de energía y la prosperidad económica

En la región latinoamericana, la Figura 135 muestra varios ejemplos de países que logran un PIB per cápita más alto con menos consumo de energía. Por ejemplo, Perú y Colombia tienen valores de PIB más altos pero un consumo de energía menor que el de Ecuador. Esto muestra el potencial de las políticas para lograr una eficiencia energética mayor o una menor intensidad energética. Se puede lograr una mayor eficiencia energética, por ejemplo, cambiando la estructura de la economía hacia industrias menos intensivas en energía (p. ej., de industrias de metales a software o servicios financieros), cambiando los estilos de vida (p. ej., usando el transporte público y bicicletas), y modernizando las tecnologías (p. ej., uso de LED para iluminación o mejora de la eficiencia del combustible en automóviles).

Otros indicadores clave están relacionados con el acceso actual a los servicios modernos de energía, especialmente a la electricidad y a métodos modernos de cocción y calefacción. Ecuador está casi universalmente electrificado y la principal fuente de energía para cocinar es el gas licuado de petróleo (GLP) subsidiado, aunque ha habido algunos intentos de promover las cocinas de inducción.

Desde estos puntos de partida, los responsables de las políticas pueden comenzar a examinar sus opciones para crear un sector energético futuro con bajas emisiones de carbono. Los costos son generalmente el factor más importante en la elección de la tecnología energética. IRENA (2019) informa sobre la rápida caída de los costos de las energías renovables. La Figura 136 (un ejemplo de Australia) muestra los costos directos (LCOE) para diferentes grupos de servicios: generación variable, generación entregable y almacenamiento. La energía solar fotovoltaica y la energía eólica terrestre son más baratas, pero combinadas con el almacenamiento tienen un costo similar al CCGT y el carbón. Las fuentes de energía de pico (gas, baterías, almacenamiento por bombeo) se superponen en los costos.

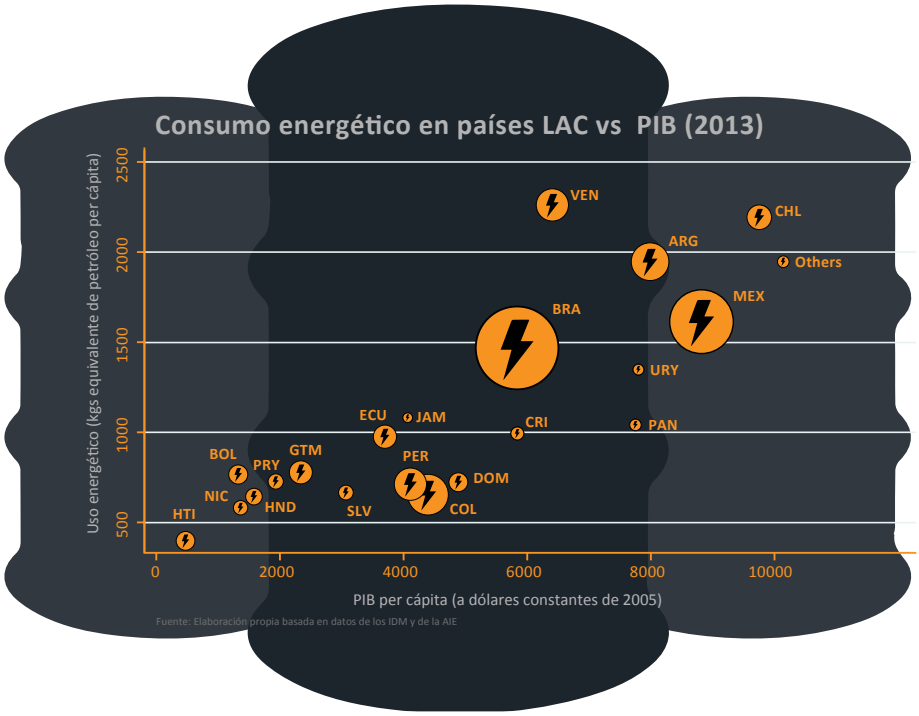
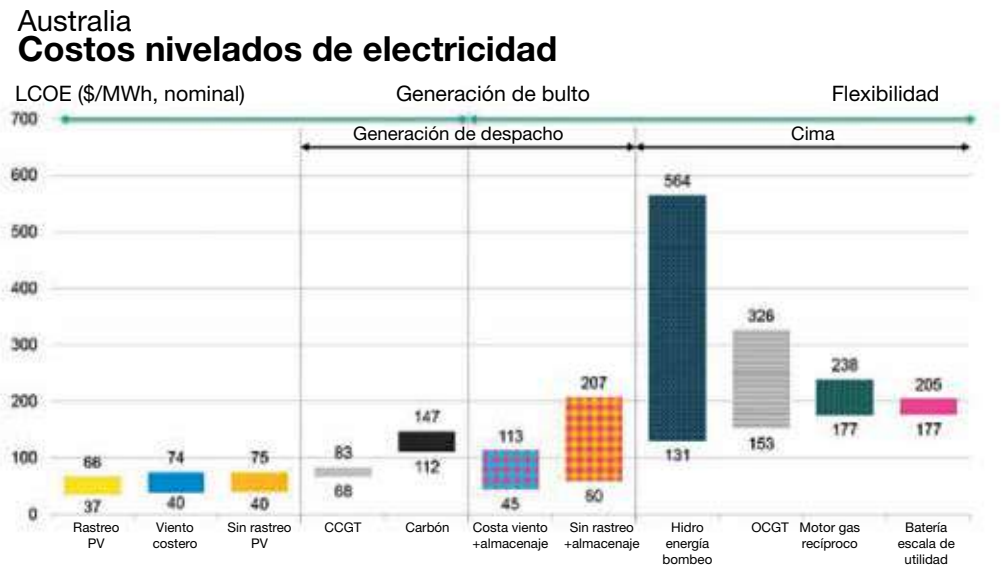


Figura 135.
Uso de energía y PIB per cápita en América Latina[161]



Fuente: Bloomberg.EF. Nota: El rango de LCOE representa a un rango de factor de costos y capacidad. Los sistemas de almacenaje de batería (co ubicada y sola) presentada aquí por almacenaje de cuatro horas. En el caso de la batería solar y viento, el rango es una combinación de factores de capacidad y tamaños de la batería relativa a ventaja generada al poder (25% hasta 100% del total de capacidad instalada). Los cálculos no son subsidiadas. Categorización de las tecnologías se basa en los casos de primer uso.

Figura 136.
Costos directos actuales de las tecnologías de energía, caso de Australia[162]

161 BID (2017) La Red del Futuro.

162 Bloomberg NEF

También deben compararse los costos indirectos de las tecnologías de energía, además de los costos directos. La siguiente tabla muestra un rango de costos según la literatura disponible, indicando que los costos indirectos se clasifican en forma descendiente, desde el carbón y el petróleo, luego la energía nuclear y el gas, la biomasa y la hidroenergía (muy específicos del sitio), y finalmente, la energía eólica y solar.

	Carbón	Petróleo	Gas Natrual	Nuclear	Hidroenergía	Vlento	Solar	Biomasa
N	36	20	31	21	16	18	11	22
Min	0.01	0.04	<0.01	<0.01	0	0	0	0
Max	90.61	53.43	17.69	86.23	35.14	1.18	2.94	29.56
Promedio	18.75	16.48	6.17	9.53	4.50	0.41	1.12	6.62
Medio	8.54	12.19	3.51	1.08	0.43	0.43	1.02	3.59

Tabla 33. Costos indirectos de las tecnologías de energía (centavos/kWh)[163]

Un elemento importante de los costos indirectos es el costo social del carbono. El costo social del carbono es una medida del beneficio de reducir las emisiones de GEI ahora y así evitar costos en el futuro. Un ejemplo muy simple: si las emisiones dañan los arrecifes de coral, lo que a su vez desalienta a los turistas a visitar Australia, un costo incurrido será la pérdida de ingresos para la industria turística. Evitar ese costo es un beneficio.[164] Otro costo indirecto es la contaminación local y los problemas de salud cerca de las plantas y las minas de carbón. Algunos costos indirectos, incluido el costo social del carbono, se sienten a nivel mundial, y para un país pequeño individual puede haber pocos incentivos para reducir tales externalidades.

Debido a los bajos costos y las ventajas ambientales, es deseable hacer ahora una transición rápida a las energías renovables. El BID ha modelado la viabilidad de tres escenarios para la región de ALC:

- BASE: combinación de energía tradicional basada en planes de expansión de la generación desde 2015.
- RE +: un mínimo de 80% de energías renovables a escala continental, con las interconexiones existentes.
- RE + CO: un mínimo del 80% de energías renovables a escala continental, con interconexiones adicionales para utilizar la complementariedad de las energías renovables.

A pesar de los mayores costos iniciales de inversión, los costos totales de generación de electricidad son en realidad más bajos en el escenario RE +, e incluso más bajos en el escenario RE + CO.

163 Sundqvist and Soderholm (2002) in Resources for the Future (2012) The True Cost of Electric Power.

164 WRI (2011) More than meets the eye: the social cost of carbon.

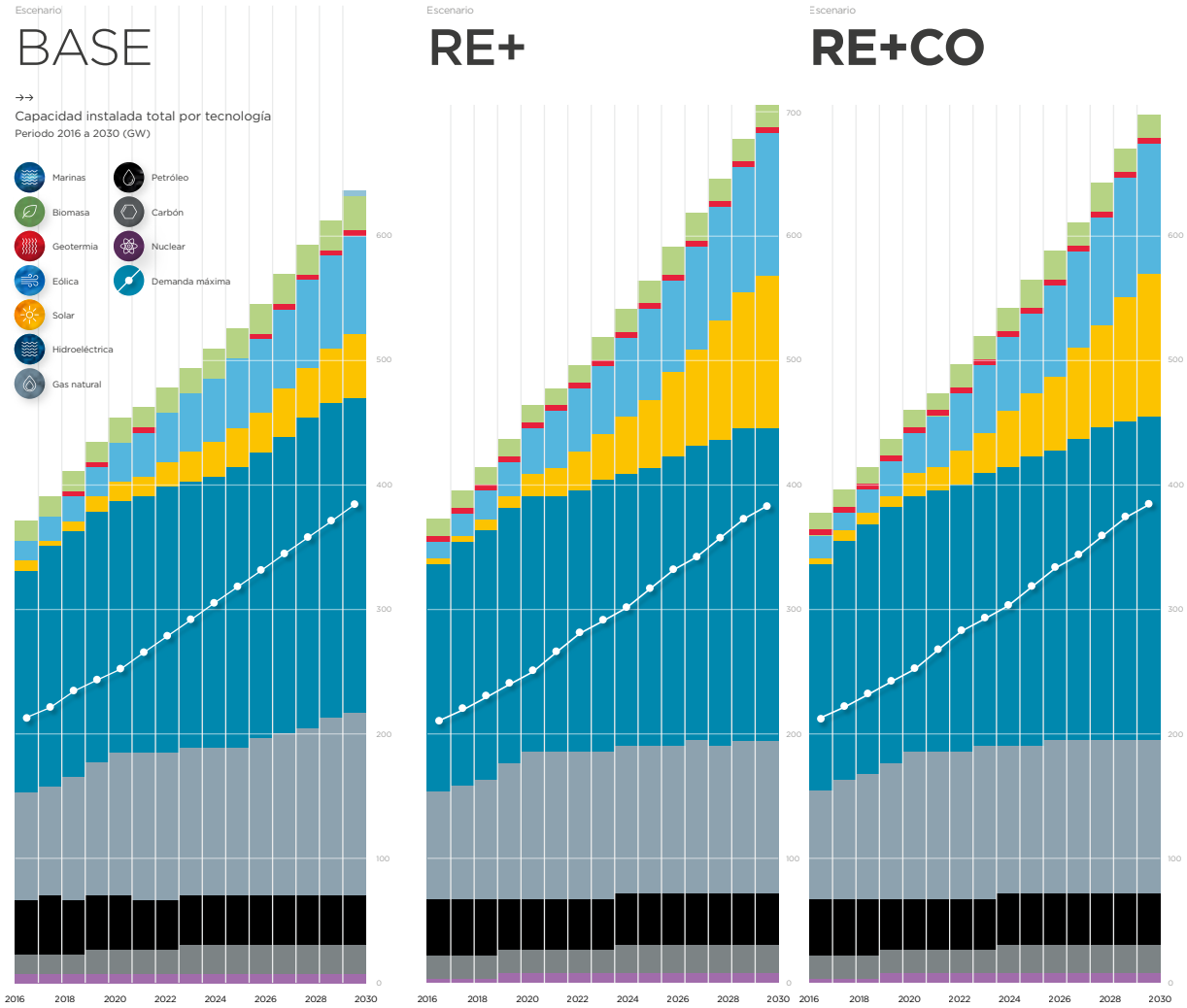


Figura 137.
Tres proyecciones para América Latina para el 2030[165]

Se estima el siguiente potencial de Ecuador para las energías renovables: hidroenergía (125,4 TWh), solar (50 TWh), eólica (11 TWh) y geotérmica (10,9 TWh), en comparación con un nivel de generación actual de 27 TWh. Por lo tanto, en principio, todo el país podría ser abastecido a partir de energías renovables y la generación adicional podría servir para ser exportada. Sin embargo, ninguno de los escenarios predice un reemplazo completo de los combustibles fósiles y, debido a que el potencial de Ecuador para la energía solar y eólica no es tan bueno como el de algunos de los países vecinos, los resultados del modelo para los diferentes escenarios muestran una fuerte dependencia continua de la hidroenergía. El escenario RE + CO solo difiere por tener un poco menos de generación de gas y un poco más de generación solar que el escenario BASE.

165 IDB (2018) La Red del Futuro.

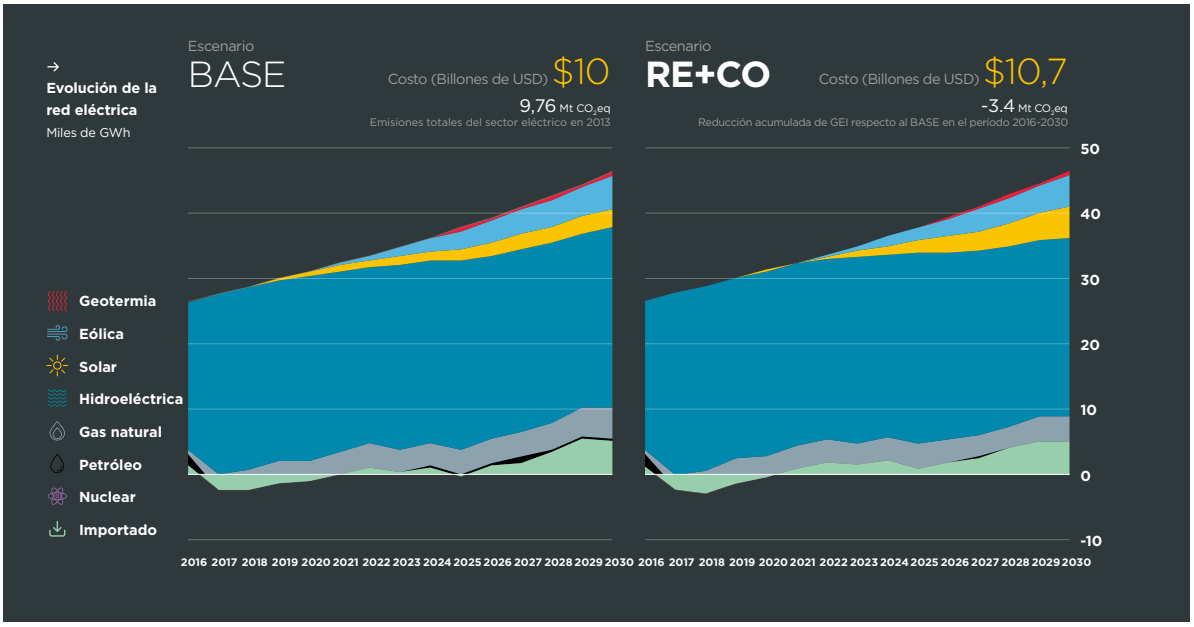


Figura 138.
Proyecciones para Ecuador al 2030[166]

Como se mencionó anteriormente, estas proyecciones del sector energético se basan en supuestos de modelos múltiples (por ejemplo, crecimiento de la población y los ingresos, costos de combustibles y tecnologías de energía) y escenarios de políticas que son inciertos. Es muy posible que se produzcan cambios de política en los principales países emisores, a nivel de la política global o a nivel nacional, que alterarían estas proyecciones. Se podría crear un mercado mundial de carbono efectivo, que crearía incentivos mucho más grandes para las energías renovables. Los países pueden introducir importantes políticas de gestión de la demanda o de la eficiencia energética.

Otra gran incertidumbre es la intensidad energética futura. Países como Colombia, Costa Rica y Panamá ya han mejorado significativamente su intensidad energética, medida en toneladas de petróleo equivalente por unidad de PIB. Sin embargo, otros han aumentado la suya a medida que se industrializaron, ya que los productores de energía y bienes manufacturados, especialmente cuando se trata de industrias pesadas, generalmente requieren una mayor intensidad energética que las industrias orientadas a servicios. El objetivo de muchos países de ALC será continuar mejorando sus niveles para alcanzar aquellos de la OCDE u otros países de ALC, pero esto también depende de su papel en la economía mundial.

Finalmente, los cambios esperados en el sector no son solo cuantitativos (es decir, una fuente de energía que reemplaza a otra) sino que también son cualitativos. Algunas tendencias cualitativas emergentes se enumeran en la tabla a continuación, que pueden cambiar el papel futuro de la hidroenergía en los sistemas de energía. Si bien son más especulativos, en cierta medida podrían debilitar el papel de la hidroenergía como una fuente de energía importante, centralizada y despachable.

166 Ibíd.

Sistemas de energía tradicionales	Futuros sistemas de energía
La energía fluye desde generadores grandes hacia una red de transmisión de alto voltaje y pasa por múltiples subestaciones de transformación hasta llegar a los consumidores en la red de bajo voltaje.	Una gran cantidad de plantas renovables descentralizadas alimentan de energía en los niveles de bajo voltaje de la red de distribución.
La demanda de energía no se puede controlar. Todos los generadores juntos pueden satisfacer la demanda en cualquier lugar y en cualquier momento.	El consumo se ve influenciado por la tecnología de gestión del lado de la demanda, adaptándola a la generación de energía.
La energía no se puede almacenar de manera efectiva.	Existe una variedad de tecnologías de almacenamiento rentables (como las baterías de vehículos eléctricos) para equilibrar la generación y la carga.

Tabla 34. Posibles cambios importantes a largo plazo en los sistemas de energía[167]

Presa Daule Peripa.©Pamela Barreiro CELEP EP Hidronación

167 AlpEnergy (2011) Sustainable Power Systems for the Alpine Space - Guidelines for Decision Makers and Practitioners.

Sesión 6.2 Sociedades y ecosistemas sostenibles

Propósito y objetivos de aprendizaje	Esta sesión extrae conclusiones sobre los impactos del desarrollo hidroeléctrico y el cambio climático en el desarrollo económico, los medios de vida, los ecosistemas y la biodiversidad. Se revisará cómo se modifican los impactos positivos y negativos de la hidroenergía en un clima cambiante, y cómo las sociedades pueden usar esa comprensión para lograr un desarrollo más sostenible. Los participantes reflexionarán sobre las complejas relaciones que se han explorado en el curso y las relacionarán con el objetivo político final de desarrollo sostenible.
Contenido	• ¿Qué significa el desarrollo sostenible bajo el cambio climático? • ¿Cómo impactan conjuntamente el cambio climático y la hidroenergía en los recursos naturales en los países andinos? • ¿Cuáles son las implicaciones para la planificación del desarrollo?
Aspectos clave	El clima futuro es incierto, y podemos reducir la incertidumbre solo parcialmente, invirtiendo más en investigación. Una infraestructura confiable de agua y energía es un elemento importante del desarrollo sostenible. En un clima futuro incierto, la confiabilidad es más difícil de lograr. Existen complejas relaciones entre el clima, los ecosistemas y la economía, que deben manejarse bien para lograr un desarrollo sostenible. El cambio climático es un desafío adicional que se añade a otros problemas difíciles, pero algunas soluciones "robustas" pueden estar disponibles. La hidroenergía puede ayudar a lograr un desarrollo sostenible, pero la planificación actual a menudo es demasiado limitada, ya que se basa en métodos de planificación estrechos y deterministas.
Temas de discusión y ejercicios	Discusión de grupo: • Comparando con su opinión antes del comienzo del curso, ¿ahora está más o menos a favor de la hidroenergía? • ¿Cuáles podrían ser algunos primeros pasos prácticos hacia un desarrollo hidroeléctrico más consciente del clima en su país?
Lecturas clave	Documento 6.2.1 - Brown (2010) El fin de la confiabilidad. Documento 6.2.2 - CEPAL (2018) La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: una visión gráfica.

Este manual ha examinado los impactos del desarrollo hidroeléctrico y el cambio climático en el desarrollo económico, los medios de vida, los ecosistemas y la biodiversidad. Esta última sesión revisará cómo los impactos positivos y negativos de la hidroenergía se modifican en un clima cambiante, y cómo las sociedades pueden usar esa comprensión para lograr un desarrollo más sostenible.

El desarrollo sostenible es "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". Si bien esto ha demostrado ser una definición útil, existen importantes problemas de interpretación. En particular, las "necesidades" son potencialmente ilimitadas. ¿Es realmente necesario llegar al nivel de consumo en la OCDE o superarlo?[168]

168 Brundtland Commission (1987)

A continuación se muestran los objetivos de desarrollo sostenible "oficiales" (acordados a nivel político).

Algunos de estos pueden ser compatibles entre sí, otros son difíciles de lograr al mismo tiempo.

Figura 139.
Objetivos de desarrollo sostenible, muchos de los cuales están relacionados con el desarrollo hidroeléctrico

Algunos conceptos básicos de economía pueden ayudar. *Ingreso* ha sido definido como "la cantidad que las personas pueden consumir sin empobrecerse."[169] Esto se puede aplicar a un individuo, a una familia, a un negocio e incluso a una nación individual. Las sociedades necesitan gestionar tres tipos de capital: económico, social y natural. Algunos de estos activos pueden no ser sustituibles. El uso de algunas partes del capital natural, por ejemplo, puede dañar la capacidad de generar ingresos de las otras partes. El consumo de algunos *stocks* de capital puede ser irreversible, mientras que otros pueden ser reemplazados.

Un ejemplo que ilustra este concepto proviene del estado independiente de Nauru, una isla de 21 km^2 en el Pacifico con una población de aproximadamente 10.000 personas.[170] La población de Nauru dependía en gran medida de la extracción de fosfato para sus ingresos. Durante un tiempo, el estado tuvo uno de los ingresos per cápita más altos del mundo. Hoy, el 80% de la isla ha sido minada y sus reservas están agotadas. Los habitantes de Nauru viven del interés de un fondo fiduciario (mal administrado), los ingresos están disminuyendo, las tasas de desempleo son altas, los problemas sociales (p. ej., la obesidad) son rampantes. Otras opciones de ingresos son pocas e incluyen centros de detención para refugiados australianos o la venta de derechos de pesca y sobrevuelo. El cambio climático ahora está reduciendo aún más sus opciones, ya que amenaza las zonas costeras habitables restantes de la isla. Sin embargo, la mayoría de la gente quiere quedarse en su isla.

Incluso si sus esfuerzos mineros estuvieran bien ejecutados, ¿podría haber sido sostenible la estrategia de Nauru para reemplazar el capital natural con capital financiero? ¿Es suficiente la sostenibilidad "débil", que permite la sustitución (por ejemplo, reemplazar el suelo de Nauru con activos financieros)? ¿O se requiere una sostenibilidad "fuerte", es decir, mantener todos

169 Hicks (1946)

170 http://en.wikipedia.org/wiki/Nauru

los componentes del capital (económico, social y natural) al menos en el nivel actual? Si se requiriera una fuerte sostenibilidad, reemplazar un río natural con un embalse de hidroenergía podría no ser factible.

Una forma de analizar la compatibilidad de la calidad socioeconómica de la vida con la calidad ambiental es comparar índices relevantes. La calidad de vida se ha medido durante mucho tiempo mediante la combinación de indicadores de esperanza de vida, logros educativos e ingresos, en un índice compuesto de desarrollo humano (IDH). El IDH muestra dónde se encuentra cada país, expresado como un valor entre 0 y 1. Los IDH de las naciones de los Andes son:[171]

- Ecuador: 0,752 Perú: 0,750
- Bolivia: 0,693
- Colombia: 0,747

Una forma de medir la calidad ambiental es la "huella ecológica", una medida de las demandas humanas a la Tierra, que se expresa en "hectáreas globales per cápita". Es una medida estandarizada de la demanda de capital natural, que puede contrastarse con la capacidad ecológica de la Tierra para regenerarse. Representa cuánta área de tierra y mar biológicamente productiva es necesaria para suministrar los recursos que consume una población humana y para asimilar los desechos asociados. Simplemente, representa "cuántas Tierras" serían necesarias para sustentar a la humanidad, dado un cierto estilo de vida. Las huellas ecológicas de las naciones de los Andes son:[172]

- Ecuador: 2,17
- Perú: 2,28
- Bolivia: 2,96
- Colombia: 1,87

Huella ecológica e índice de desarrollo humano de los países (2016)

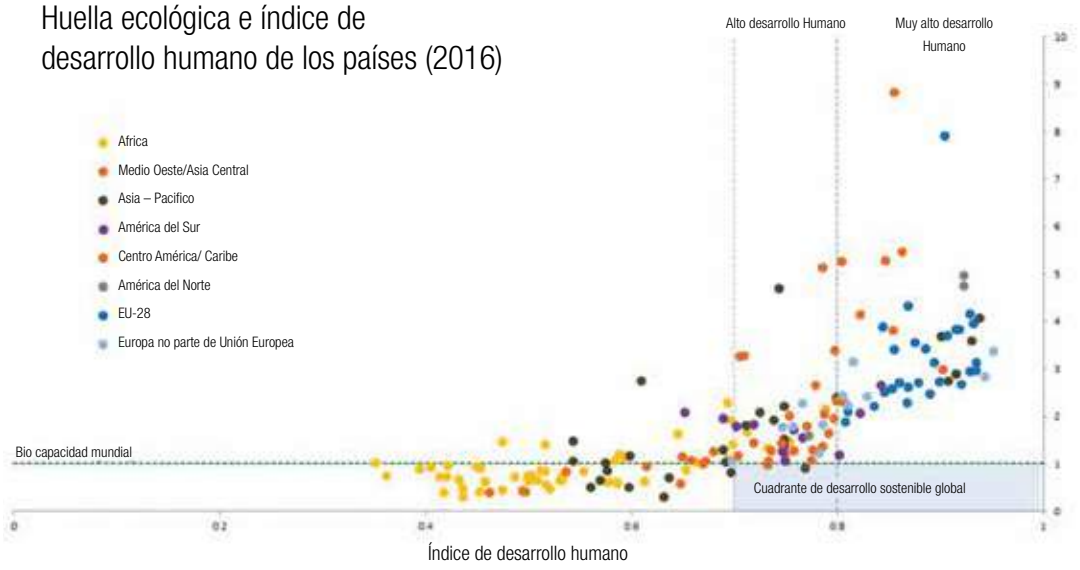


Figura 140.
Comparación entre bienestar humano y huella ecológica

171 Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_Human_Development_Index

172 Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_ecological_footprint

Tomando en cuenta la comparación mundial de la Figura 140, a primera vista parece casi inevitable que el aumento del bienestar humano aumente la huella ecológica al mismo tiempo. Sin embargo, parece haber áreas distintas en este gráfico, con relaciones más débiles entre el bienestar humano y la huella ecológica. Ciertamente, hay países que logran el mismo bienestar humano a un costo ecológico mucho más bajo que otros. Esto quizás se deba a que existen opciones de ganar-ganar, en las cuales el impacto en la Tierra se minimiza, a la vez que se aumenta el bienestar humano.

Por ejemplo, McKinsey & Company construyó un análisis de costos de las opciones de reducción de carbono, disponibles para el mundo y los países grandes, para identificar las opciones de ganar-ganar. Cada curva identifica el volumen total disponible y el costo unitario por tonelada de CO_2e. Brasil, por ejemplo, podría reducir sus emisiones en aproximadamente 200 millones de toneladas por año en el 2030 (en comparación con un escenario usual de negocios BAU, sin políticas de mitigación), ahorrando dinero al mismo tiempo.

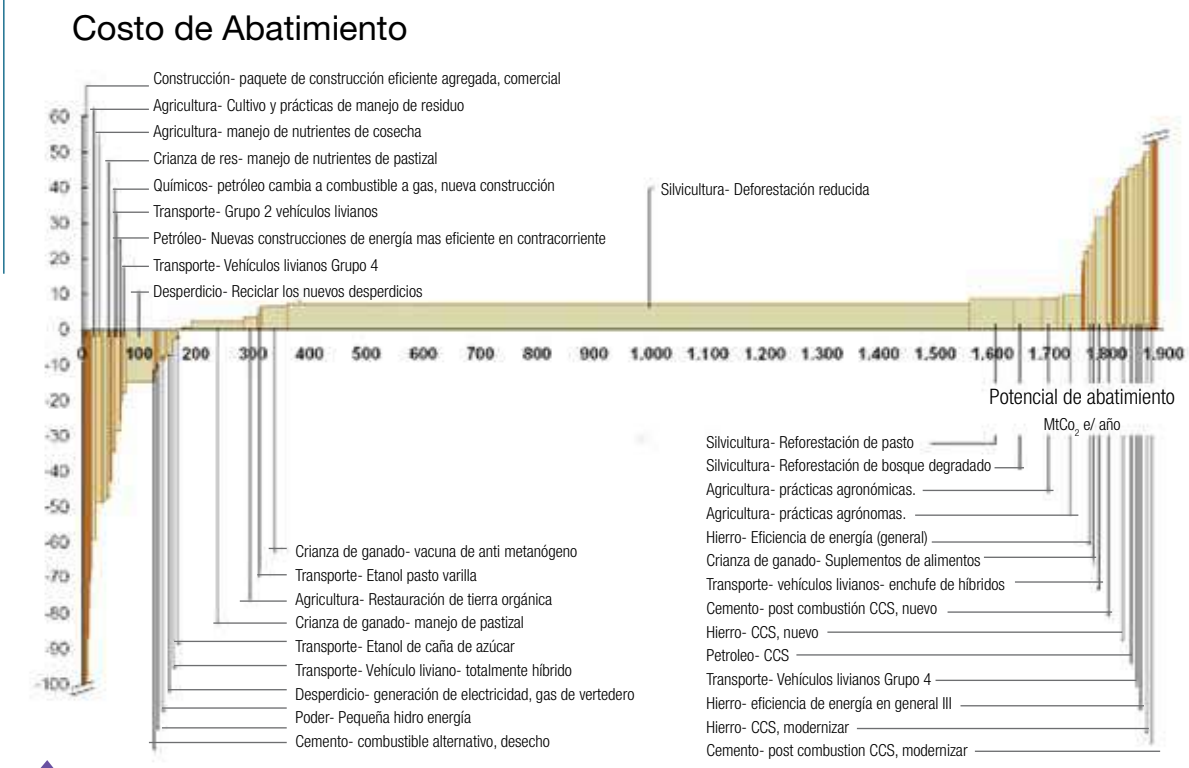


Figure 141.
Curva del costo de reducción de carbono en Brasil para el 2030[173]

Por ejemplo, expandir la hidroenergía a pequeña escala, el reciclaje y el manejo de nutrientes de las tierras de cultivo reduciría las emisiones y, al mismo tiempo, reduciría los costos. Solo después de que se agoten las opciones de ganar-ganar, y dependiendo de su nivel de aspiración, un país debe comenzar a gastar dinero adicional en mitigación.

Si bien este análisis debería actualizarse (por ejemplo, para tener en cuenta los costos reducidos de energía solar y eólica), en principio, comenzar con las opciones menos costosas de mitigación debería hacer que esta alternativa sea políticamente más aceptable. Desafortunadamente, todas las opciones de mitigación tienen efectos secundarios y en el análisis de McKinsey no se cuentan sus costos indirectos. Una relación bidi-

173 McKinsey & Company (2009) Environmental and Energy Sustainability: An Approach for India.

mensional entre desarrollo y naturaleza es demasiado simplista. Se necesitan políticas que no solo aborden el cambio climático, sino que acometan conjuntamente el desarrollo sostenible y el cambio climático, reconociendo las diversas relaciones entre ambos.

El siguiente cuadro intenta mostrar las relaciones relevantes de manera más completa. La adaptación climática se refiere a cómo los ecosistemas y la economía reciben y responden a las influencias del sistema climático. Por ejemplo, los ecosistemas que reciben menos presión de la economía pueden ser más resistentes o más capaces de resistir la presión climática.

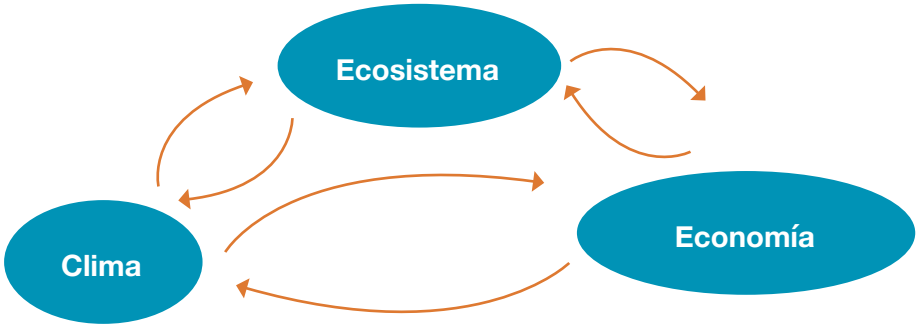


Figure 142.
Relaciones entre el clima, la economía y los ecosistemas.

La hidroenergía, como parte de la economía, interactúa tanto con el clima como con los ecosistemas. Hablando en términos generales, es bueno para el clima, pero malo para los ecosistemas acuáticos y ribereños. Dado que la biodiversidad depende de los ecosistemas, que proporcionan el hábitat para plantas y animales, aquella también se verá afectada por la hidroenergía. Sin embargo, gracias a su impacto positivo en el clima, la hidroenergía reduce otras tensiones en los ecosistemas, por ejemplo, en los bosques y arrecifes de coral. Desde una perspectiva política, uno desearía fortalecer las relaciones positivas y reducir las relaciones negativas en un sistema como este.

Una relación que hemos analizado es entre el clima y la confiabilidad de la infraestructura, como un elemento importante del desarrollo sostenible. La confiabilidad es la probabilidad de que no ocurran fallas. La falla podría deberse a la falta de agua en un embalse, que luego obliga a cortar los servicios de agua o energía. La falla también podría ser a causa de demasiada agua, lo que resulta en un desperdicio del recurso. Tradicionalmente, los planificadores intentan optimizar entre el costo de la falla y el costo de la confiabilidad. El costo de las sequías e inundaciones puede ser extremadamente alto (varios puntos porcentuales del PIB), pero el 100% de confiabilidad tampoco es técnica ni económicamente factible. En un clima futuro incierto, es más difícil lograr la confiabilidad.

Si el cambio climático conduce a una confiabilidad reducida, ¿qué significa esto para la planificación y gestión de los recursos hídricos? Los planificadores deben ser proactivos con respecto al cambio climático. Primero, pueden tratar de averiguar lo más posible sobre las condiciones futuras. Los pronósticos, junto con las observaciones en tiempo real, deberían utilizarse para modificar las reglas operativas de manera adaptativa. Los planificadores también deben diseñar sistemas para gestionar las consecuencias del fracaso. Esto puede significar incluir márgenes de seguridad adicionales, diseñar sistemas robustos para que no tengan un solo punto de falla, o diseñar sistemas con un enfoque modular, que utilice los componentes solo cuando sea necesario. Finalmente, los planificadores deben incorporar elementos no estructurales innovadores, como las comunicaciones, la tecnología de la información y la aplicación de mecanismos económicos para

mejorar el desempeño de la infraestructura de agua y energía.[174] Por ejemplo, los embalses se pueden combinar con seguros contra inundaciones y sequías.

Otra relación donde la economía y el cambio climático tienen impactos acumulativos son las vías de impacto de la infraestructura y el cambio climático en ecosistemas específicos. Se sabe que los ecosistemas acuáticos, en particular, son los más presionados entre todos los ecosistemas a nivel mundial, ya que pierden su capacidad de prestar servicios ecosistémicos en muchos lugares. El Índice Planeta Vivo de la WWF para especies de agua dulce ha disminuido en un 83% desde 1970, el doble de la tasa de disminución de las especies terrestres y marinas, debido a una combinación de pérdida de hábitat, contaminación, sobrepesca y fragmentación.

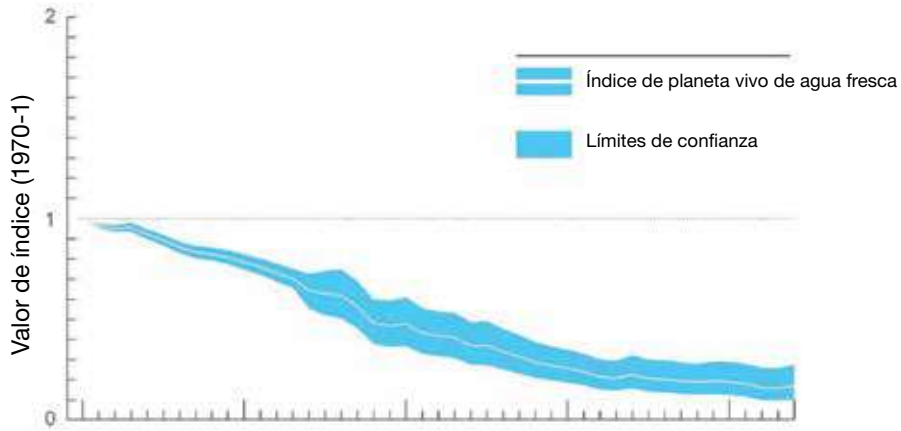


Figura 143.
Índice Planeta Vivo de la WWF para especies de agua dulce

Es importante comprender estas pérdidas para realizar un análisis de impacto adecuado de la gestión humana del agua. El impacto de un proyecto hidroeléctrico en los flujos aguas abajo, por ejemplo, se suma a las presiones preexistentes y al cambio climático subyacente que ya están ocurriendo en el ecosistema.

Impactos del cambio climático	**Cambios eco-hidrológicos**	**Consecuencias para ecosistemas y especies**
Cambios en el volumen y tiempo de precipitación Aumento de la evapotranspiración Cambio de la caída de nieve a lluvia, y/o derretimiento más temprano de la capa de nieve Recarga reducida de los acuíferos Aumento de la variabilidad y el tiempo del monzón Mayor demanda de agua en respuesta a las altas temperaturas y requerimientos de mitigación climática	**1. Aumento de episodios de bajo flujo y presión sobre el agua**	Disponibilidad reducida de hábitats Aumento de la temperatura y niveles de contaminación Impactos en especies dependientes del caudal Impactos en los ecosistemas estuarinos

174 Brown (2010)

Cambio de la caída de nieve a lluvia, y/o derretimiento más temprano de la capa de nieve Cambios en el tiempo de precipitación Aumento de la variabilidad y el tiempo del monzón	**2. Cambios en el tiempo de inundaciones y pulsos de agua fresca**	Impactos en las señales para el desove y otros comportamientos críticos Impactos sobre estados de la vida dependientes de la hidrología (migración, inundación de humedales y lagos)
Aumento de temperatura Reducción de precipitaciones y caudales	**3. Incremento de las pérdidas por evaporación de cuerpos de agua más superficiales**	Los cuerpos de agua permanentes se vuelven temporales o efímeros, generando un cambio en la combinación de especies (p. ej., de dominados por peces a dominado por camarones)
Incremento de precipitaciones y caudales Más eventos de caída de lluvia	**4. Inundaciones más altas y frecuentes**	Las inundaciones eliminan organismos ribereños y del fondo del agua Las alteraciones en la estructura de los hábitats disponibles causan una serie de cambios en la distribución y terrenos inundables más amplios Menos sombra de la vegetación cercana al canal genera temperaturas extremas del agua superficial
Cambios en la temperatura del aire y la estacionalidad Cambios en las fechas de rompimiento de las capas de hielo de los lagos	**5. Cambios en la estacionalidad y la frecuencia de la estratificación térmica en lagos y humedales (p. ej.: variación de la estacionalidad normal de las capas frías y calientes)**	Especies que requieren capas de agua fría pierden hábitat Desaparecen los refugios termales Más periodos eutróficos y de algas debido al agua caliente Especies aclimatadas a períodos hídricos históricos pueden necesitar cambios en su distribución para responder a la nueva situación
Precipitación y escorrentía reducidas Aumento repentino de tormentas tropicales Elevación del nivel del mar	**6. Invasión de agua salada en ecosistemas costaneros, deltaicos y otros de tierras bajas**	Incremento de la mortalidad de especies y de ecosistemas que no toleran la sal Los niveles de salinidad alteran el hábitat costero para muchas especies estuarinas y hasta 100 km tierra adentro
Incremento de la intensidad y frecuencia de eventos extremos de precipitación	**7. Caudales altos más frecuentes, que llevan a un incremento¿ de la carga de sedimentación y contaminación**	Incremento de periodos eutróficos dominados por algas Incremento de amenazas fisiológicas y genéticas por contaminaciones industriales antiguas, tales como dioxina

Cambios en la temperatura del aire Mayor variabilidad de la temperatura	**8. Condiciones del agua fría o caliente y cambios en la concentración de oxígeno disuelto**	Estrés térmico fisiológico directo en especies Mas períodos eutróficos durante temporadas calurosas Falta de oxígeno para organismos con respiración branquial Señales equivocadas para comportamientos esenciales, como la migración y cría

Tabla 35. Rutas de impactos climáticos en la biodiversidad acuática[175]

Existen implicaciones directas de estos conceptos para el desarrollo sostenible en los países andinos. La economía de la región está fuertemente vinculada a su base de recursos naturales (por ejemplo, mediante la agricultura, la silvicultura, la pesca, la hidroenergía) y a una infraestructura confiable. Los ecosistemas de la región son vulnerables a los cambios concurrentes del clima y de la actividad económica.

El cambio climático también puede traer algunos beneficios, por ejemplo, en el aumento de la productividad de algunas actividades agrícolas. Pero no estarán exentos de costos directos de mitigación y adaptación, y costos indirectos, por ejemplo, costos impuestos a las pesquerías debido al mayor desarrollo de la hidroenergía. Los impactos del cambio climático también se distribuirán de manera desigual en la región. Las economías rurales dependen más de los recursos naturales que las economías urbanas y, por lo tanto, pueden experimentar mayores impactos. Estos impactos podrían incluir el desplazamiento de áreas costeras o rurales y migración hacia áreas urbanas.

En los sectores de recursos naturales, las presiones concurrentes, los impactos acumulativos, las sinergias y las retroalimentaciones deben estudiarse con más detalle. Existe la posibilidad de que, en algunos casos, la presión sobre los ecosistemas acuáticos por el cambio climático se reduzca mediante sinergias positivas con el desarrollo de la hidroenergía. Si el cambio climático aumenta la temperatura del agua, quizás la salida de aguas más frías de los embalses podría mantener o restaurar las temperaturas históricas. Si el cambio climático aumenta la erosión, tal vez la retención de sedimentos en los embalses podría mantener o restaurar las cargas históricas de sedimentos. Si el cambio climático aumenta la intrusión de salinidad, quizás las salidas de la estación seca de los embalses podrían mantener o restaurar el límite histórico del agua salada. Y, si el cambio climático aumenta los picos de las inundaciones, tal vez la retención de agua en los embalses podría mantener o restaurar los picos históricos de las crecidas.

El gobierno de Ecuador desarrolló su primera estrategia frente al cambio climático en el 2012 y ha dado seguimiento mediante comunicaciones y compromisos nacionales con la CMNUCC. La hidroenergía juega un papel importante en la estrategia, tanto para la mitigación como para la adaptación. Se planeó integrar el cambio climático en el diseño de nuevas centrales hidroeléctricas. Hay espacio para una mejora del análisis y del debate público.

En conclusión, una infraestructura confiable de agua y energía es un elemento importante del desarrollo sostenible. En un clima futuro incierto, la confiabilidad es más difícil de lograr. Existen complejas relaciones entre el clima, los ecosistemas y la economía que deben manejarse bien para lograr un desarrollo sostenible. El cambio climático es un desafío adicional, que se añade a otros problemas difíciles, pero algunas soluciones robustas o beneficiosas pueden estar disponibles. La hidroenergía puede ayudar a lograr un desarrollo sostenible. Sin embargo, la planificación actual a menudo es demasiado limitada y se basa en métodos de planificación estrechos y deterministas, que no toman en cuenta el cambio climático.

175 WWF (2010) Flowing forward

Panorámica Daniel Palacios Molino© CELEC EP

Anexos

Anexo I: Lecturas recomendadas

Nota: Este manual se basa en una literatura diversa y en rápida evolución. Los usuarios pueden consultar la literatura original del IPCC en http://www.ipcc.ch/index.htm. Las referencias adicionales a las que figuran en la lista de "lecturas recomendadas" se proporcionan en las notas al pie. Se accedió a todos los enlaces web en las notas al pie en septiembre de 2019.

- Documento 1.1.1 - IEA (2012) Key Findings, in Technology Roadmap Hydropower (p. 5).
- Documento 1.1.2 - BP (2019) Section on Hydroelectricity in Statistical Review of World Energy.
- Documento 1.2.1 - Bruckner et al. (2013) Executive Summary of Chapter 7 (Energy Systems) in Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the AR5 of the IPCC.
- Documento 1.2.2 - Kumar et al. (2011) Executive Summary of Chapter 5 (Hydropower) in IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (pp. 441-442).
- Documento 1.3.1 - UN Water (n.d.) Climate change adaptation is mainly about water.
- Documento 1.3.2 - Jiménez Cisneros et al. (2014) Freshwater resources. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the AR5 of the IPCC.
- Documento 1.3.3 - Magrin et al. (2013) Chapter 27 (Central and South America) in Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the 5th Assessment Report of the IPCC.
- Documento 2.1.1 - Organización Meteorológica Mundial (2011) El Clima y Tú.
- Documento 2.2.1 - INAMHI (2017) Publicación de la Información Generada por las 35 Estaciones Hidrológicas Automáticas 2014 – 2015 – 2016.
- Documento 2.2.2 - Flow Duration Curve (data in Excel)
- Documento 2.3.1 - Washington Sandoval (2018) Diseño de obras hidrotécnicas. Capítulos 1 (Presas y Embalses), 3 (Diseño Hidrológico) y 6 (Centrales Hidroeléctricas).
- Documento 2.3.2 - IFC (2015) Hydroelectric Power: A Guide for Developers and Investors.
- Documento 2.4.1 - IPCC (2015) Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Cap. 1 Cambios observados y sus causas y Cap. 2 Futuros cambios climáticos, riesgos e impactos.
- Documento 2.4.2 - Ministerio del Ambiente (2015) Cambio Climático y Agua.
- Documento 3.2.1 - Milly et al. (2008) Stationarity is dead.
- Documento 3.2.2 - Hamadudu and Killingtveit (2012) Assessing Climate Change Impacts on Global Hydropower.
- Documento 3.2.3 - Carvajal et al. (2017) Assessing uncertainty of climate change impacts on long-term hydropower generation using the CMIP5 ensemble—the case of Ecuador.
- Documento 3.2.4 - MEER & MAE (2018) Resumen Público: Análisis de la Vulnerabilidad de las Centrales Hidroeléctricas Emblemáticas ante los efectos del cambio climático en siete subcuencas hidrográficas del Ecuador (CHECC).
- Documento 3.2.5 - Brown et al. (2010) Managing Climate Risk in Water Supply Systems: Materials and tools designed to empower technical professionals to better understand key issues.
- Documento 3.3.1 - Dortch (n.d.) Water Quality Considerations in Reservoir Management.

- Documento 3.3.2 - Moss et al. (2011) Allied attack: climate change and eutrophication.
- Documento 3.3.3 - UNESCO-WHO-UNEP (1996) Reservoir Water Quality Assessments.
- Documento 3.4.1 - Major (1998) Climate change and water resources: The role of risk management methods.
- Documento 3.4.2 - Byer and Yeomans (2007) Methods for Climate Uncertainties in EIAs.
- Documento 3.4.3 - Hallegatte (2009) Strategies to adapt to an uncertain climate change.
- Documento 3.4.4 - IHA (2019) Hydropower Sector Climate Resilience Guide.
- Documento 3.4.5 - Pittock et al. (2008) Running dry: Freshwater biodiversity, protected areas and climate change.
- Documento 4.1.1 - Cox (2013) Cooling a warming planet.
- Documento 4.1.2 - Parkpoom et al. (n.d.) Climate Change Impacts on Electricity Demand in Thailand.
- Documento 4.1.3 – Mekonnen and Hoekstra (2012) The blue water footprint of electricity from hydropower.
- Documento 4.1.4 - Doell (2002) Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements.
- Documento 4.1.5 - Mideksa and Kallbecken (2010) The impact of climate change on the electricity market.
- Documento 4.2.1. - REN21 (2019) Global Status Report. Chapter 2: Policy Landscape.
- Documento 4.3.1 - Colombo & Byer (2012) Adaptation, flexibility and project decision-making.
- Documento 4.3.2 - DFID (2010) Water storage and hydropower: supporting growth, resilience and low carbon development. A DFID evidence-into-action paper.
- Documento 4.3.3 - McCartney & Smakhtin (2010) Water Storage in an Era of Climate Change. IWMI.
- Documento 5.1.1 - CDM Project Design Document for Baba project (2008).
- Documento 5.1.2 - Manitoba Hydro (2015) Climate Change Report.
- Documento 5.1.3 - IRENA (2016) Análisis del Mercado de Energías Renovables: América Latina.
- Documento 5.1.4 - Barbosa et al. (2017) Hydro, wind and solar power as a base for a 100% renewable energy supply for South and Central America.
- Documento 5.2.1 - World Bank (2017) Greenhouse Gases from Reservoirs Caused by Biogeochemical Processes.
- Documento 5.2.2 - Deshmukh (2012) Greenhouse gases (CH4, CO2 and N2O) emissions from a newly flooded hydroelectric reservoir in subtropical South Asia: case of Nam Theun 2 Reservoir, Lao PDR- Chapters 7 and 8.
- Documento 6.1.1 - BID (2017) Red del futuro: desarrollo de una red eléctrica limpia y sostenible para América Latina.
- Documento 6.2.1 - Brown (2010) The End of Reliability.
- Documento 6.2.2 - CEPAL (2018) La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: una visión grafica.

Anexo 2:[176] Ejemplos de medidas de adaptación estructural y funcional

Las medidas de adaptación ayudan a desarrollar la resiliencia climática en el sistema. En la Tabla 36 se dan ejemplos de medidas de adaptación estructural y funcional.

Tabla 36. Ejemplos de medidas de adaptación estructural y funcional para proyectos hidroeléctricos nuevos y existentes

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
MEDIDAS DE ADAPTACIÓN ESTRUCTURAL		
Vías de acceso y campamentos		
Temperatura	Construcción de carreteras con daños por congelación y descongelación	• Juntas de construcción adicionales • Materiales de pavimento adecuados para variaciones de temperatura
	Las altas temperaturas dañan la construcción de carreteras	• Juntas de construcción adicionales • Materiales de pavimento adecuados para variaciones de temperatura
	Aumento de polvo en caminos de acceso temporales o sin pavimentar	• Revestimiento de carreteras • Mayor supresión de polvo (rociadores)
	Disminución del espesor del hielo en lagos, pantanos, turberas Acortamiento de períodos durante los cuales se pueden utilizar puentes de hielo	• Construcción de caminos alternativos de acceso • Teledetección o control de parámetros y actividades que solían medirse o implementarse en el sitio
	Derretimiento de permafrost y alternancias a carreteras, cimientos	• Modificar el diseño las vías con más consideración de las condiciones geotécnicas bajo temperaturas del suelo positivas

176 Tomado de: International Hydropower Association, 2019. Hydropower Sector Climate Resilience Guide. London, United Kingdom, anexo C, p 49

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Precipitación y flujo de corrientes	Fuertes aguaceros que dañan carreteras sin pavimentar	• Mayor drenaje • Pavimentación o gravado de carreteras (revisión de las especificación del material) • Rectificaciones del diseño de carreteras (por ejemplo, peralte adicional) • Aumento de provisiones y asignaciones para operación y mantenimiento (O&M)
	Flujos crecientes en alcantarillas y drenaje de caminos / campamentos	• Dimensionamiento de las alcantarillas y drenajes revisado ante la incertidumbre hidrológica, en particular un aumento potencial en la escorrentía, para los criterios de diseño que se han considerado apropiados para la estructura; por ejemplo, se puede decidir que es apropiado diseñar las alcantarillas para un evento más grande una vez que se determinan los impactos del cambio climático en el modelado hidrológico.
	Aumento de escombros por escorrentía superficial más alta o súbita	• Pantallas de escombros agregadas al drenaje y alcantarillas • Más mantenimiento
	Mayor riesgo de inestabilidad de taludes (fallas provocadas por aguas superficiales y fallas inducidas por aguas subterráneas)	• Aumento de las evaluaciones de peligro de deslizamientos (mapeo) • Protección adicional de las pendientes • Cruce adicional diseñado • Evaluación más sólida de la alineación de carreteras
	Aumento / disminución de la escorrentía de la corriente que resulta en cruces de río adicionales / reducidos	• Selección de ruta revisada • Cruce adicional diseñado • Evaluación más robusta de la alineación del camino
	La selección de la ubicación del campamento es más desafiante (incertidumbre de mayor riesgo; por ejemplo, un historial de eventos de 25 años puede no ser exacto en el futuro)	• valuación más sólida de la ubicación del campamento (dependiendo de la duración de la construcción)
	Los períodos de flujo bajo pueden ser más severos, implicando el rechazo del agua tratada de los campamentos debido a una disolución insuficiente.	

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Desvío de río y obras		
Precipitación y flujo de caudal	Aumento de eventos súbitos o sostenidos de caudal alto	• Diseño que utiliza los datos hidrológicos más recientes en lugar de datos históricos • Para represas de concreto, aceptar y organizar el borde superior límite de los trabajos de construcción permite un ahorro significativo en los trabajos de túnel de derivación
	Falta de período de bajo flujo para la construcción del lecho del río	• Planificación de la construcción para un período mínimo de bajo caudal (incluida la selección de obras de desviación de ríos; por ejemplo, puede ser preferible un túnel)
Obras de presas y anexos (incluyendo aliviadero, estructura de ingreso y estructuras de manejo de sedimentos)		
Precipitación y flujo de corriente	Aumento de la carga de sedimentos que resulta en pérdida de almacenamiento o frecuencia de descarga adicional (si está diseñada para la descarga)	• Instalaciones adicionales de descarga y manejo de sedimentos • Cambio en la metodología de operación • Incorporación del plan de control de la erosión en la captación • Levantamiento de la cresta (borde límite) de la presa para aumentar el almacenamiento en vivo • Desarrollo de instalaciones de control de sedimentos aguas arriba
	El aliviadero no tiene el tamaño suficiente para desalojar las inundaciones, lo que genera problemas de seguridad para la presa (por ejemplo, adaptación de proyectos existentes)	• Aumento de la capacidad del aliviadero • Compuertas de uniónaliviaderoo aliviaderos adicionales • Uso de dique estilo laberinto o tecla de piano • Presas de goma • Reevaluación del tipo de presa para permitir el el borde constructivo superior límite (p. ej.: una presa de concreto) • Aumento de la capacidad de contención o margen por aumento de inundaciones • Adición de un parapeto aguas arriba / muro de olas en la cresta de la presa

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Precipitación y flujo de corriente	Mayor riesgo de inestabilidad de los taludes (fallas provocadas por aguas superficiales y fallas inducidas por aguas subterráneas; por ejemplo, para la adaptación de proyectos existentes)	• Protección adicional de taludes y medidas de estabilización • Monitoreo / topografía de la estabilidad de los taludes • Reevaluación de la ubicación o alineación de la presa.
	Carga adicional de nieve / hielo / viento en la estructura de la presa y puertas	• Condiciones de carga (viento, nieve, lluvia) revisadas en el diseño
	Flujos ambientales modificados (para peces, calidad del agua, navegación)	• Diseño de la capacidad de flujo ambiental con potencial para tasas de descarga variables • Diseño del sistema de flujo ambiental para que pueda adaptarse en el futuro si cambian los requisitos de flujo ecológico
	Flujos cambiados para los sistemas de paso de peces	• Diseño de sistema(s) de paso de peces con potencial para tasas de descarga variables • Considerar el cambio climático cuando se diseñen los sistemas de paso de peces • Diseño de los sistemas de paso de peces para que puedan adaptarse en el futuro si cambian los requisitos de flujo ecológico
	Erosión en la punta de la presa debido al aumento de la descarga del aliviadero	• Reubicación del aliviadero para garantizar que las inundaciones se descarguen aguas abajo de la central eléctrica (por ejemplo, en un canal secundario o extendiendo el aliviadero más allá de una central eléctrica en la punta de la presa) • Mayor disipación de energía del aliviadero • Mayor capacidad de mantener la quietud en la cuenca y protección
Temperatura	La expansión o contracción del material provoca grietas, lo que provoca fugas o inestabilidad	• Monolitos adicionales y/o juntas de construcción • Nuevos diseños de mezcla de concreto que sean más resistentes a las variaciones de temperatura • Cambio del tipo de presa / elección de materiales de construcción • Control de la temperatura del hormigón de la presa mediante enfriamiento previo o posterior

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Temperatura	La construcción con ciertos materiales (por ejemplo, colocación de hormigón o núcleo de arcilla de presas) no puede llevarse a cabo en temperaturas extremas	• Planificación de la construcción para tener en cuenta las variaciones extremas de temperatura, que pueden requerir medidas adicionales durante la construcción (por ejemplo, hielo para la construcción de hormigón) o una programación revisada de la construcción
Viento	Aumento de la altura de ola y requisitos de capacidad de contención para presas	• Asegurar que los cálculos de capacidad de contención tengan en cuenta los posibles aumentos en la carga de viento
	Mayor carga de viento en estructuras (edificios, torres de transmisión, etc.)	• Asegurar que el diseño para la carga de viento tenga en cuenta los posibles aumentos de esta carga
Precipitación y flujo de corriente	La inestabilidad de la pendiente del embalse provoca que los deslizamientos de tierra y los árboles caigan en la presa	• Evaluación detallada de la estabilidad del borde del embalse que conduce a la estabilización de la pendiente en áreas de riesgo
	Peligros glaciales (por ejemplo, Inundación por desborde violento de lago glaciar, GLOF por sus siglas en inglés) que conducen a problemas de seguridad de la presa	• Monitoreo glacial que conduce a cambios operacionales • Control de la ruptura glacial del embalse • Cambio del tipo de presa para permitir el desborde
	Cambio de régimen fluvial con flujo base reducido y mayores inundaciones	• Mayor capacidad del aliviadero para permitir un mayor flujo • Considerar cambios en la metodología operativa para capturar mayor flujo de inundación en proyectos de almacenamiento • Incorporación de disposiciones para el aumento futuro de la capacidad de almacenamiento por represas y levantamiento del nivel máximo de almacenamientoFSL por sus siglas en inglés
	Aumento del material de desecho y de vegetación en el embalse debido al aumento de la escorrentía	• Rastrillos de basura adicionales, tipos de pantallas de basura y frecuencia de remoción o o automatización de basura, o un diseño de sistema más robusto

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Precipitación y flujo de corriente	Aumento / disminución de las cargas de sedimentos que afectan el régimen operativo del embalse	• Instalaciones adicionales de lavado y gestión de sedimentos, p ej.mayor almacenamiento temporal para sedimentos donde el embalse se está utilizando como desarenador. • Cambio en la metodología de operación • Permitir la excavación de materiales de construcción gruesos y arenosos en la cola del embalse • Dragado adicional
	La vegetación / algas flotantes adicionales potencialmente obstruyen las entradas	• Considerar añadir una instalación de borde tope de la presa para la limpieza de la superficie del embalse • Adición de equipos de rastrillo de rejilla para controlar la basura en la entrada
Temperatura	Aumento de la nieve que causa problemas estructurales en la central eléctrica	• Tener en cuenta las pérdidas en el modelamiento de energía eléctrica • Cobertura de la superficie del reservorio / solar flotante
	Temperatura del agua (ensuciamiento, contenido de oxígeno, estancamiento y muerte de peces)	• Monitoreo de operación y mantenimiento
Composición del aire	El aumento de CO_2 en la atmósfera estimula el crecimiento de las plantas en el embalse, con impactos negativos en la entrada	• Diseño de entradas con filtros de basura / rastrillos adecuados y consideración de operación y mantenimiento
Irradiación	Aumenta la temperatura del agua del embalse	
Central eléctrica, canal y patio de maniobras		
Precipitación y flujo de corriente	Inundación de la central eléctrica debido al aumento de la corriente fluvial	• Aumento de las defensas contra inundaciones para la central eléctrica • Traslado de la central eléctrica a un terreno más alto • Reubicación bajo tierra de la central eléctrica de superficie para mejorar la resistencia a las inundaciones fluviales • Reubicación del aliviadero para garantizar que las inundaciones se descarguen aguas abajo de la central eléctrica (por ejemplo, en un canal secundario o extendiendo el aliviadero más allá de una central eléctrica en la punta de la presa)

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Precipitación y flujo de corriente	Inundación de la central eléctrica por precipitación directa	• Mayor provisión de drenaje en y alrededor de la central eléctrica
	Mayor riesgo de inestabilidad de taludes (fallas provocadas por aguas superficiales y fallas inducidas por aguas subterráneas)	• Protección adicional de taludes y medidas de estabilización • Monitoreo de estabilidad / topografía de taludes • Reevaluación de la ubicación o alineación de la central eléctrica
	Flujos más altos / más bajos disponibles para aumentar / disminuir la capacidad instalada	• Aumento de la obra civil de la central eléctrica para que se adapte a futuras adiciones de equipos electromecánicos (por ejemplo, espacio en la central eléctrica para turbinas y generadores adicionales) • Aumento de la capacidad máxima del canal para permitir posibles descargas más altas
Temperatura	Aumento de la nieve que causa problemas estructurales en la central eléctrica	• Diseño estructural para tener en cuenta la posible carga adicional de nieve
	Aumento de la nieve que causa problemas de acceso a la central eléctrica y al patio de maniobras	• Sepermitirá el acceso a la central eléctrica por encima del nivel de la capa de nieve
Temperatura	Aumento / disminución de la temperatura dentro de la central eléctrica, que causa problemas a las personas y al equipo	• Requisitos de aire acondicionado / calefacción, aislamiento, ventilación (natural o mecánica) • Control de humedad (moho, condensación, impermeabilización)
	Aumento / disminución de la temperatura que causa problemas en la colocación del hormigón durante la construcción de la central eléctrica	• Juntas de construcción adicionales • Nuevas fórmulas de mezcla de concreto que sean más resistentes a las variaciones de temperatura • Cambio de materiales de construcción
	El aumento de la temperatura del agua causa problemas para los alternadores enfriados en circuitos cerrados	• Rediseño y posiblemente reconstrucción o modificación del sistema de enfriamiento
Temperatura	Problemas de durabilidad del material y expansión / contracción que causan grietas, lo que provoca fugas, inestabilidad o problemas estéticos	• Monolitos adicionales y/o juntas de construcción • Cambio de fórmula de la mezcla de concreto para que sea más resistentes a las variaciones de temperatura • Cambio de materiales de construcción

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Canales (por ejemplo, canales de distribución)		
Precipitación y flujo de corriente	Flujos crecientes a través de canales	• Monitoreo del movimiento de pendientes • Fallas en la superficie que causan daños (desprendimientos de rocas, deslizamientos de tierra)
	Mayor riesgo de inestabilidad de taludes (fallas provocadas por aguas superficiales y fallas inducidas por aguas subterráneas)	• Protección adicional de taludes y medidas de estabilización • Monitoreo / inspección de estabilidad de taludes • Reevaluación de la ubicación o alineación de los canales
	Aumento de la deposición de sedimentos que conduce a flujos disminuidos	• Inclusión de cuencas desarenadoras • Medidas adicionales de protección de taludes • Monitoreo / inspección de estabilidad de taludes
Temperatura	Problemas de durabilidad del material y expansión / contracción que causan grietas, lo que provoca fugas, inestabilidad o problemas estéticos	• Monolitos adicionales y/o juntas de construcción. • Nuevas fórmulas de mezcla de concreto que sean más resistentes a las variaciones de temperatura • Cambio de materiales de construcción
Equipo electromecánico		
Precipitación y flujo de corriente	Aumento de los flujos que pasarán por las turbinas	• Instalación de turbinas de velocidad variable o turbinas con mayor eficiencia para una amplia gama de descargas
	Los flujos variados resultan en diferentes cargas de sedimentos que pueden causar la erosión de la turbina	• Instalación de álabes de turbina resistentes a la corrosión
Temperatura	Agua de enfriamiento (dimensionamiento, bloqueo debido a vegetación / algas)	• Diseño para una mayor incertidumbre
	Resistencia a la corrosión (más agresiva a altas temperaturas)	• Instalación de álabes de turbina resistentes a la corrosión
Temperatura	Temperaturas de funcionamiento (impactos en la capacidad de servicio, durabilidad, clasificaciones)	• Diseño para una mayor incertidumbre

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Líneas de transmisión		
Precipitación y flujo de corriente	Mayor riesgo de inestabilidad de taludes (fallas provocadas por aguas superficiales y fallas inducidas por aguas subterráneas)	• Protección adicional de taludes y medidas de estabilización. • Monitoreo / inspección de estabilidad de taludes • Reevaluación de la ubicación de la torre de transmisión y alineamiento de la línea de transmisión • Diseño de los cimientos de la torre de transmisión para una mayor incertidumbre de estabilidad
	Inundaciones a lo largo de la ruta de la línea de transmisión	• Selección de la ruta (evitar llanuras de inundación, pendientes pronunciadas)
Temperatura	Efectos de temperatura en la capacidad del conductor	• Modificación de las especificaciones del conductor para asegurar que sea más resistente para un mayor rango de temperaturas • Efectos térmicos en las cargas de los conductores
	Aumento de la carga de nieve / hielo en torres y conductores	• Diseño de torres que tenga en cuenta una mayor carga de nieve / hielo
	Protección contra rayos (riesgo modificado)	• Asegurar que las torres de transmisión estén diseñadas para el riesgo de rayos
	Cambios atmosféricos que afectan la radiación solar / erupciones solares	
	Aumento del polvo en los aisladores	• Diseño de protección para los aisladores
	Mayor frecuencia, distribución y gravedad de los incendios forestales que dañan las líneas de transmisión y subestaciones	
	Distancia al suelo reducida por la mayor longitud del cable	• Mayor distancia al suelo
	Estabilidad problemática y anclaje frente al derretimiento del permafrost	• Diseño alternativo con base que no dependa del permafrost

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
MEDIDAS DE ADAPTACIÓN FUNCIONALES		
Almacenamiento estacional y semanal		
Cambio de régimen fluvial con mayores inundaciones y flujo base reducido	Aumento o disminución de los requisitos de almacenamiento	• Plan para el nivel operativo mínimo óptimo revisado • Disminución de la toma de corriente • Preparación de provisiones para el incremento futuro de la represa y aumento del nivel máximo de almacenamiento
		• Conversión del aliviadero de desbordamiento libre en aliviadero cerrado • Adición de compuertas fusibles al aliviadero de desbordamiento libre • Cambios en las reglas de operación, como los límites revisados del nivel del embalse para proporcionar un aumento del almacenamiento que funcione como amortiguador para inundaciones
Control de inundaciones		
Aumento de la descarga máxima de inundación	Aumento de la capacidad de evacuación de inundaciones	• Revisión mensual de las curvas guía de operación del embalse • Solo para presas de concreto, se debe considerar el borde superior máximo de la cresta de la presa con provisiones para la protección contra la erosión de la punta de la presa en casos extremos • Restricción del desarrollo de tierras dentro de las zonas susceptibles a inundaciones • Protección o remoción de áreas vulnerables • Establecimiento o revisión de un sistema de alerta temprana
Control de sedimentos		
Cambio en la carga de sedimento como resultado de cambio en el régimen de flujo	Pérdida de almacenamiento activo y/o mayores interrupciones en la generación	• Mayor provisión de almacenamiento temporal • Instalaciones de remoción de sedimentos incrementadas y/o mayores o más eficientes • Túneles / instalaciones de derivación de sedimentos (utilizando el excedente o parte del agua para transportar el sedimento más allá de las áreas de admisión) • Uso de turbinas más resilientes

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Usos multi- propósitos flexible		
Preocupaciones generales sobre el cambio climático	Cambios en los usuarios del agua no directamente asociados con las funciones hidroeléctricas	• Realización de estudios dirigidos a identificar los impactos del cambio climático sobre los diversos usuarios del agua dentro de una cuenca. • Modificación de los acuerdos legales entre varios gobiernos, partes interesadas y otras identidades que tienen un impacto en el funcionamiento de la cuenca. • Mejora de las tecnologías que se utilizan para coordinar la interacción de varios proyectos hidroeléctricos, así como la operación global de complejos que involucran varias cuencas hidrográficas. • Mejor coordinación de la operación del proyecto con otros usos del agua en la cuenca.
		• Promoción de esfuerzos educativos diseñados para informar a los ciudadanos sobre los impactos del cambio climático, con la esperanza de encontrar medidas de adaptación que compensarían por los impactos y reducirían las consecuencias negativas en la energía hidroeléctrica. • Modificación de las reglas que influyen en la recreación, el riego, el suministro de agua y la extracción de agua industrial.
Demanda de energía		
Temperatura	Niveles de demanda diaria (cambio del pico, de la tarde al mediodía) y niveles de demanda estacional (cambio del pico del invierno al verano)	• Reevaluación del tipo de esquema (carga base / pico y filo de río / almacenamiento) • Reevaluación de la necesidad de aumentar la capacidad instalada.
Mercado de la energía		
Preocupaciones generales sobre el cambio climático	Cambio en el valor de la electricidad producida	• Seguimiento de las tendencias del mercado y reevaluación periódica.
Líneas de transmisión		
Temperatura	La vegetación crece más rápido en el derecho de paso	• Mayor frecuencia de mantenimiento del derecho de paso.
	Cambios en el factor de carga del sistema (proporción de MW pico a promedio)	• Reevaluación del tipo de esquema (carga base / pico y filo de río / almacenamiento)
	Impactos en otras tecnologías (reducción térmica debido a la temperatura / disponibilidad del agua de enfriamiento, salida de energías renovables)	• Reevaluación del tipo de esquema (carga base / pico y filo de río / almacenamiento)

Variable climática	Impactos en el componente del proyecto	Potenciales medidas de adaptación resilientes
Precipitación y flujo de corriente	Aumento o disminución de la energía	• Desarrollo o mejora de herramientas de pronóstico hidrológico, incluido el desarrollo y la aplicación de medidas apropiadas para hacer frente a eventos hidrológicos extremos, específicamente con miras a estimar el modelo de energía eléctrica.
Soporte de red		
Preocupaciones generales sobre el cambio climático	Cambio en la combinación de generación / reemplazo de combustibles fósiles por energías renovables	• Mayor enfoque de hidroeléctricas en servicios complementariospara la integración de otra generación renovable. • Mayor almacenamiento necesario para respaldar la generación intermitente • Aumento de la inercia mecánica para reemplazar las plantas térmicas desmanteladas.
	Aumento de la generación “detrás del medidor” (behind-the-meter)	• El despacho se vuelve más importante a medida que aumenta la cantidad de generación de electricidad no controlada.
	Cambio de combustibles fósiles a electricidad para la calefacción de espacios	• Nueva generación hidroeléctrica necesaria para satisfacer la creciente demanda de energía.
	Cambio de combustibles fósiles a electricidad para el transporte	• Nueva generación hidroeléctrica necesaria para satisfacer la creciente demanda de energía.
Operación de activos hidroeléctricos		
		• Desarrollo de tecnologías mejoradas para evaluar el desempeño de los proyectos e identificar formas de operarlos bajo condiciones climáticas modificadas. • Creación de organismos reguladores que tienen el mandato de desarrollar y aplicar estrategias operativas mejoradas.

Financiado por:

Liderado por:

En alianza con:

AICCA
Proyecto Adaptación a los impactos del cambio climático en recursos hídricos en los Andes

gef

CAF
BANCO DE DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA

CONDESAN
Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina

Lenín

Toda una Vida

EL GOBIERNO DE TODOS

Calle Madrid 1159 y Andalucía • Código Postal: 170525 / Quito - Ecuador • Teléfono: 593-2 398-7600
www.ambiente.gob.ec