

Efectos del cambio climático en la costa  
de América Latina y el Caribe

# Riesgos



NACIONES UNIDAS

CEPAL



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

MINISTERIO  
DE ASUNTOS EXTERIORES  
Y DE COOPERACIÓN

UC  
UNIVERSIDAD  
DE CANTABRIA



IH cantabria  
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**Efectos del cambio climático en la costa  
de América Latina y el Caribe**

**RIESGOS**

**Alicia Bárcena**  
Secretaria Ejecutiva

**Antonio Prado**  
Secretario Ejecutivo Adjunto

**Joseluis Samaniego**  
Director  
División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos

**Ricardo Pérez**  
Director  
División de Documentos y Publicaciones

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de las Organizaciones participantes.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas. Los Estados miembros y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Sólo se les solicita que mencionen la fuente e informen a las Naciones Unidas de tal reproducción.

Esta publicación puede obtenerse dirigiéndose a:

División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL, página web: [www.cepal.org/ddisah](http://www.cepal.org/ddisah)

Foto portada © Gabriel Barajas Ojeda  
Publicación de las Naciones Unidas

LC/W.483

Copyright © Naciones Unidas, julio de 2012. Todos los derechos reservados  
Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile

Efectos del cambio climático en la costa  
de América Latina y el Caribe

# Riesgos



NACIONES UNIDAS

CEPAL



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

MINISTERIO  
DE ASUNTOS EXTERIORES  
Y DE COOPERACIÓN



IHcantabria  
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Este documento fue elaborado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria bajo la dirección del proyecto de Iñigo Losada Rodríguez, la coordinación de Fernando J. Méndez Incera y la participación de los investigadores Borja González Reguero, Sonia Castanedo Bárcena, Gabriel Díaz Hernández, Raúl Medina Santamaría, Pedro Díaz Simal, Bárbara Ondiviela Eizaguirre, Roberto Mínguez Solana, Ana J. Abascal Santillana, Antonio Espejo Hermosa, Cristina Izaguirre Lasa, Paula Camus Braña, Oscar García Aguilar, Pino González-Riancho Calzada, Melisa Menéndez García, José Antonio Juanes de la Peña y Antonio Tomás Sampedro. Por parte de la CEPAL el equipo que coordinó y supervisó el estudio fue Carlos de Miguel, Oficial de Asuntos Ambientales, José Javier Gómez, Oficial de Asuntos Económicos, Karina Martínez y Mauricio Pereira, Asistentes de investigación, todos ellos de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Este documento forma parte del estudio regional de los efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe, financiado por el Gobierno de España. El estudio se enmarca dentro del programa Iberoamericano de Adaptación al Cambio Climático (PIACC) siendo una prioridad identificada por los países de la Red Iberoamericana de Oficinas de Cambio Climático (RIOCC).

Se agradece especialmente el apoyo del personal de la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, en particular de Paz Valiente, Ana Pintó, José Ramón Picatoste y Alfonso Gutiérrez.

Además se agradece la colaboración de Felipe Fernández Pérez, Sheila Abad Herrero, Patricia Fernández Quintana, Felipe Maza y Nabil Kakeh Burgada, técnicos del Instituto de Hidráulica de Cantabria, y los comentarios de Rodrigo Cienfuegos, investigador del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

## Índice

<b>1. Introducción</b>	7
1.1 Contexto	7
1.2 Escalas espaciales de estudio	8
1.3 Situaciones de impacto consideradas	11
1.4 Breve descripción de la metodología de riesgo planteada	12
<b>2. Riesgo en las obras marítimas</b>	19
2.1 Término de peligrosidad/ <i>hazard</i> considerado	19
2.2 Término de exposición considerado	20
2.3 Término de vulnerabilidad considerado	22
2.4 Evaluación del riesgo integrado	22
2.5 Estabilidad de la obra a partir de la variación de altura de cálculo. Análisis del índice de seguridad en la región	23
<b>3. Riesgo frente a inundación por 1 m de ascenso del nivel del mar</b>	25
3.1 Riesgo para la población	25
3.2 Riesgo en los ecosistemas afectados	27
<b>4. Riesgo frente a eventos de inundaciones extremas en la costa</b>	31
<b>5. Riesgo frente a erosión en las playas</b>	33
5.1 Uso defensivo de las playas	34
5.2 Las playas como recurso recreativo	37
5.3 Conclusiones	39
<b>6. Referencias</b>	41

### Índice de figuras

Figura 4.1 Tipos de escalas de estudios de cambio climático en las costas	9
Figura 4.2 Definición y marco general de la metodología planteada para la integración del riesgo	13
Figura 4.3 El triangulo del riesgo	13
Figura 4.4 Elementos constitutivos del riesgo, tetraedro del riesgo	14

Figura 4.5	Función de densidad de la variable aleatoria que define la peligrosidad (agente o amenaza, <i>hazard</i> ).....	15
Figura 4.6	Discretización en términos de la magnitud del agente para la posterior evaluación del riesgo .....	16
Figura 4.7	Variación de la probabilidad de fallo de los diques en 2040 y 2070 respecto a la probabilidad en 2010.....	20
Figura 4.8	Longitud de diques de abrigo identificados en los puertos de ALyC.....	21
Figura 4.9	Longitud de diques identificados en ALyC. Clasificación por países .....	21
Figura 4.10	Nivel de riesgo estimado en el nivel de fallo de las obras marítimas en 2040 y 2070 respecto de 2010 .....	23
Figura 4.11	Índice de seguridad en 2040 y 2070.....	24
Figura 4.12	Variación del riesgo de inundación según el número de personas afectadas en algunas unidades de estudio en las costas de Puerto Rico .....	26
Figura 4.13	Nivel de riesgo por inundación por ascenso del nivel del mar de 1 m según los habitantes afectados .....	27
Figura 4.14	Variación del riesgo en términos de la valoración de ecosistemas afectados en algunas unidades de estudio en la costa de Ecuador .....	28
Figura 4.15	Nivel de riesgo por inundación de 1 m de ascenso del nivel del mar en cuanto al valor económico de los ecosistemas afectados .....	29
Figura 4.16	Nivel de riesgo por inundación en términos de población afectada para periodo de retorno de 500 años .....	32
Figura 4.17	Esquema de retroceso de la línea de costa y protección urbana .....	33
Figura 4.18	Nivel de riesgo por erosión de las playas debido a la intensidad del oleaje en los años 2040 y 2070.....	35
Figura 4.19	Nivel de riesgo por erosión de las playas debido al nivel del mar en los años 2040 y 2070. Playas como defensa .....	36
Figura 4.20	Nivel de riesgo por erosión de las playas ante una subida del nivel del mar de 1 m, correspondiente al escenario E. Playas como defensa .....	36
Figura 4.21	Nivel de riesgo por erosión de las playas debido al cambio en la intensidad del oleaje en los años 2040 y 2070. Playas como recurso .....	37
Figura 4.22	Nivel de riesgo por erosión de las playas debido al cambio en el nivel del mar en los años 2040 y 2070. Playas como recurso.....	38
Figura 4.23	Nivel de riesgo por erosión ante una subida del nivel del mar de 1m, correspondiente al escenario de impacto E. Playas como recurso.....	38

### Índice de cuadros

Cuadro 4.1	Esquema y documentos del proyecto .....	8
Cuadro 4.2	Características de las escalas de estudio del riesgo consideradas .....	11
Cuadro 4.3	Escenarios o situaciones contemplados en el análisis de impactos .....	12
Cuadro 4.4	Vulnerabilidad de los diques de defensa de los puertos.....	22
Cuadro 4.5	Términos utilizados en la definición del riesgo de erosión de las playas para la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad.....	34

# 1. Introducción

## 1.1 Contexto

El estudio regional de los efectos del cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe (ALyC en adelante) se ha estructurado en cuatro partes principales en concordancia con una metodología integral de evaluación del riesgo desarrollada durante el estudio. Como resultado del proyecto se presentan cuatro documentos principales que versan sobre el análisis de los agentes, el estudio de la vulnerabilidad de las costas, la evaluación de los impactos derivados y, por último, un documento dedicado a la integración de todos los factores en la evaluación de los riesgos asociados a algunos de los impactos estudiados en las costas de la región.

Como productos auxiliares se presenta un anexo de efectos del cambio climático que recoge las formulaciones teóricas utilizadas y constituye un manual de los conceptos, procesos y fenómenos costeros, analizados en el estudio entre muchos otros. Además en el citado documento se presentan las expresiones para la evaluación de los impactos de una forma aproximada (método de las perturbaciones) que se pueden utilizar como primer diagnóstico en futuros proyectos locales y regionales. Adicionalmente, la metodología desarrollada para el estudio del riesgo de forma integral se describe en un documento específico (guía metodológica). Por último, en el marco del proyecto se ha desarrollado un visor web de los resultados para potenciar la difusión de los mismos en los países de la región. En concreto, los documentos del proyecto son:

- Documento 1: Dinámicas, tendencias y variabilidad climática en ALyC
- Documento 2: Vulnerabilidad y exposición de las costas de ALyC frente al cambio climático
- Documento 3: Impactos del cambio climático en las costas de ALyC
- Documento 4: Evaluación de riesgos frente al cambio climático en las costas de ALyC
- Efectos teóricos el cambio climático en las costas (documento auxiliar)
- Guía metodológica del análisis del riesgo (documento auxiliar)
- Visor web de resultados



El cuadro 4.1 resume la estructura y los productos del estudio realizado. En concreto, el presente documento es el último de los cuatro documentos principales y se dedica a la integración de las componentes de los impactos, vulnerabilidad y exposición para la evaluación de algunos de los riesgos contemplados en ALyC.

**CUADRO 4.1**  
**ESQUEMA Y DOCUMENTOS DEL PROYECTO**

Cambio Climático en las costas de ALyC			
<b>Documento 1:</b> <b>Agentes costeros</b>	<b>Documento 2:</b> <b>Vulnerabilidad</b>	<b>Documento 3:</b> <b>Impacto</b>	<b>Documento 4:</b> <b>Riesgos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dinámicas</li> <li>• Tendencias</li> <li>• Variabilidad climática en la costa</li> </ul>			
Documentos auxiliares			
Efectos teóricos del cambio climático en las costas	Guía metodológica	Visor web de resultados	

**Fuente:** Elaboración propia.

## 1.2 Escalas espaciales de estudio

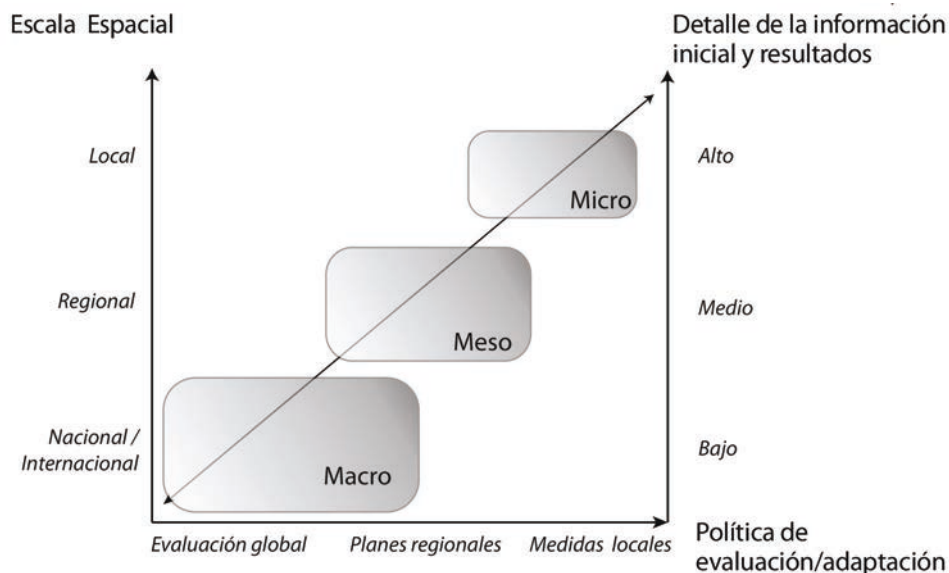
Centrando la discusión en la inundación, mientras que la investigación y las políticas de protección frente a inundaciones han estado dominadas hasta ahora por aproximaciones meramente técnicas, los aspectos sociales y socioeconómicos han ganado en importancia en las últimas décadas debido a un uso del suelo expansivo e intensivo, el incremento en daños potenciales en las áreas de inundación y, por tanto, conflictos frecuentes entre el uso socioeconómico del suelo y las políticas de protección (Schanze, 2002). Durante los últimos años se está llevando a cabo un cambio de paradigma, desde un punto de vista técnico en la gestión del riesgo por inundación, incluyendo una metodología del análisis de riesgo que incluye todas las ventajas y desventajas, o en términos económicos, todos los beneficios y los costes

Siguiendo la terminología de la teoría del riesgo en inundaciones más desarrollada hasta el momento en proyectos como *Floodsite* ([www.floodsite.net](http://www.floodsite.net)) o *Comrisk* (*Common Strategies to Reduce the Risk of Flooding in Coastal Lowlands*), se hace distinción entre tres tipos de alcance y escala de los estudios: macro, meso y microescala –figura 4.1–. Esta escala es aplicable a los estudios de evaluación de riesgos de cambio climático en las costas puesto que comparte aspectos y similitudes con la evaluación de inundaciones en cuanto a la escala espacial de los estudios, tipo y escala de información y estrategias y medidas de adaptación se refiere. En primer lugar, el detalle de la escala espacial es determinante para la aproximación al estudio y la respuesta que se pretende dar. A este respecto, se puede considerar una escala nacional o internacional, a efectos de comparación entre países o regiones, identificando las zonas con mayor o menor riesgo. Desde la perspectiva de la macroescala, la información de que se dispone tiene un detalle espacial bajo, presenta la imposición de una necesidad de homogeneidad en la información, que hace que la información disponible en unas zonas y en otras no, no pueda ser utilizada. Tanto la escala espacial como la de la información de base ejercen un condicionante directo en los resultados que se pueden obtener. Igualmente, las estrategias que se pueden adoptar quedan en el dominio de la intercomparación global, entre países o regiones, definiendo zonas de riesgos especialmente importantes que será necesario estudiar a una escala más detallada.

En un dominio de estudio más detallado, o mesoescala, la definición espacial aumenta, así como la información de partida de los estudios, disponiendo de datos más abundantes, de más resolución y sobre más aspectos tanto físicos como socioeconómicos, ya que la necesidad de homogeneidad de la información ya solo es exigible a nivel de un país o región, dependiendo únicamente de los organismos y administraciones nacionales o regionales. En este caso las cuentas y balances, datos geofísicos, etc. son más sencillos de conseguir, detallados y variados. Los resultados que se pueden extraer en este grado de estudio son cuantitativamente más fiables que a una escala macro. En consecuencia, estrategias más concretas de actuación, con análisis y conclusiones más detallados, que puedan derivar en actuaciones y diagnósticos de mayor concreción, sí son posibles con este tipo de evaluación.

No obstante, para tomar medidas concretas de adaptación, tales como proyectos específicos de defensa de la costa, protección frente a inundaciones, etc. un estudio de detalle del elemento geomorfológico sobre el que se va actuar es determinante. Véase, por ejemplo, el caso de una playa donde se pretende realizar una defensa frente a la erosión costera. En este caso es necesario un estudio preciso de la configuración geomorfológica e hidrodinámica para establecer de forma precisa cuál va a ser su evolución frente a las distintas alternativas posibles de protección. En este caso, la información necesaria es más detallada y local de la unidad de estudio así como también lo es la escala espacial puesto que se debe resolver el proceso físico que tiene lugar con sus condicionantes y características locales.

**FIGURA 4.1**  
**TIPOS DE ESCALAS DE ESTUDIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS**



**Fuente:** Meyer, V. (2005), Methoden der Sturmflut-Schadenpotentialanalyse an der deutschen Nordseeküste, Dissertation at the University of Hannover, UFZ-Dissertation 3/2005.

La principal diferencia entre el enfoque desde un punto de vista macro, meso o micro está en relación con el detalle espacial que se quiera alcanzar en el análisis de daño, ya que la resolución espacial viene condicionada por la diferenciación de usos y tipos de suelo, datos socioeconómicos y su distribución espacial y los procesos físicos a resolver.

En el caso que nos ocupa, para el análisis de ALyC, claramente estamos en una situación macroescalar, con varios condicionantes para el tipo de información a procesar:

- Homogeneidad de la información para los más de 72.000 km de estudio.
- Fuentes de información contrastadas.
- Escala espacial de estudio suficientemente detallada para alcanzar a identificar impactos en las costas (resolución de los procesos costeros) y suficientemente grande como para que sea susceptible de un análisis continental a efectos comparativos interterritoriales.

Un estudio macroescalar como el del presente proyecto, se caracteriza porque las fuentes de datos suelen provenir de estadísticas oficiales y organismos (inter)nacionales. A escala nacional depende de las estadísticas y datos del propio país, mientras que cuando se trata de estudios internacionales se ha de recurrir a datos (globales generalmente) de organismos internacionales: Organización de las Naciones Unidas (ONU), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), World Wild Fund (WWF), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), etc. o de comunidades de países (Unión Europea,). A este nivel se puede realizar una desagregación de ciertos datos macroeconómicos a un nivel inferior al nacional mediante el uso de otras variables desagregadas como la población o el número de empleados, lo que equivale a asumir una distribución uniforme de ciertas variables de las que no se dispone de la distribución espacial. Por la definición de los datos, estos métodos adolecen de inexactitud en el resultado pero sirven para identificar el daño potencial así como permiten la comparación del riesgo entre macro-zonas espaciales.

Queda claro que las estadísticas y censos nacionales superan en grado de detalle y definición la información considerada a esta escala pero, sin embargo, la restricción de homogeneidad de la información impone un límite al uso de los datos nacionales de distintas fuentes. Además, muchos de los datos globales se disponen tan sólo en un año determinado (p.ej. año 2000 para los datos de población) y pueden estar desactualizados con los últimos disponibles en algunos países. No obstante, a efectos comparativos y de diagnóstico de los problemas y de los posibles impactos en las costas de ALyC, son adecuados ya que realizan el análisis entre unidades de estudio con homogeneidad en la información.

Respecto a los estudios de mesoescala, estos estudios, al estar basados normalmente en datos nacionales, disponen de más y mejores fuentes de información y de desagregación espacial, al menos a escala de regiones o municipios. Esto permite la caracterización de distintas zonas a partir de la distribución espacial de los datos disponibles. Por ejemplo, en este caso la distribución de renta ya no se distribuye en función de los habitantes, sino que probablemente se cuente con datos de distribución espacial de renta permitiendo nuevas visiones, por ejemplo, definir una zonificación del dominio en función de la renta por habitante. También permite incorporar otros sectores de los que a una escala internacional puede que no se dispusiera de información, tales como sectores económicos, infraestructuras o ecosistemas concretos. En este caso, la cantidad de valor comprometido puede ser determinado con mayor rigor. No obstante, todavía mantiene cierta incertidumbre debido a no poder resolver los procesos físicos con sus características concretas o no poder desagregar cada dato en nuevas subcategorías.

En el contexto de estudios de microescala, se analiza el daño y el valor asociado de cada unidad impactada, resolviendo los procesos físicos y determinando con menor grado de incertidumbre la evolución y el daño previsible. Los datos se desagregan por categorías dentro de cada clasificación y se dispone de una distribución espacial más detallada. Como ejemplo, en la erosión de una playa se dispondría de las características físicas de la misma, los edificios por categorías que se sitúan tras ella, dinámicas marinas, población y riqueza distribuidas espacialmente a escala de cientos de metros, costes de reconstrucción y afección por unidad de longitud erosionada, etc.

## CUADRO 4.2

### CARACTERÍSTICAS DE LAS ESCALAS DE ESTUDIO DEL RIESGO CONSIDERADAS

Escala	Alcance del estudio	Nivel de gestión	Exactitud de los resultados	Número datos de entrada	Resolución datos de entrada
MACRO	(Inter)nacional	Políticas globales de mitigación del daño	Bajo	Bajo	Bajo
MESO	Regional	Estrategias de adaptación de gran escala	Medio	Medio	Medio
MICRO	Local	Medidas concretas de adaptación	Alto	Alto	Alto

**Fuente:** Adaptado de Meyer, V. (2005), *Methoden der Sturmflut-Schadenpotentialanalyse an der deutschen Nordseeküste*, Dissertation at the University of Hannover, UFZ-Dissertation 3/2005; y Gewalt M. y otros (1996), *EUROflood – Technical Annex 8. Economic Assessment of Flood Hazards. Regional Scale Analysis-Decision Support System (RSA-DSS)*, München.

### 1.3 Situaciones de impacto consideradas

Los impactos se evalúan a partir de formulaciones que relacionan los agentes con los efectos en las costas. Una descripción detallada de los mismos, así como las distintas formulaciones que relacionan las dinámicas con los impactos se puede encontrar en el anexo de efectos teóricos.

Los impactos se presentan en diversas escalas temporales. Así por ejemplo, la inundación costera puede considerarse a muy largo plazo por efecto de una subida del nivel del mar debido principalmente a la expansión térmica de los océanos y al deshielo polar, en escala de años, o como eventos de inundación en la escala de horas o días, asociadas a un cambio en los comportamientos meteorológicos actuales (cambios de patrones, intensidades y direcciones de tormentas). Asimismo, los impactos sobre los puertos también se deben analizar en las variables en la escala de estudio de horas ya que la afección se va a dar en fenómenos puntuales que van a provocar la parada o el fallo de los puertos o sus obras marítimas. Así, ante la diversidad de escalas temporales de análisis, cada impacto necesita un estudio particularizado del mismo. No obstante, todos ellos se pueden evaluar en los años horizonte 2040, 2050 y 2070.

En este estudio se contemplan ocho escenarios o situaciones de análisis (véase documento 3 “Impactos”). Los tres primeros escenarios (A, B y C) se corresponden con la extrapolación estadística de las tendencias de largo plazo obtenidas para cada impacto. Los escenarios D y E se definen como aquellos impactos asociados a una sobreelevación del nivel del mar de 0,5 y 1 m, respectivamente, basados en las proyecciones IPCC de subida del nivel del mar. En aquellos impactos compatibles con estas subidas del nivel del mar se han utilizado las proyecciones estadísticas para obtener el efecto conjunto de ambos como un límite superior del impacto. Dada la importancia de la variabilidad interanual de las dinámicas en la zona (véase documento 1 “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”) se ha contemplado en un escenario F la situación del ascenso del nivel del mar que se produciría con un evento Niño de intensidad igual al máximo histórico (1998) sin ascenso del nivel del mar para fines comparativos (F1) y en una situación futura donde el nivel del mar fuese 1 m más alto, con base en proyecciones IPCC (F2). El mismo análisis se realiza para el evento Niña máximo histórico en el escenario G (G1 y G2). Por último, y aunque en los huracanes no ha sido posible analizar si se están produciendo cambios sí que se contemplan los impactos que se producirían en la actualidad de darse en cada punto de la costa los máximos valores históricos calculados de sobreelevación del nivel del mar (H1) y en una situación con el nivel del mar 1 m por encima de la actualidad (H2) en una situación de cambio climático.

**CUADRO 4.3**  
**ESCENARIOS O SITUACIONES CONTEMPLADOS EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS**

ID. Escenario	Año de corte	Método	Dinámicas consideradas	Variantes-Observaciones	
A	2040	Tendencias estadísticas	Tendencias estadísticas. Todas	-	
B	2050	Tendencias estadísticas	Tendencias estadísticas. Todas	-	
C	2070	Tendencias estadísticas	Tendencias estadísticas. Todas	-	
D	2100	Justificación con escenario SLR IPCC	Subida del nivel del mar de 0,5 m	Tendencias estadísticas del resto de dinámicas del 2070	
E	2100	Justificación con escenario SLR IPCC	Subida del nivel del mar de 1 m	Tendencias estadísticas del resto de dinámicas del 2070	
F	F1	2010	Niño98	Nivel del mar	Niño de 1998 en la actualidad.
	F2	2100	Niño98 + escenario SLR IPCC	Subida del nivel del mar de 1 m	Niño de 1998 con escenario de CC
G	G1	2010	Niña89	Nivel del mar	Niña de 1989 en la actualidad
	G2	2100	Niña89 + escenario SLR IPCC	Subida del nivel del mar de 1 m	Niña de 1989 con escenario de CC
H	H1	2010	Huracanes	Nivel del mar y cota de inundación	Huracanes en la actualidad
	H2	2100	Huracanes + escenario SLR IPCC	Subida del Nivel del mar de 1 m	Huracanes en escenario de CC

**Fuente:** Elaboración propia.

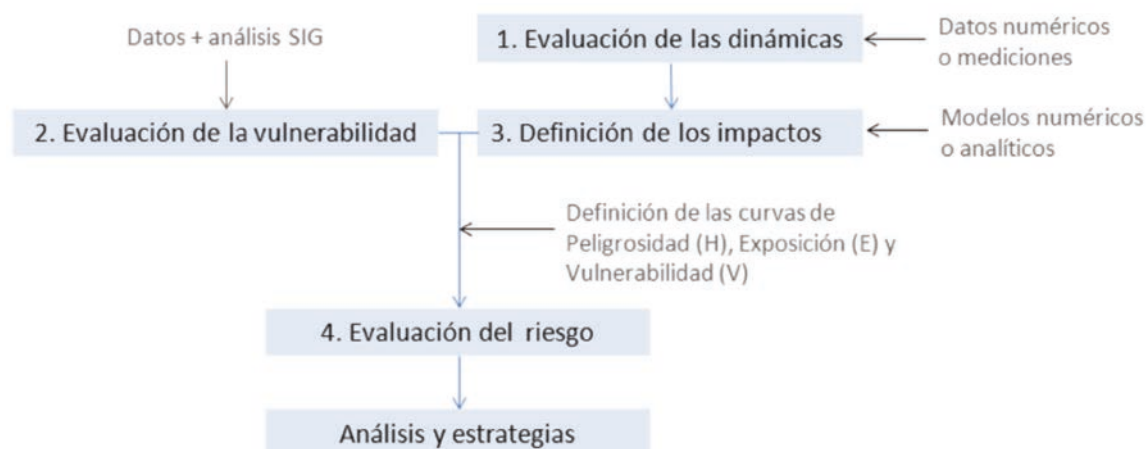
A continuación se analiza el riesgo sobre diversos elementos de la costa en algunas de estas situaciones de estudio.

## 1.4 Breve descripción de la metodología de riesgo planteada

La figura 4.2 muestra un esquema del desarrollo metodológico que se propone. Partiendo de la evaluación de las dinámicas, a partir de una correcta definición estadística actual (de datos numéricos y/o mediciones registradas) e infiriendo la estadística futura (por simulación o técnicas estadísticas), se definen los impactos derivados de los cambios y su distribución estadística. Esto, complementado con un análisis de la vulnerabilidad y la exposición de los medios socioeconómico y físico, generalmente basado en una gran asimilación de datos geospaciales, permite la definición de la evaluación del riesgo, su análisis y la toma de decisiones derivadas, tales como estrategias de adaptación.



**FIGURA 4.2**  
**DEFINICIÓN Y MARCO GENERAL DE LA METODOLOGÍA PLANTEADA**  
**PARA LA INTEGRACIÓN DEL RIESGO**



**Fuente:** Elaboración propia.

Es indudable que la estimación de las pérdidas futuras esperadas es un asunto de vital interés para los responsables en planificación del desarrollo, de la gestión de infraestructuras o de la administración pública en una determinada región. El tipo de estimación de pérdidas requerido por los mismos depende del propósito del estudio. Por ejemplo, un estudio se puede centrar únicamente en la estimación de pérdidas físicas de edificios, infraestructuras y equipos, mientras que en otros casos, el número de víctimas humanas y el número de damnificados sin casa puede ser igualmente importante. En el caso de planificación de desarrollo a largo plazo, también deben estimarse aspectos tales como las pérdidas económicas.

En la literatura existente está ampliamente reconocido que a la hora de evaluar el riesgo, este depende principalmente de los componentes: agente o amenaza (*hazard, H*), exposición (*exposure, E*), y vulnerabilidad (*vulnerability, V*), configurando lo que se conoce como el triángulo del riesgo (risk triangle), y que se ha aplicado principalmente para la investigación en desastres naturales (véase la figura 4.3).

**FIGURA 4.3**  
**EL TRIÁNGULO DEL RIESGO**



**Fuente:** Schneiderbauer, S. y D. Ehrlich (2004), Risk, hazard and people's vulnerability to natural hazards. A review of definitions, concepts and data. European Commission. Joint Research Centre. Luxemburgo.

Por lo tanto, se define el riesgo,  $R$ , como:

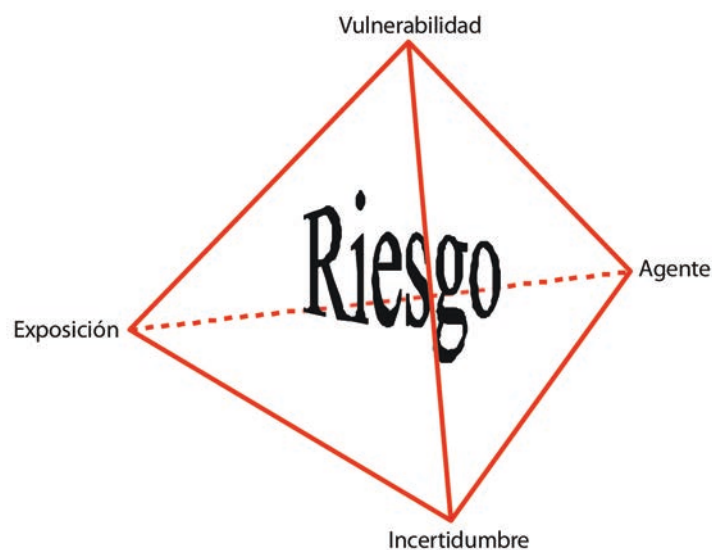
$$R_{ah} = H_{ah} E_a V_{ah} \quad (4.1)$$

donde los subíndices  $a$  y  $h$  hacen referencia a una localización geográfica, y una amenaza con su magnitud asociada, respectivamente.

En este proyecto, la expresión (4.1) es insuficiente para poder emplear toda la información disponible de agentes, infraestructuras y actividades socioeconómicas a lo largo del litoral. Por este motivo, basándonos en los estudios existentes y en metodologías para la determinación de fiabilidad de obras civiles, se va a desarrollar una expresión que permita i) calcular el riesgo de forma coherente con la definición proporcionada en la sección anterior y ii) introducir toda la información disponible.

Por ese motivo, a la hora de estimar el riesgo se van a considerar los factores: agente (*hazard*), incertidumbre (*uncertainty*), exposición (*exposure*), y vulnerabilidad (*vulnerability*) (véase la figura 4.4), y que se definieron en la sección anterior. Nótese que estos elementos constituyen el tetraedro del riesgo (“*risk tetrahedral*”), y son los elementos que se emplearán en este estudio para la determinación cuantitativa del riesgo.

**FIGURA 4.4**  
**ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL RIESGO, TETRAEDRO DEL RIESGO**



**Fuente:** Elaboración propia.

El primer paso para el desarrollo de la metodología propuesta es recabar información sobre cada uno de estos elementos que componen el riesgo que se pretende evaluar, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

Los agentes (*hazard*) que intervienen en la estimación del riesgo pueden depender de otros agentes o variables que tienen una determinada distribución de probabilidad y, por tanto, es necesario tener información de cada una de esas variables para poder cuantificar de forma lo más precisa posible la incertidumbre asociada a cada magnitud del evento considerado. Así por ejemplo, si se desea estudiar el riesgo de inundación en la costa, el agente con el que se va a evaluar el riesgo es la cota de inundación ( $Z$ ), que a su vez depende de otras variables o agentes como son el nivel del mar ( $X$ ), y el oleaje ( $Y$ ).

Nótese que las mayúsculas hacen referencia a que la variable es aleatoria. De esta manera se está en disposición de calcular la incertidumbre asociada a cada nivel de inundación. A este punto tratan de dar respuesta los documentos 1 y 3 del proyecto sobre dinámicas costeras e impactos derivados en las costas.

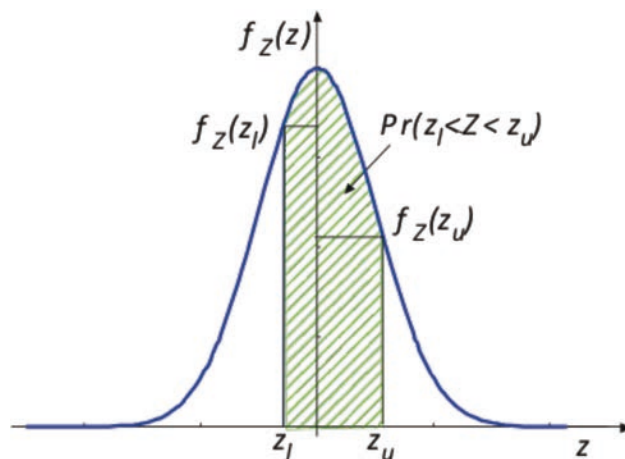
Otro factor importante es la determinación de la exposición (*exposure*), o zona afectada, según la magnitud del agente. En el caso de analizar el riesgo de inundación costera, para calcular la exposición ( $m^2$  afectados) para cada nivel de inundación posible, se precisa un modelo digital del terreno para poder evaluar qué zonas se ven afectadas por la inundación. Nótese que a este nivel no importa conocer qué elementos hay en la zona expuesta, ya que ese efecto ya se considera en la vulnerabilidad.

Para estimar la vulnerabilidad (*vulnerability*) es importante determinar la sensibilidad (*sensibility or susceptibility*) y la capacidad de adaptación o resiliencia (*adaptive capacity or resilience*) de los distintos elementos identificados en la zona expuesta, en función de la intensidad del evento asociado al agente y es, por tanto, un parámetro multidimensional. Nótese que los posibles daños producidos por una inundación dependen, por ejemplo, del nivel de agua que se alcance en cada zona, y para cada nivel de agua, ese daño se debería cuantificar de forma diferente. Posteriormente se desarrolla de forma más precisa cómo se va a tratar la vulnerabilidad para cada tipo de riesgo considerado en este trabajo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones se va a proceder a definir matemáticamente el riesgo, y posteriormente se establece, de forma matemática, la metodología que se emplea en el proyecto (véase documento auxiliar “Guía metodológica” para más detalles de análisis del riesgo).

En la figura 4.5 se muestra la función de densidad y la probabilidad de que la variable aleatoria que define la peligrosidad (el agente o amenaza, *hazard*) esté entre los valores  $z_l$  y  $z_u$ . Nótese que esa probabilidad representa, para el agente concreto, cuál es la incertidumbre asociada a que se encuentre entre esos dos valores, y se corresponde con la integral mostrada en la figura 4.5. En el capítulo dedicado a las dinámicas se explica cómo se han determinado o estimado esas probabilidades cuantitativamente en cada caso considerado.

**FIGURA 4.5**  
**FUNCIÓN DE DENSIDAD DE LA VARIABLE ALEATORIA QUE DEFINE LA PELIGROSIDAD (AGENTE O AMENAZA, HAZARD)**



Fuente: Elaboración propia.

Con esta información, la ecuación genérica del riesgo para un agente determinado  $z$ , asociado a una localización geográfica concreta, se define de la siguiente manera:

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_z(z)E(z)V(z)dz \quad (4.2)$$

donde  $E(z)$  es la exposición de la zona de estudio para el valor del agente  $z$ , que en el caso del riesgo de inundación, representa la superficie de costa inundada para una cota de inundación dada. Análogamente,  $V(z)$  es la vulnerabilidad asociada al valor del agente  $z$ , y  $R$  es el valor esperado del daño.

Nótese que la anterior expresión matemática del riesgo se corresponde con la definición propuesta para este proyecto (4.1), ya que representa el valor esperado de la exposición por la vulnerabilidad, y es una estimación del valor esperado de las pérdidas.

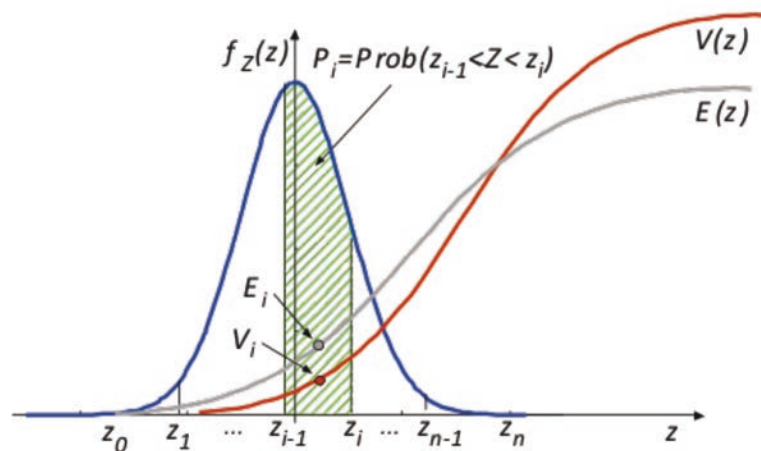
Es importante resaltar que la expresión (4.1) constituye una conceptualización genérica, que permite obtener muchas de las definiciones de riesgo existentes en la literatura como particularizaciones de la misma.

Desde el punto de vista práctico es inviable trabajar de forma diferencial empleando la expresión (4.2), ya que es complicado definir de forma continua tanto la función de exposición como la de vulnerabilidad. Por ese motivo la ecuación (4.2) se discretiza e integra mediante la regla del trapecio de la siguiente manera:

$$R \approx \sum_{i=1}^n P_i E_i V_i \quad (4.3)$$

donde  $n$  es el número de subintervalos en los que se discretiza la magnitud del agente,  $P_i$  es la probabilidad de que el agente  $z$  se encuentre entre los valores de cota del intervalo  $i$ -ésimo,  $E_i$  es la exposición que se produce para el valor medio del agente  $(z_{i-1} + z_i) / 2$ , y  $V_i$  es la vulnerabilidad que se produce para el valor del agente  $(z_{i-1} + z_i) / 2$ . La interpretación gráfica de la discretización se muestra en la figura 4.6.

**FIGURA 4.6**  
**DISCRETIZACIÓN EN TÉRMINOS DE LA MAGNITUD DEL AGENTE PARA LA POSTERIOR EVALUACIÓN DEL RIESGO**



Fuente: Elaboración propia.

Como se ve, la expresión (4.3) coincide con la definición de riesgo como producto de probabilidad (discreta) multiplicado por exposición y por vulnerabilidad, utilizada en otros estudios en la literatura.

Alternativamente, hay autores que definen el producto  $E(z_{lim})V(z_{lim})$  como las consecuencias,  $C$ , de esta manera la expresión (4.3) se simplifica y queda como:

$$R = E(z_{lim})V(z_{lim})P = C \times P \quad (4.4)$$

donde el riesgo es igual a la probabilidad por las consecuencias, expresión, esta última, que también se emplea en la literatura.

La vulnerabilidad cambia con el tipo de agente y la severidad del mismo. La determinación del riesgo requiere del conocimiento sobre la distribución espacial de la ocurrencia de los eventos asociados a los agentes y de los elementos en riesgo.

En el siguiente apartado se trata el análisis de los términos de exposición y vulnerabilidad de la ecuación básica de evaluación del riesgo en la metodología planteada.



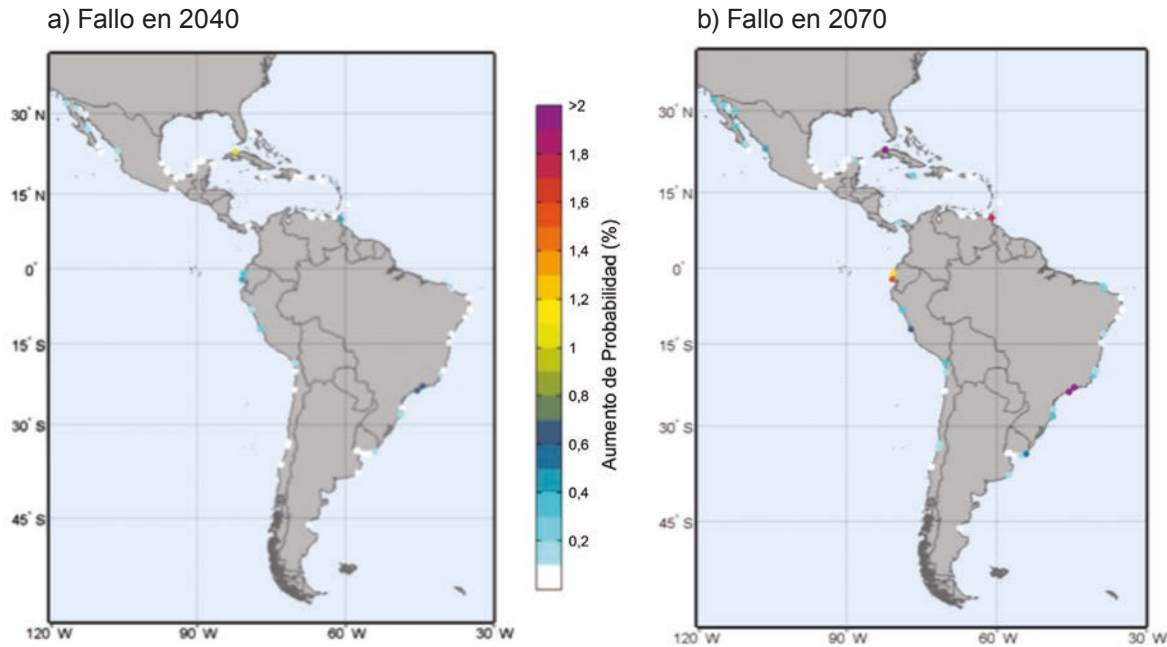


## 2. Riesgo en las obras marítimas

### 2.1 Término de peligrosidad/*hazard* considerado

Para evaluar el término de peligrosidad en la evaluación del riesgo de fallo de las obras de abrigo, se considera la probabilidad de exceder la altura de cálculo en las obras de defensa de los dos tipos de puertos considerados, nivel I y II. Esta altura de cálculo viene definida por la que tiene un período de retorno de 500 o 250 años, según el caso. La figura 4.7 muestra para 2040 y 2070 la variación espacial del incremento de la probabilidad de la altura de ola de cálculo con respecto a la de 2010 fijada de forma homogénea para todo el dominio de estudio, como la correspondiente a la de un período de retorno de 500 años, es decir,  $p=1/500=0,002$ . En los dos años horizonte, 2040 y 2070, estas probabilidades representadas varían entre localizaciones debido a que las tendencias de las alturas de ola extremas son variables en el espacio (véase documento 1 sobre dinámicas costeras).

**FIGURA 4.7**  
**VARIACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLO DE LOS DIQUES EN 2040 Y 2070**  
**RESPECTO A LA PROBABILIDAD EN 2010**  
*(Porcentaje)*



**Fuente:** Elaboración propia.

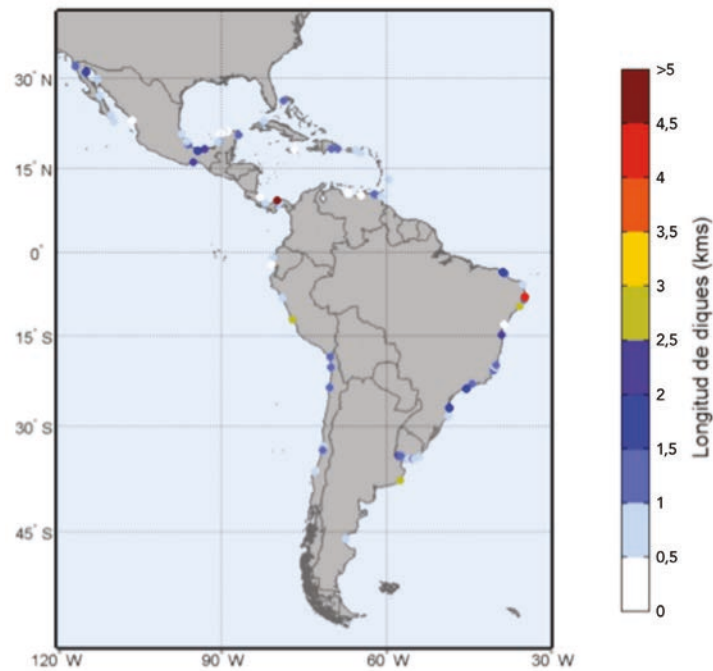
Nota: Se consideró la probabilidad en 2010 como (1/500=0,002).

## 2.2 Término de exposición considerado

Para analizar el riesgo de un elemento es necesario identificar la exposición del mismo ante la amenaza. En el caso de las obras marítimas, se ha escogido la longitud de los diques de protección como variable que representa la exposición ante el efecto del clima marítimo. Estos diques sirven de defensa frente al oleaje en los puertos y la vulnerabilidad de estos será mayor si existe mayor longitud susceptible de verse dañada. Esta información ha sido obtenida a través de medidas desde imágenes de satélite por medio de *Google-Earth* para todos los países de estudio (véase, como ejemplo, figura 4.9 y una explicación más detallada en el documento 2 “Vulnerabilidad”).

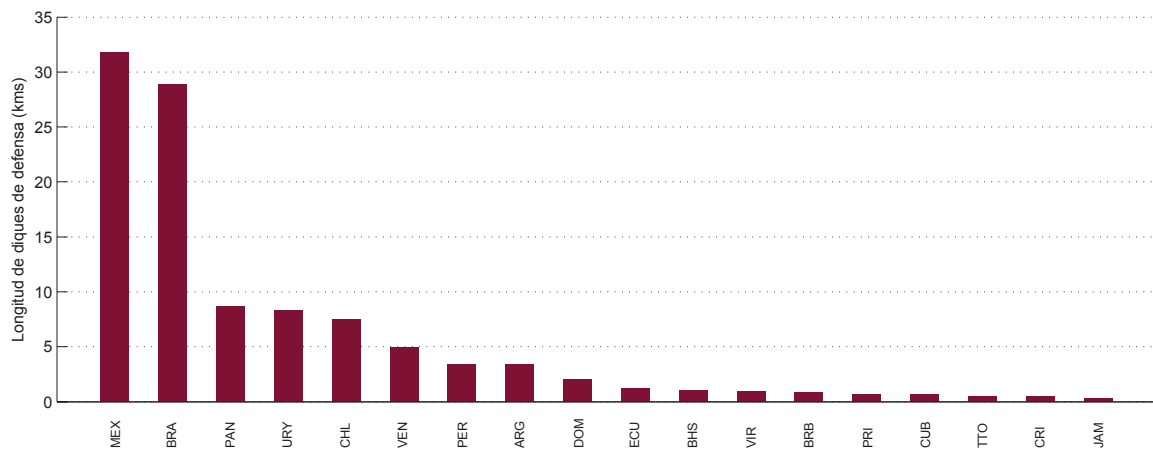
En la figura 4.8 se representa espacialmente la longitud de diques identificadas a través de imágenes de satélite y en la figura 4.9 se realiza la comparativa por países de la región (15 países con mayor longitud total de diques).

**FIGURA 4.8**  
**LONGITUD DE DIQUES DE ABRIGO IDENTIFICADOS EN LOS PUERTOS DE ALYC**  
*(Kilómetros)*



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 4.9**  
**LONGITUD DE DIQUES IDENTIFICADOS EN ALYC.**  
**CLASIFICACIÓN POR PAÍSES**  
*(En kilómetros)*



Fuente: Elaboración propia.

## 2.3 Término de vulnerabilidad considerado

El grado de vulnerabilidad de los diques de defensa de los puertos,  $D_{p,fb}^{SE}$ , se ha evaluado distinguiendo entre el valor de reparación de los diques de puertos de cada nivel de la clasificación, bajo el supuesto de destrucción total por excedencia de la acción de cálculo. En este caso, la acción de cálculo es la altura de ola asociada a un cierto período de retorno ( $R=500$  años) utilizada usualmente en la ingeniería portuaria. Sobre la base de las conclusiones de expertos en obras marítimas consultados, los valores medios recomendados para cada caso han sido los que se muestran en el cuadro 4.5. Los valores estimados son una aproximación a la valoración de los costes de reparación de los diques, están basados en su entidad y corresponden a considerar: (1) una reparación en el manto de protección de 5 m de anchura a la cota +10m, de escolleras de 2,6 t/m<sup>3</sup> con una porosidad de 0,5, a un precio de 35 US\$/m<sup>3</sup> de escollera marítima colocada con grúa y (2) recrecimiento de la coronación de 1 m de cota por 5 m de anchura, de hormigón a un precio de 60 US\$/m<sup>3</sup>.

En el caso de los puertos no incluidos en el *ranking* de los 100 de mayor tráfico (CEPAL), o de nivel II, se considera un 50% del precio de reparación de los anteriores.

**CUADRO 4.4**  
**VULNERABILIDAD DE LOS DIQUES DE DEFENSA DE LOS PUERTOS**

Nivel del puerto	$V_{pf} = D_{p,fb}^{SE}$ (US\$/m)
I (perteneciente al ranking 100 (CEPAL))	[2275+300 = 2575 ~ 2600]
II (resto medidos en Google-Earth)	[0,5 x 2600]

**Fuente:** Elaboración propia.

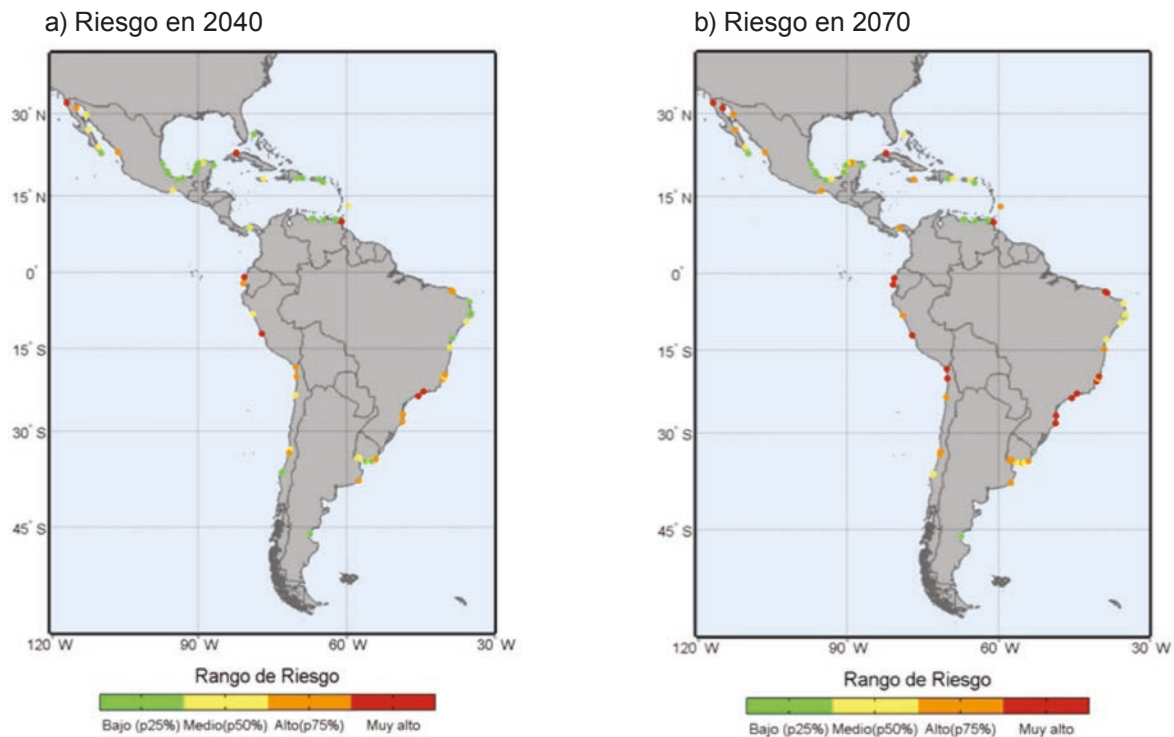
## 2.4 Evaluación del riesgo integrado

El riesgo se puede expresar en términos absolutos del valor esperado del daño en los años 2010, 2040 y 2070 (escenarios A y C). Sin embargo, el riesgo asociado al cambio climático es la diferencia respecto a la actualidad. En términos absolutos se puede distinguir donde el valor del daño esperado es mayor por el efecto combinado de sus términos de exposición, vulnerabilidad y peligrosidad. Sin embargo, al analizarlo desde la perspectiva del riesgo relativo, podemos identificar aquellos lugares que experimentarán mayor incremento respecto a su riesgo actual.

En la figura 4.10 se representa el riesgo absoluto por fiabilidad de las obras de defensa en cuatro rangos según el riesgo sea bajo, medio, alto o muy alto. El rango se ha establecido teniendo en cuenta el histograma de valor esperado del riesgo por cambio climático, estableciéndose como riesgo *bajo* los valores por debajo del percentil del 25%, *medio* entre el percentil del 25% y el 50%, *alto* entre el 50% y 75% y *muy alto* por encima de aquél.



**FIGURA 4.10**  
**NIVEL DE RIESGO ESTIMADO EN EL NIVEL DE FALLO DE LAS OBRAS MARÍTIMAS**  
**EN 2040 Y 2070 RESPECTO DE 2010**  
*(Umbral de percentil de daño)*



**Fuente:** Elaboración propia.

Como se desprende de la figura 4.10, las obras marítimas localizadas en las costas extratropicales se verán expuestas a un mayor nivel de riesgo en los años horizonte de estudio. Especialmente los puertos del sur de Brasil y Perú y Ecuador, así como el norte de Baja California. Debido a que en la base de datos no están incluidos los eventos de huracán en el análisis estadístico (tan sólo de forma descriptiva con los máximos históricos) no ha sido posible considerar el nivel de seguridad frente a huracanes y en la región del Caribe claramente estos son los que determinan la estabilidad de las obras marítimas.

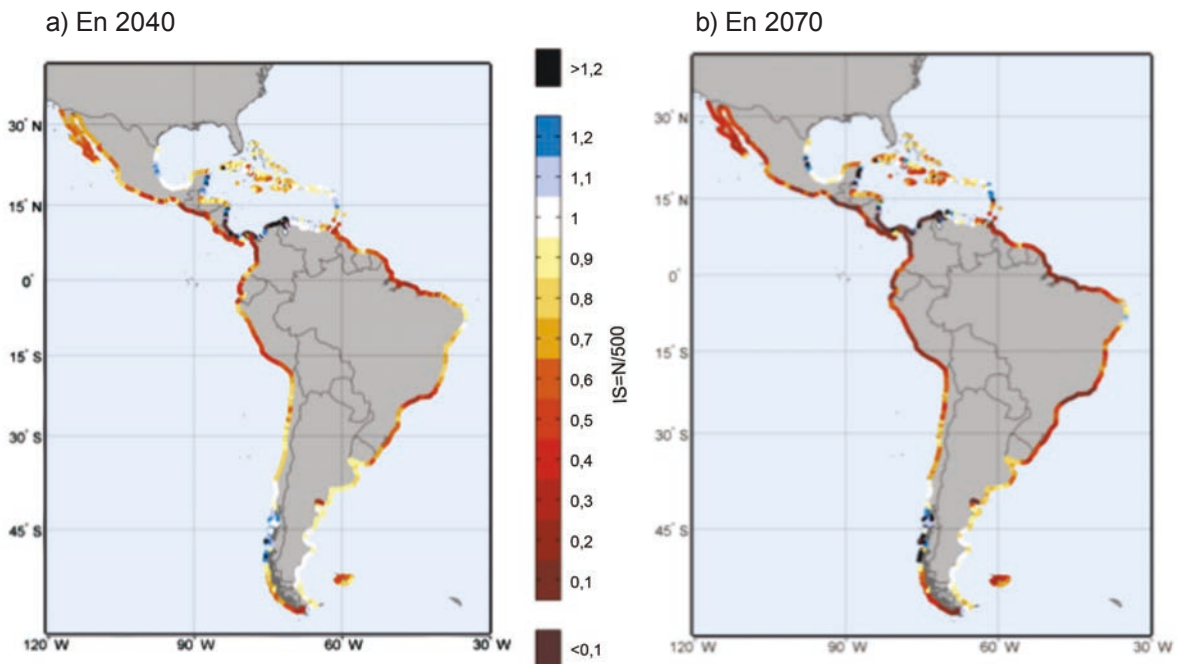
## 2.5 Estabilidad de la obra a partir de la variación de altura de cálculo. Análisis del índice de seguridad en la región

Otra forma alternativa de evaluar la seguridad es desde el punto de vista de la variación de la altura para la cual un dique fue diseñado, prescindiendo de los términos de vulnerabilidad y exposición. La altura de cálculo, o de diseño, se define como la que tiene una probabilidad de superación de  $1/T$ . Para el período de 500 años, se puede expresar un índice de seguridad definido por el cociente entre la probabilidad de exceder las condiciones de cálculo actualmente y en el futuro, o lo que es lo mismo, entre el período de retorno en el futuro debido a las tendencias de largo plazo en el oleaje y el período de retorno actual:

$$IS = \frac{1/500}{1/N} = \frac{N}{500} \quad (4.5)$$

En la figura 4.11 se representan los índices de seguridad para ALyC de 500 años de período de retorno en los años horizonte. Valores del índice de seguridad por debajo de 1 indican pérdida en la seguridad actual de las obras marítimas provocadas por un aumento de la altura de ola significativa extrema, mientras que si el índice supera el valor de 1 indica un aumento de la fiabilidad de las mismas. Obsérvese que en este caso se prescinde de la presencia o ausencia de obra marítima y el porcentaje de riesgo se expresa tan sólo en términos de la probabilidad de cambio de la dinámica o agente.

**FIGURA 4.11**  
**ÍNDICE DE SEGURIDAD EN 2040 Y 2070**



Fuente: Elaboración propia.

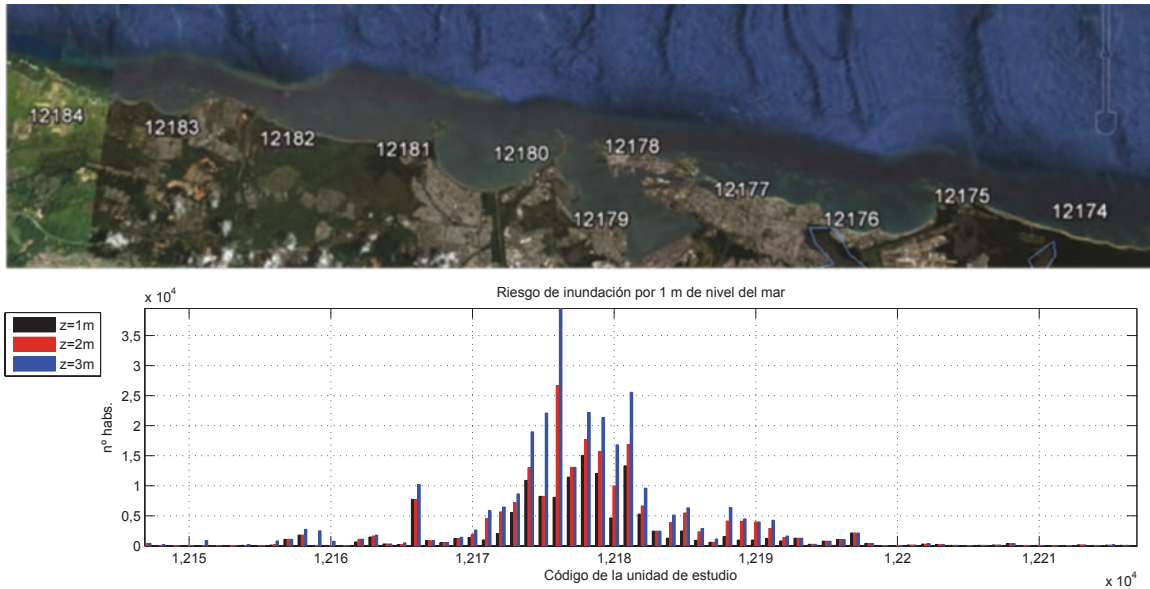
## 3. Riesgo frente a inundación por 1 m de ascenso del nivel del mar

### 3.1 Riesgo para la población

Otro ejemplo de aplicación de la metodología de riesgo desarrollada es la inundación por un ascenso del nivel del mar de 1 m (escenario de impactos E), de acuerdo a una de las situaciones de impacto considerada que corresponde a la cota superior de las proyecciones de ascenso de los escenarios de cambio considerados en este estudio. En este caso la incertidumbre no se considera en el término de peligrosidad puesto que viene impuesta a priori. Obsérvese que en todo caso, el riesgo se determina como la variación del daño esperado respecto al año 2010. Además, el riesgo integra la probabilidad de ocurrencia de cada nivel de impacto y las características físicas y socioeconómicas en las zonas costeras.

El término de exposición se define por la superficie de tierra que queda sumergida hasta la citada cota. Con respecto al término considerado en la vulnerabilidad, se ha seleccionado la población residente hasta la cota de 1m como indicador. El daño esperado se evalúa en diversas unidades a lo largo de este documento (US\$, habitantes, m<sup>2</sup>, etc.), en este caso concreto se calcula en términos del número de habitantes afectados, para luego determinarse niveles de riesgo, en función de varios intervalos de daño esperado, asumiendo para definir estos intervalos los percentiles de daño del 25%, 50% y 75%. El riesgo así calculado varía entre cotas. La figura 4.12 muestra el aumento del nivel de daño con las distintas cotas (se muestran las cotas de 1 a 3 m) en varias unidades de estudio de la costa de Puerto Rico. Considerando el ascenso de 1 m, el resultado se muestra en la figura 4.13 expresado en niveles de riesgo.

**FIGURA 4.12**  
**VARIACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN SEGÚN EL NÚMERO DE PERSONAS AFECTADAS EN ALGUNAS UNIDADES DE ESTUDIO EN LAS COSTAS DE PUERTO RICO**



**Fuente:** Elaboración propia.

Nota: Las cotas varían de 1 a 3 m, según la escala de colores que muestra la figura.

La figura 4.13 refleja los niveles de riesgo en función del daño esperado por habitantes afectados. A partir de este resultado se pueden extraer varias conclusiones. Primero, de manera general, la costa Atlántica es la que presenta mayor nivel de riesgo en comparación con la Pacífica. Respecto a la intercomparación regional, existe una gran densidad de puntos con “muy alto riesgo” en las costas del Brasil y Caribe oriental, así como gran parte del Perú, y México en la costa occidental. Un lugar destacado en cuanto al riesgo afrontado lo ocupan las islas caribeñas, con “muy alto riesgo” generalizado. Los principales centros urbanos costeros de la región presentan altos riesgos de forma generalizada en términos de población afectada.

Análogamente al riesgo para la población, se podría analizar el riesgo de la inundación permanente considerando otros términos de vulnerabilidad como la presencia de ecosistemas (extensión), la valoración económica de aquellos o en función de superficie de tierra inundada tan sólo.

**FIGURA 4.13**  
**NIVEL DE RIESGO POR INUNDACIÓN POR ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR DE 1 M**  
**SEGÚN LOS HABITANTES AFECTADOS**  
*(Umbral de percentil de daño)*



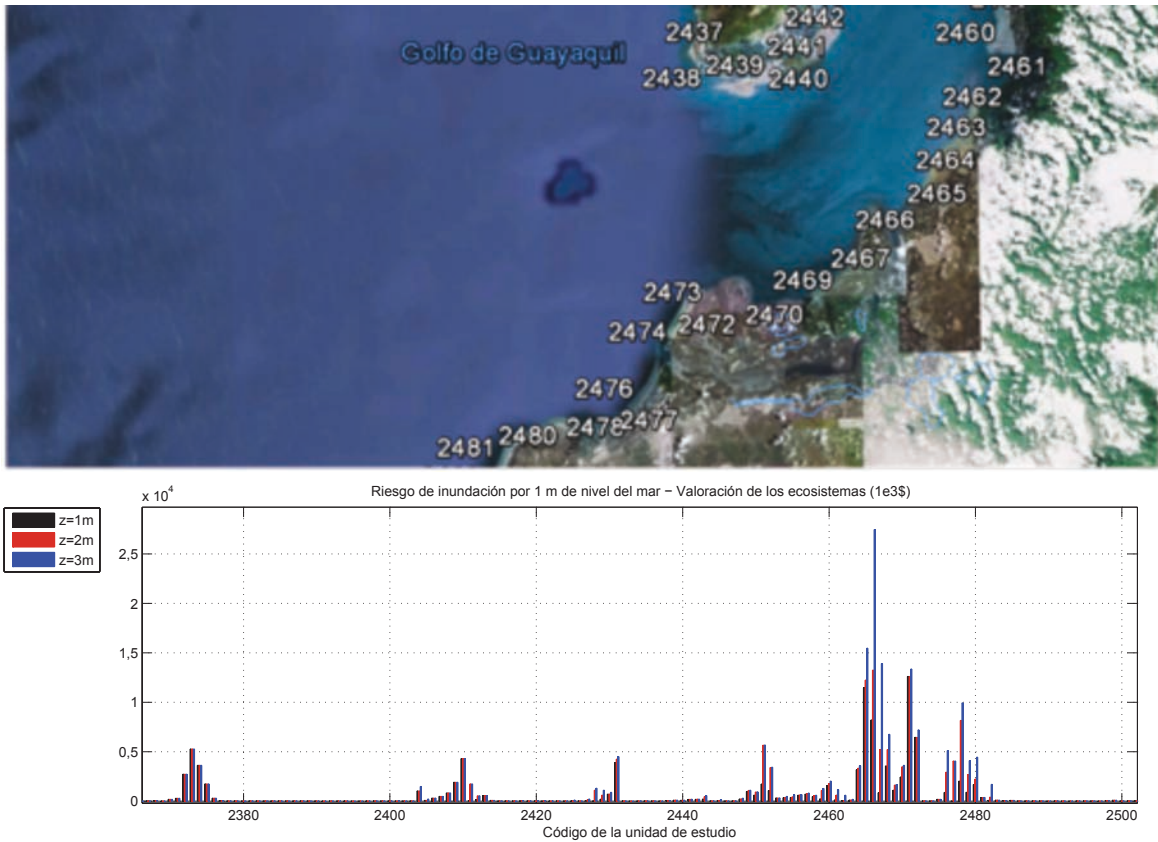
Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Riesgo en los ecosistemas afectados

Análogamente al caso de la población, se ha analizado también la incidencia de un ascenso de 1 m del nivel del mar sobre los ecosistemas en la región. Ya que se dispone de la valoración económica de los ecosistemas en función de los servicios que prestan los sistemas ecológicos –documento 2 “Vulnerabilidad” (siguiendo el criterio de Costanza y otros (1997)– es posible determinar el riesgo sobre los mismos asumiendo esta valoración como término que define su vulnerabilidad. La exposición y la peligrosidad, como en el caso anterior, vienen definidas a priori por la elección del escenario de aumento de 1 m del nivel del mar, por lo que la aproximación probabilística del riesgo también deja de ser aplicable en este caso concreto.

La figura 4.14 muestra la variación por cotas del riesgo (en términos de valor económico de los ecosistemas) en diversos tramos de estudio de la costa de ALyC. Se puede observar tanto la variación topográfica, mayor cuanto más elevadas son las cotas, y variación espacial entre tramos, con zonas más sensibles ecológicamente que otras.

**FIGURA 4.14**  
**VARIACIÓN DEL RIESGO EN TÉRMINOS DE LA VALORACIÓN DE ECOSISTEMAS**  
**AFECTADOS EN ALGUNAS UNIDADES DE ESTUDIO EN LA COSTA DE ECUADOR**



**Fuente:** Elaboración propia.

Nota: Las cotas varían de 1 a 3 m, según la escala de colores que muestra la figura.

Asumiendo como intervalos para la clasificación los percentiles del 25%, 50% y 75% del riesgo hasta la cota 1 m (escenario de impactos E), la figura 4.15 expresa los cuatro niveles de riesgo obtenidos en la región. Las zonas tropicales son las que presentarían mayor daño por su riqueza ecológica, así como partes de las costas de México y zonas aisladas de la costa Atlántica.

**FIGURA 4.15**  
**NIVEL DE RIESGO POR INUNDACIÓN DE 1 M DE ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR EN CUANTO AL VALOR ECONÓMICO DE LOS ECOSISTEMAS AFECTADOS**  
*(Umbrales de percentil de daño)*



Fuente: Elaboración propia.





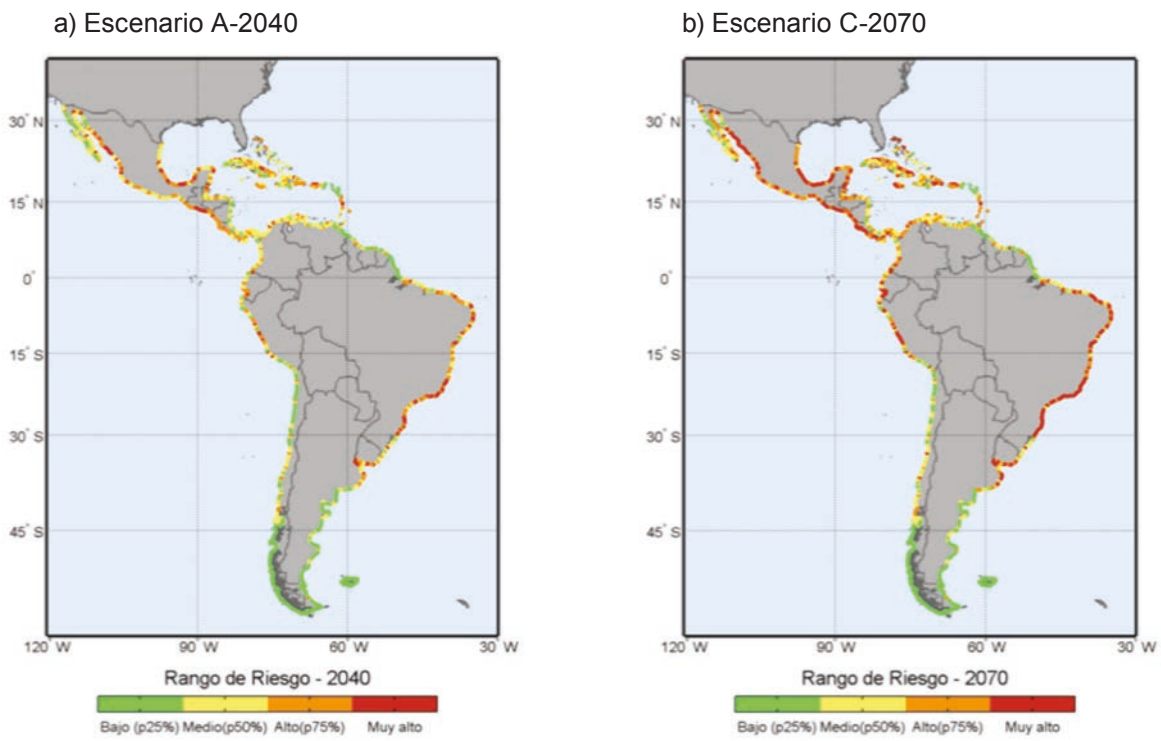
## 4. Riesgo frente a eventos de inundaciones extremas en la costa

Para analizar el riesgo frente a eventos extremos de inundación se sigue un enfoque similar al del análisis de las obras marítimas frente a eventos extremos de oleaje. En este caso, el agente involucrado es la cota de inundación (véase documento 3 “Impactos”) y se determina cómo varía la probabilidad asociada al evento que tiene un período de retorno en 2010 de 500 años de media. Esta variación de la probabilidad está basada en un análisis de extremos de los datos como se ha presentado en los documentos previos.

Las curvas de exposición quedan definidas por el área afectada a cada cota de elevación a partir del modelo digital del terreno. Para definir las curvas de vulnerabilidad en cada tramo de estudio se utiliza los datos de población residente en cada nivel de cota. Obsérvese que para analizar el riesgo en otros sectores, como las infraestructuras de comunicación (carreteras y ferrocarriles) se podría seguir un enfoque análogo, en este caso definiendo la vulnerabilidad por el número de tramos de estas infraestructuras afectados.

La figura 4.16 representa el riesgo de inundación frente a eventos extremos de sobreelevación del nivel del mar, tras integrar la componente del agente, la exposición y la vulnerabilidad. Estos eventos son episódicos y están asociados a sobrelevaciones del nivel del mar por efecto combinado del viento, presión y oleaje, generalmente asociados a episodios de tormentas. Las costas más en riesgo se sitúan al sur del Brasil y México, tanto en la costa pacífica como la caribeña. Gran parte del Perú y del Ecuador también se encontrarían en “muy alto riesgo” en el horizonte de 2070. Otra zona de especial mención es el área de influencia del Río de la Plata, con gran aglomeración urbana y altos niveles de sobreelevación del nivel del mar por eventos extremos (véase documento 1 “Dinámicas, tendencias y variabilidad climática”).

**FIGURA 4.16**  
**NIVEL DE RIESGO POR INUNDACIÓN EN TÉRMINOS DE POBLACIÓN AFECTADA**  
**PARA PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS**  
*(Umbrales percentil de daño)*



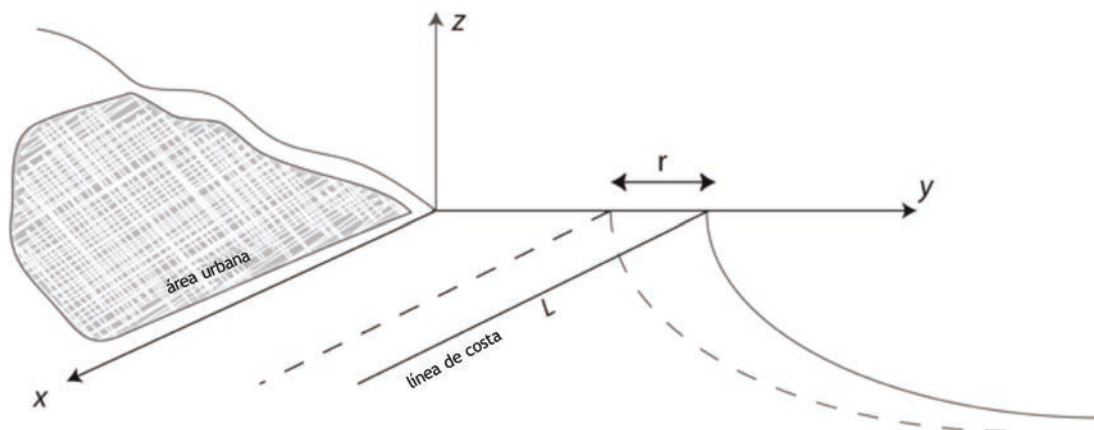
Fuente: Elaboración propia.

## 5. Riesgo frente a erosión en las playas

Determinados los cambios en la erosión de las playas en el documento 3 “Impactos”, es posible determinar el riesgo mediante la integración probabilística de los distintos niveles de erosión y diversos tipos de vulnerabilidad.

En este caso, la peligrosidad viene definida por la probabilidad de alcanzarse ciertos niveles de erosión. Estas probabilidades se han determinado mediante cambios en el nivel medio del mar y en la intensidad del oleaje por separado (véase documento 3 “Impactos”). La exposición queda definida por la superficie de playa perdida para los distintos niveles de erosión considerados, determinada por la longitud de las playas (véase documento 2 “Vulnerabilidad”) y los niveles de erosión, y, por lo tanto, se expresa en unidades de área ( $m^2$ ). En el término de vulnerabilidad se han considerado dos opciones distintas correspondiendo a dos funcionalidades de las playas (véase documento 3 “Impactos”): como defensa de la costa y de recurso por su uso recreativo, resumido en la figura 4.17.

**FIGURA 4.17**  
**ESQUEMA DE RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA Y PROTECCIÓN URBANA**



**Fuente:** Elaboración propia.

**CUADRO 4.5**  
**TÉRMINOS UTILIZADOS EN LA DEFINICIÓN DEL RIESGO DE EROSIÓN DE LAS PLAYAS PARA LA PELIGROSIDAD, EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD**

Riesgo	Peligrosidad	Vulnerabilidad	Exposición	Integración del riesgo
Uso defensivo de la costa	Erosión inducida por cambios en la intensidad del oleaje	Proporcional al número de habitantes hasta la cota 10 m y al área de playa disponible (hab/m <sup>2</sup> )	Longitud de las playas (L) junto a zonas urbanas multiplicado por nivel de erosión (r) alcanzado (m <sup>2</sup> )	Probabilística
	Erosión inducida por cambios en el nivel del mar			Probabilística
	Subida del nivel del mar de 1 m			Determinista
Playas como recurso recreativo	Erosión inducida por cambios en la intensidad del oleaje	Inversamente proporcional a la superficie de playa disponible (m <sup>2</sup> )	Longitud de la playa por nivel de erosión alcanzado (m <sup>2</sup> )	Probabilística
	Erosión inducida por cambios en el nivel del mar			Probabilística
	Subida del nivel del mar de 1 m			Determinista

**Fuente:** Elaboración propia.

## 5.1 Uso defensivo de las playas

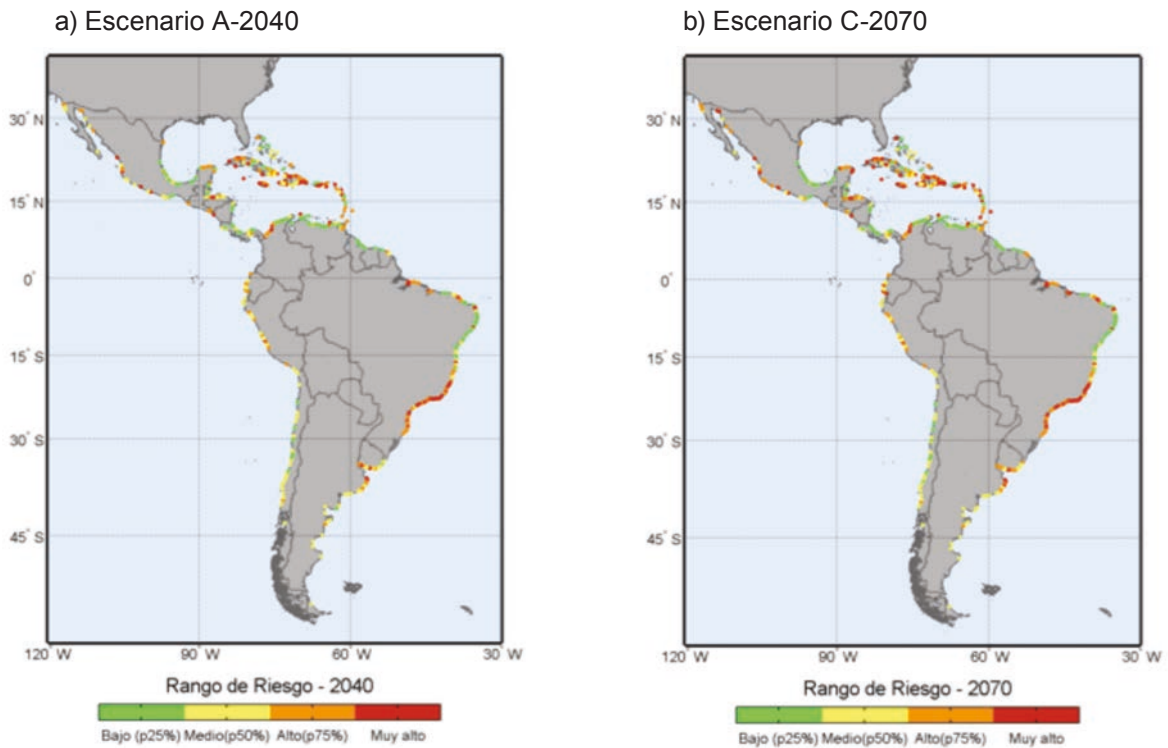
Para el primer caso, como uso defensivo se tienen en cuenta tan solo las playas que presentan borde urbano, esto es, los tramos de estudio donde se identificaron ciudades costeras con playas protegiendo el borde costero (véase documento 2 “Vulnerabilidad”). Para construir la curva de vulnerabilidad para cada nivel de erosión se determina la población protegida como la residente hasta los 10 m y se calcula el ratio entre la población protegida y la superficie disponible de playa en la actualidad que está protegiendo el borde costero. Así expresado, la curva de vulnerabilidad tiene unidades N° hab/m<sup>2</sup>. El riesgo, integrado, viene dado en número habitantes.

Obsérvese que la integración del riesgo o daño esperado en este caso recoge la influencia de diversos factores como los cambios y probabilidades en el oleaje, la longitud de las playas, la anchura disponible de las mismas, la población residente, etc.

Se detectan aumentos del riesgo entre los años horizonte considerados. Geográficamente, la costa atlántica se verá progresivamente más amenazada debido a las concentraciones urbanas en ella presentes (en especial sur del Brasil). Sin embargo, las islas del Caribe, también con gran daño esperable, vienen caracterizadas por un factor determinante, la población a 10 m, así como por presentar una superficie limitada de playas. México y Perú también presentan zonas localizadas de daño posible.

Las figuras 4.19 y 4.20 muestran los niveles de riesgo ante la erosión por subida del nivel del mar, a partir de la extrapolación de tendencias detectadas y asumiendo un ascenso de 1 m del nivel del mar (escenario de impacto E), respectivamente en cada caso.

**FIGURA 4.18**  
**NIVEL DE RIESGO POR EROSIÓN DE LAS PLAYAS DEBIDO A LA INTENSIDAD DEL OLEAJE EN LOS AÑOS 2040 Y 2070. PLAYAS COMO DEFENSA**  
*(Umbral de percentil de daño)*



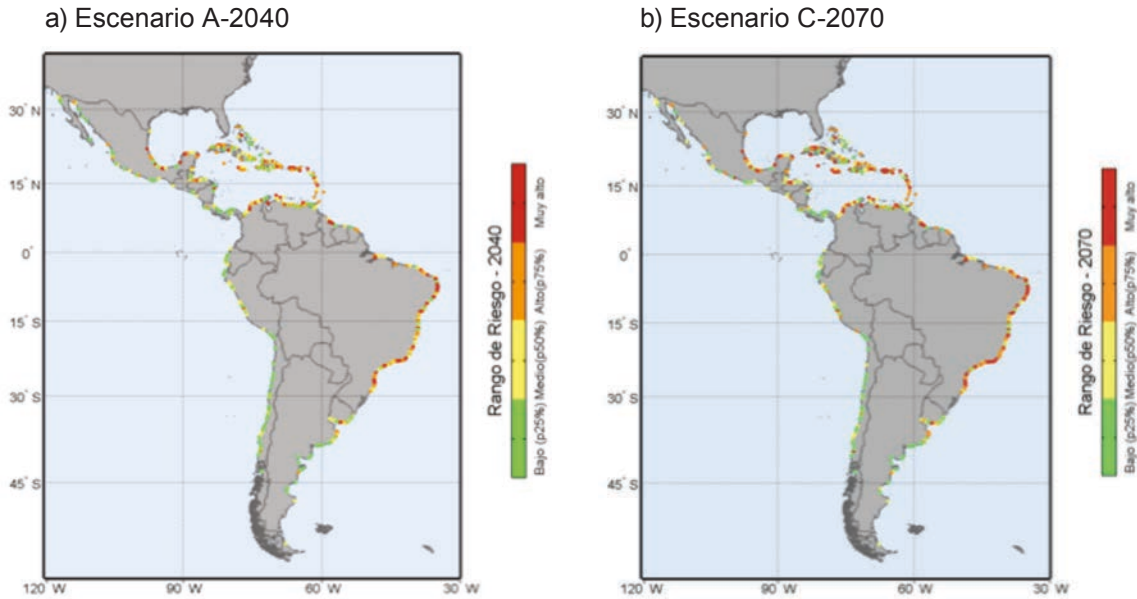
**Fuente:** Elaboración propia.

Nota: Las playas se consideran como elemento de defensa de la población en la costa.

Existe una diferencia sustancial con respecto a la gráfica precedente correspondiente a la erosión por cambios en la intensidad del oleaje, lo que reafirma la necesidad de considerar ambos cambios en el análisis. Si bien en este caso la zona de riesgo se extiende desde las islas caribeñas hasta el sur del Brasil, aumentando el daño en el segundo horizonte temporal de forma especial en el oriente del Caribe y la costa del Brasil. Por tanto, son las costas del Brasil, las islas caribeñas y costa meridional del Caribe, las que verán aumentado su nivel de riesgo en cuanto a la defensa de las ciudades costeras que ejercen las playas.

El patrón de daño es similar al considerar 1 m de ascenso del nivel del mar, uniforme en toda la región, ya que el nivel de riesgo se determina en este caso por los percentiles de población afectados en la situación concreta de ascenso de 1 m y no de extrapolación de tendencias, aunque el número de los habitantes afectados es considerablemente mayor (véase documento 3 “Impactos”).

**FIGURA 4.19**  
**NIVEL DE RIESGO POR EROSIÓN DE LAS PLAYAS DEBIDO AL NIVEL DEL MAR**  
**EN LOS AÑOS 2040 Y 2070. PLAYAS COMO DEFENSA**  
*(Umbral de percentil de daño)*



**Fuente:** Elaboración propia.

Nota: Las playas se consideran como elemento de defensa de la población en la costa.

**FIGURA 4.20**  
**NIVEL DE RIESGO POR EROSIÓN DE LAS PLAYAS ANTE UNA SUBIDA DEL NIVEL**  
**DEL MAR DE 1 M, CORRESPONDIENTE AL ESCENARIO E. PLAYAS COMO DEFENSA**  
*(Umbral de percentil de daño)*



**Fuente:** Elaboración propia.

Nota: Las playas se consideran como elemento de defensa de la población en la costa.

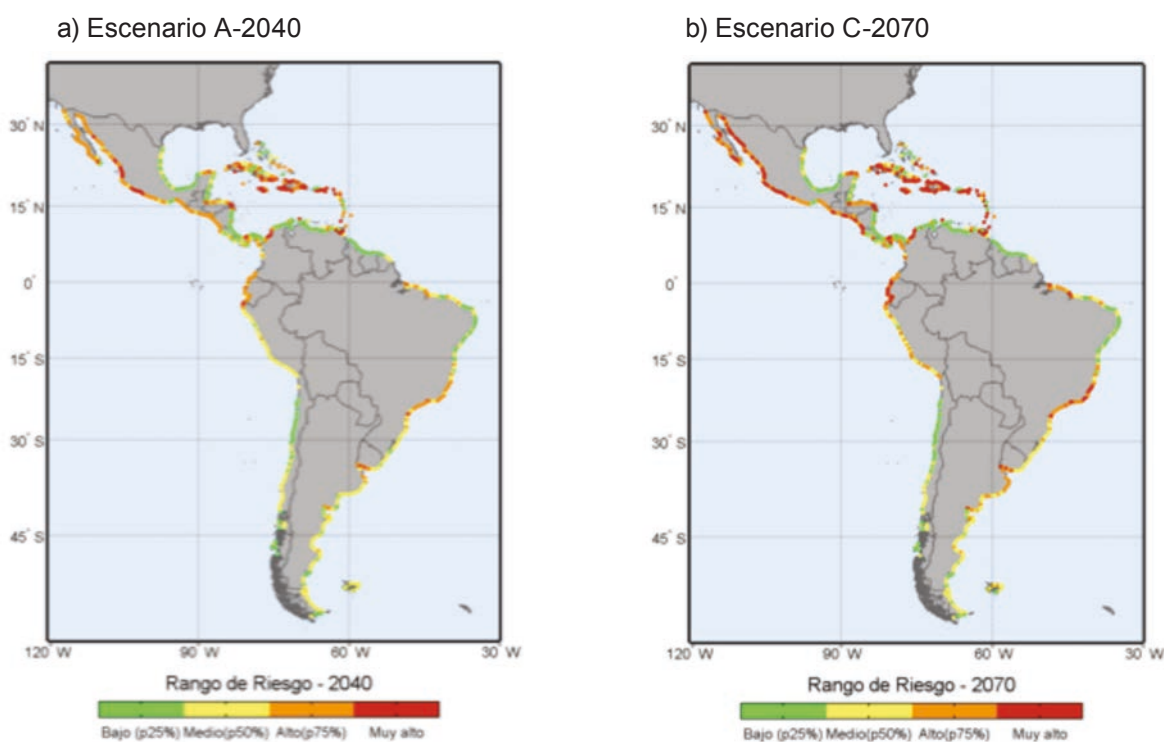


## 5.2 Las playas como recurso recreativo

En este caso, se contabiliza la erosión en las playas independientemente de si protegen a poblaciones o no. Se pretenden con esto establecer el potencial de recurso de playa en función de si hay más o menos arena disponible como recurso (turístico principalmente). La vulnerabilidad en este caso es una fracción de la superficie total de playa disponible en cada tramo de 5 km ( $m^2$ ). En este caso, el riesgo no tiene unidades sino que representa una fracción (%) del recurso de playa disponible.

Obsérvese que bajo este planteamiento no se tiene en cuenta consideraciones meteorológicas o socioculturales que definitivamente influyen en el turismo de playa.

**FIGURA 4.21**  
**NIVEL DE RIESGO POR EROSIÓN DE LAS PLAYAS DEBIDO AL CAMBIO EN LA INTENSIDAD DEL OLEAJE EN LOS AÑOS 2040 Y 2070. PLAYAS COMO RECURSO**  
*(Umbrales de percentil de daño)*



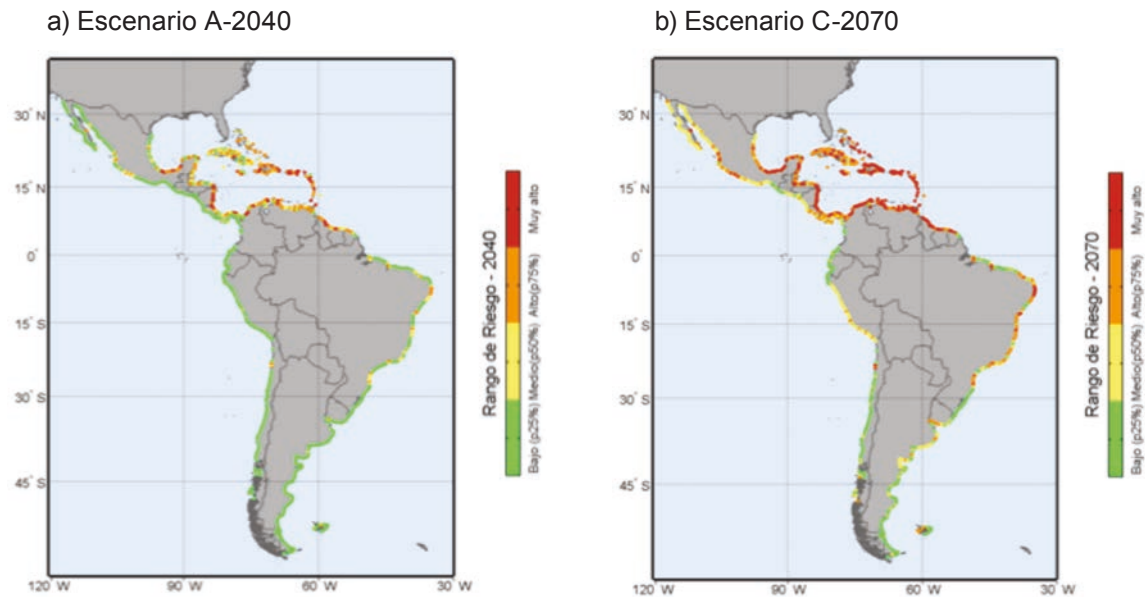
**Fuente:** Elaboración propia.

Nota: Las playas se consideran recurso recreativo (proporción de la superficie disponible).

Analizando el cambio entre los dos años horizonte, la costa del Uruguay y sur del Brasil aumentan el nivel de riesgo por pérdida de superficie de playa. De esta manera, se puede considerar que disminuyen la potencialidad de su recurso playa. Ecuador, México y partes de Colombia también se encuentran ante una problemática similar.

La figura 4.22 y siguiente muestran los niveles de riesgo obtenidos para erosiones por cambios en el nivel del mar (extrapolación de tendencias y aumento de 1 m) destacando en gran medida las costas del Caribe, especialmente la zona septentrional, así como regiones tropicales de la costa atlántica. La costa pacífica norte presenta niveles de riesgo más bajos y ya en el segundo horizonte temporal considerado.

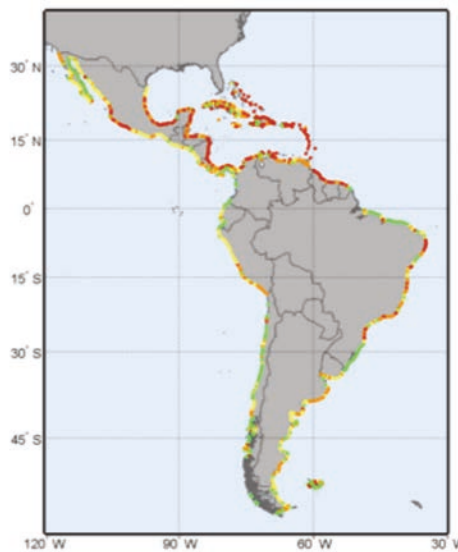
**FIGURA 4.22**  
**NIVEL DE RIESGOS POR EROSIÓN DE LAS PLAYAS DEBIDO AL CAMBIO EN EL NIVEL DEL MAR EN LOS AÑOS 2040 Y 2070. PLAYAS COMO RECURSO**  
*(Umbrales de percentil de daño)*



**Fuente:** Elaboración propia.

Nota: Las playas se consideran en su función como recurso (proporción de la superficie disponible).

**FIGURA 4.23**  
**RIESGO POR EROSIÓN ANTE UNA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR DE 1M, CORRESPONDIENTE AL ESCENARIO DE IMPACTO E. PLAYAS COMO RECURSO**  
*(Umbrales de percentil de daño)*



**Fuente:** Elaboración propia.

Nota: Las playas se consideran en su función como recurso (proporción de la superficie disponible).

### 5.3 Conclusiones

Comparando los resultados obtenidos para las dos funciones analizadas para las playas, se puede comprobar que al considerar el riesgo sobre las personas protegidas por las playas urbanas, la costa caribeña y brasileña son las que mayor riesgo presentan en la región, aunque muchas veces también coinciden con zonas de gran atracción turística. Cuando tan sólo se tiene en cuenta el recurso recreativo que suponen las playas, es decir, computando todas las playas independientemente de que se localicen protegiendo una zona urbana, el patrón de los niveles de riesgo varía. El Caribe por cambios en el nivel del mar y la costa pacífica desde el Ecuador hasta México por cambios en la intensidad del oleaje son las zonas más en riesgo.

El Caribe verá disminuido su recurso por erosiones significativas. También supondrá un aumento del riesgo para la población, pero menor que en otras zonas de la región de ALyC.


En Brasil destaca el riesgo por pérdida de seguridad en las costas ante la erosión de las playas. El recurso disminuirá pero el riesgo es alto tan solo en ciertas zonas, aunque coincide con núcleos urbanos y zonas de gran atracción turística.



## 6. Bibliografía

- Costanza, R. y otros (1997), “The value of the world’s ecosystem services and natural capital”, *Nature* Vol 387.
- Gewalt M. y otros (1996), EUROflood – *Technical Annex 8. Economic Assessment of Flood Hazards*, Regional Scale Analysis-Decision Support System (RSA-DSS), München.
- Meyer V. (2005), *Methoden der Sturmflut-Schadenpotentialanalyse an der deutschen Nordseeküste*, Dissertation at the University of Hannover, UFZ-Dissertation 3/2005.
- Schanze, J. (2002), “Nach der Elbeflut 2002: Die gesellschaftliche riskovorsorge bedarf einer transdisziplinären Hochwasserforschung”, *GAIA* 11(4), pp. 247-254.
- Schneiderbauer, S. y Ehrlich, D. (2004), *Risk, hazard and people’s vulnerability to natural hazards. A review of definitions, concepts and data*, European Commission. Joint Research Centre, Luxemburgo. ISBN 92-894-8732-1.





Este documento es el cuarto y último de una serie de textos que se han elaborado en el marco del Estudio regional de los efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. La zona de estudio comprende una longitud total de costa de aproximadamente 72.182 km distribuidos en cuatro zonas geográficas: Norteamérica, Centroamérica, Sudamérica y las Islas del Caribe. En el dominio de estudio se han analizado los cambios detectados en las dinámicas costeras, la influencia de la variabilidad climática, información diversa sobre la vulnerabilidad presente en las costas de la región, abarcando tanto el medio físico como el socioeconómico, la configuración física de las mismas y los impactos y riesgos previsibles en el futuro.

En este volumen se muestra el análisis de los riesgos derivados del cambio climático en las costas de la región. Siguiendo la metodología de evaluación integral de riesgo desarrollada y que se presenta en un volumen auxiliar, se analizan los riesgos sobre: las obras marítimas; la inundación asociada a un ascenso del nivel del mar de 1 metro; y el asociado a inundaciones por eventos extremos (no huracanes). Se tuvo en cuenta el riesgo para la población y los ecosistemas en las costas; así como la erosión en las playas, considerando una doble dimensión del problema, ya que las playas actúan como defensa de las ciudades costeras y como recurso recreativo del territorio.

La información que se provee en este volumen integra los resultados desarrollados y analizados para América Latina y el Caribe en los volúmenes anteriores, y que constituye, en su conjunto, una valiosa recopilación de información para la gestión integral de las costas en la región.