

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

Guía metodológica



NACIONES UNIDAS



MINISTERIO
DE ASUNTOS EXTERIORES
Y DE COOPERACIÓN



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO



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**

GUÍA METODOLÓGICA

Las opiniones expresadas en este documento 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.

Esta publicación puede obtenerse dirigiéndose a:
División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL, página web: <http://www.cepal.cl/dmaah>

Foto portada © Gabriel Barajas Ojeda
Publicación de las Naciones Unidas

LC/W.450
Copyright © Naciones Unidas, diciembre de 2011. Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile

Los Estados miembros y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a las Naciones Unidas de tal reproducción.

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

Guía metodológica



NACIONES UNIDAS



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 mediante el Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación y del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Se agradece especialmente el apoyo del personal de la Oficina Española de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino 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

1. Introducción	7
1.1 Contexto	7
1.2 Objetivo y estructura del documento	8
2. Marco conceptual de estudios de riesgo frente al cambio climático	9
2.1 Escalas de evaluación de los estudios frente al cambio climático	9
2.2 Definición de conceptos asociados al riesgo	12
3. Descripción de la metodología planteada	17
3.1 Metodología para la evaluación del riesgo	17
3.2 Caso práctico: evaluación del riesgo por sumergencia de la costa	22
3.3 Determinación de los intervalos de confianza del riesgo (uncertainty)	24
3.4 Efectos del cambio climático en la evaluación del riesgo	24
3.5 Agentes e impactos considerados en este estudio	26
4. Conclusiones	29
5. Bibliografía	31

Índice de figuras

Figura 1	Tipos de escalas de estudios de cambio climático en las costas	10
Figura 2	El triángulo del riesgo	17
Figura 3	Elementos constitutivos del riesgo, tetraedro del riesgo	18
Figura 4	Función de densidad de la variable aleatoria cota de inundación (agente o amenaza, <i>hazard</i>)	20
Figura 5	Discretización en términos de la magnitud del agente para la posterior evaluación del riesgo	21
Figura 6	Discretización longitudinal del tramo de costa para la evaluación del riesgo	22
Figura 7	Discretización longitudinal del tramo de costa para la evaluación del riesgo. Los niveles de cota de inundación van determinando la zona expuesta (zona en azul)	23
Figura 8	Esquema conceptual	27
Figura 9	Definición y marco general de los agentes e impactos en las costas y su relación entre sí	27
Figura 10	Definición y marco general de los agentes e impactos en las costas y su relación entre sí	30

Índice de cuadros

Cuadro 1	Esquema y documentos del proyecto	8
Cuadro 2	Características de las escalas de estudio del riesgo consideradas	12

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 la 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.

El estudio regional cuenta con tres productos auxiliares: 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 este 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 el presente documento de forma específica (guía metodológica). Por último en el marco del proyecto también se ha desarrollado un visor web de los resultados para la máxima 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 1, resume la estructura y los productos del estudio realizado. En concreto, este documento aquí corresponde al documento auxiliar que recoge la descripción de la guía metodológica de evaluación integral del riesgo.

CUADRO 1
ESQUEMA Y DOCUMENTOS DEL PROYECTO

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

Fuente: Elaboración propia.

1.2 Objetivo y estructura del documento

Para el estudio de los impactos del cambio climático en la costa de ALyC (inundación, erosión de la costa, daño sobre infraestructuras costeras, etc.) y posteriores propuestas de adaptación, es necesario realizar un análisis de la variación del riesgo que va a suponer el cambio climático. Para ello, es necesario realizar una revisión, redefinición y adaptación de las metodologías propuestas en la literatura para el cálculo de riesgos ya que éstas se centran principalmente en los riesgos asociados a desastres naturales.

En este sentido es importante definir todos los factores que han de tenerse en cuenta a la hora de plantear el estudio de los efectos del cambio climático en la costa, y que son:

1) **Agentes o acciones.** Es necesario definir los agentes y acciones que influyen en la costa y en las actividades costeras, y que son susceptibles de cambiar durante el siglo XXI por efecto del cambio climático: viento, nivel del mar, oleaje, etc.

2) **Impactos a estudiar.** Para conocer la evolución de los efectos del cambio climático es necesario definir los impactos que se van a estudiar, tanto asociados a los ecosistemas como a los distintos sectores socioeconómicos susceptibles de verse afectados.

3) **Metodología de evaluación del cambio.** Por último, se requiere definir la metodología que permite calcular tanto al día de hoy como en escenarios futuros, el riesgo que sufren los ecosistemas y sectores definidos en el punto 2) como consecuencia del cambio de los agentes o acciones definidas en el punto 1) o de cambios en la vulnerabilidad de dichos ecosistemas y sectores. De esta manera se pueden cuantificar los efectos debidos al cambio climático y su incertidumbre.

La metodología seleccionada para cuantificar el efecto del cambio climático en términos de riesgo, condiciona la forma en la que se definen y tratan tanto las acciones como los impactos. Por ese motivo, en este documento auxiliar se comienza con la definición del riesgo y se continúa con la metodología empleada para su caracterización.

2. Marco conceptual de estudios de riesgo frente al cambio climático

2.1 Escalas de evaluación de los estudios frente al cambio climático

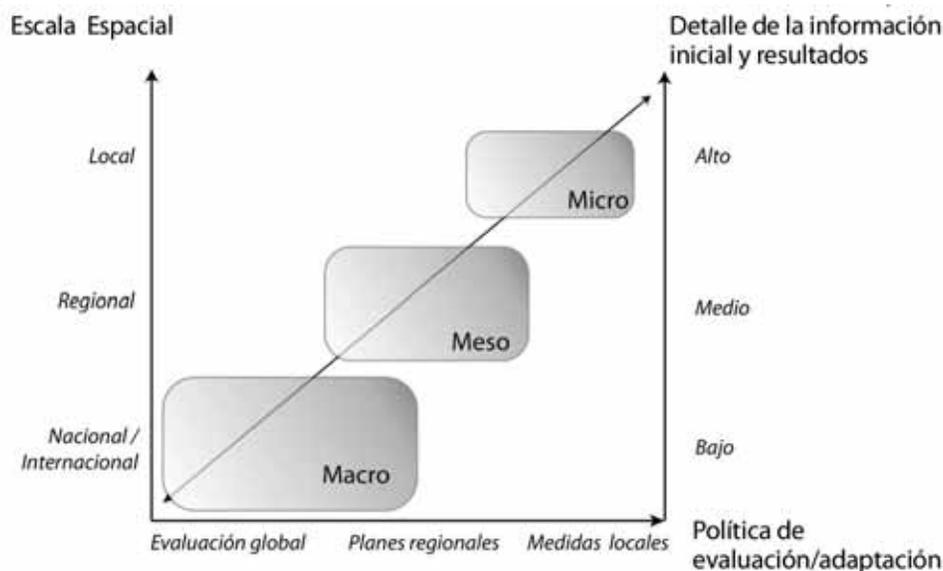
Mientras que la investigación y las políticas de protección frente a inundaciones han estado dominadas hasta ahora por aproximaciones meramente técnicas, los aspectos sociales y socioeconómicos han ganado en importancia en las últimas décadas debido a un uso del suelo expansivo e intensivo, al incremento 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 engloba 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 el *Floodsite* (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 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 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 sólo es exigible a nivel de un país o región, dependiendo sólo 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 detalladas, 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., es determinante un estudio de detalle del elemento geomorfológico sobre el que se va actuar. 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 allí tiene lugar, con sus condicionantes y características locales.

FIGURA 1
TIPOS DE ESCALAS DE ESTUDIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS.



Fuente: Meyer 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 las costas de América Latina y el Caribe (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 Wildlife 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 contexto, la cantidad de valor comprometido puede ser determinado con mayor rigor. No obstante, todavía se 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 sirva la erosión de una playa donde se dispondría de las características físicas de la misma, los edificios que se sitúan tras ella clasificados

por categorías, una correcta definición de las 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 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: Meyer 2005; Gewalt y otros, 1996.

2.2 Definición de conceptos asociados al riesgo

Los conceptos y definiciones existentes en la literatura asociados a riesgo son múltiples y variados: desastre (*disaster*), riesgo (*risk*), amenaza (*hazard*), incertidumbre (*uncertainty*), vulnerabilidad (*vulnerability*), capacidad de adaptación (*adaptive capacity*), resiliencia (*resilience*), susceptibilidad o sensibilidad (*sensitivity*), exposición (*exposure*). El propósito de este capítulo es tratar de clarificar todos estos conceptos y definir cómo se van a emplear en el presente estudio. Nótese que esta tarea es de gran importancia, ya que, si bien en muchos casos los conceptos están claramente establecidos, en otros muchos casos son susceptibles de interpretarse de diferente manera en función del problema que se trate. Por ese motivo, se hace especial hincapié en su vinculación con las definiciones y usos propuestos por otros investigadores y/o organismos gubernamentales.

Para la elaboración de este capítulo se han utilizado principalmente los siguientes documentos de referencia:

- **Vulnerabilidad y evaluación de riesgo** (1991), A.W. Coburn, T.J.S. Spence, y A. Pomonis. Documento financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en colaboración con la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre (United Nations Disaster Relief Organization, UNDRO). Esta referencia emplea a su vez como referencia el Manual del Manejo de Desastres del PNUD/UNDRO. Este documento está concebido para aumentar la conciencia del público respecto a la naturaleza y control de desastres, con el objetivo de mejorar la preparación y respuesta ante ellos.
- **Risk, Hazard, and People's Vulnerability to Natural Hazards. A Review of Definitions, Concepts and Data** (2004). S. Schneiderbauer y D. Ehrlich. Documento elaborado dentro del proyecto Support for Effective Rapid External Action (ISFEREA) del Joint Research Centre, y financiado por la Comisión Europea. Trata de desarrollar una metodología basada en conocimientos científicos y teóricos para determinar el riesgo y la vulnerabilidad de poblaciones, especialmente en aquellas que sufren desastres naturales con mayor frecuencia. En este sentido es importante recalcar que tratan de cuantificar el número de personas que vive en zonas susceptibles de ser azotadas por desastres naturales y su vulnerabilidad.

- **Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards disaster Resilient Societies.** Ed. By Jörn Birkmann. United Nations University (2006). Este documento resume las conclusiones obtenidas en el trabajo encargado por la United Nations University a numerosos expertos, en el cual se hace una revisión de las metodologías existentes en el mundo para medir la vulnerabilidad de la sociedad.
- **Informes publicados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC),** entre los cuales cabe destacar:
 - IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations (Carter y otros, 1994).
 - Climate Change 1995: Second Assessment Report, IPCC (1995).
 - Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of working Group II to the Third Assessment Report (McCarthy y otros, 2001).
 - Climate Change 2007 - The Physical Science Basis, por el Grupo de Trabajo I del IPCC (WG I), donde se analizan los aspectos físicos del sistema climático y del cambio climático, publicado por Cambridge University Press en julio de 2007.

Toda la terminología asociada a riesgos proviene principalmente del estudio de desastres naturales y del mundo de la ingeniería y surgen muchos malentendidos cuando los conceptos empleados por los ingenieros se trasladan al campo de las ciencias sociales, políticas o económicas. Por ese motivo, y basándonos en los documentos de referencia citados anteriormente, se va a dejar plasmada la definición de cada uno de los conceptos que se van a emplear en este estudio. Para ello se ha seguido, principalmente, las definiciones proporcionadas en el documento de la Comisión Europea (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004).

Riesgo (Risk)

Respecto al término riesgo, éste hace referencia a las pérdidas esperadas a causa de una amenaza (*hazard*) determinada sobre un elemento expuesto durante un período de tiempo. Según la manera en que se defina el elemento en riesgo, éste se puede cuantificar en función de la pérdida económica esperada, o según el número de vidas perdidas, o la extensión del daño físico a la propiedad.

Existen multitud de definiciones de riesgo diferentes en la literatura. En este proyecto se parte de la definición de riesgo (*risk*) de la Comisión Europea (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004):

“The probability of harmful consequences or expected losses resulting from a given hazard to a given element at danger or peril, over a specified time period.” (La probabilidad de pérdidas catastróficas o las pérdidas esperadas debido a los efectos sufridos como consecuencia de la actuación de un agente (amenaza) sobre una región en un periodo de tiempo determinado).

Con el fin de comprender un riesgo y para comparar riesgos diferentes, o incluso para determinar la evolución del riesgo por efecto del cambio climático, los científicos y economistas usualmente tratan de cuantificarlo. Esto se hace recogiendo datos sobre los efectos de las diversas amenazas que causan el riesgo y sobre la base de análisis estadísticos que pronostican la probabilidad de eventos futuros. Otro aspecto crítico para la evaluación de riesgos futuros es la identificación de las causas, efectos y entendimiento de los procesos que ocurren ante acontecimientos desastrosos o fenómenos de cambio climático.

Obviamente, la precisión a la hora de cuantificar el riesgo depende en gran parte de la cantidad de información disponible. Las bases de datos de acciones o sucesos susceptibles de generar efectos negativos o pérdidas son importantes a la hora de caracterizar la significancia estadística para cuantificar la probabilidad de ocurrencia, tanto por su calidad, como por su cantidad, en términos de número de registros. Estos factores influyen en la determinación del riesgo, y por tanto, éste queda perfectamente definido si además de su estimación puntual se define un intervalo de confianza. Estos intervalos representan, según se mire, el margen de duda o la confianza respecto a cualquier estimación ofrecida de riesgo futuro.

Agente (Hazard)

Otro factor importante es el agente y/o amenaza (*hazard*) que en este contexto se define como todo evento, fenómeno físico o derivado de la actividad humana, que puede provocar daños en términos de pérdidas de vidas humanas, propiedad, pérdidas socioeconómicas y degradación ambiental, en el entorno costero.

Nótese que no sólo es necesario conocer los agentes o amenazas que pueden afectar a la costa, sino, además, conocer su frecuencia temporal de ocurrencia y cuantificar su magnitud. Por este motivo, se introduce el concepto de **incertidumbre** (*uncertainty*) asociada a un agente o amenaza, que en este caso se define como la probabilidad de que un agente se produzca con una magnitud dada en una región y en un intervalo de tiempo determinado. Este concepto de agente e incertidumbre se suele denominar también **peligrosidad**.

El agente y su incertidumbre en términos de frecuencia de ocurrencia son independientes tanto de la zona de costa a la que afectan, como de las actividades a las que son susceptibles de afectar. No así la intensidad, que puede verse mitigada o amplificada debido a la orientación, orografía u otras características de la costa. Un ejemplo claro es el oleaje, que se ve afectado en su propagación conforme se aproxima a la costa debido a los efectos de refracción, difracción, asomeramiento, reflexión y rotura, modificando como consecuencia su intensidad. Esta variabilidad espacial se tiene en cuenta en el estudio, ya que en cada tramo de costa seleccionado se calculan las respectivas distribuciones estadísticas de los agentes.

Exposición (Exposure)

En cuanto al término exposición (*exposure*), en el estudio se utiliza para enlazar el agente con el riesgo en una zona concreta, y de esta manera incluir la información de la orografía de la costa y la disposición de las actividades distribuidas a lo largo de la misma, y susceptibles de verse afectadas por un agente. Por lo tanto, la exposición, se define como la zona, región, entidad o ente que se ve afectado ante la ocurrencia de un evento asociado al agente. Usualmente en la bibliografía sobre desastres naturales este término se emplea para definir la población que vive en una zona geográfica afectada por un agente.

Vulnerabilidad (Vulnerability)

Es obvio que cuando una determinada zona costera se ve afectada por un agente de una intensidad determinada, la población, los ecosistemas, las infraestructuras, los servicios y/o las actividades económicas se ven afectados. Para cuantificar ese daño se define el concepto de vulnerabilidad (*vulnerability*) como la capacidad que tienen las zonas, regiones, entidades o entes de anticiparse, enfrentarse, resistir y recuperarse del impacto producido por un agente de una magnitud dada, entendiendo que la vulnerabilidad está constituida por múltiples factores institucionales, económicos y socioculturales. Desde el punto de vista ingenieril, la vulnerabilidad es una función

matemática definida según el grado de pérdida del elemento afectado, dependiendo de la intensidad del agente. Para propósitos socio-económicos más generales, la vulnerabilidad es un concepto definido de forma menos estricta, y en muchos casos basta con clasificar las unidades de estudio mediante una escala graduada entre “sin daños” y “daños totales”.

La Comisión Europea (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004) considera que la vulnerabilidad está compuesta de dos términos: **la susceptibilidad o sensibilidad** (*susceptibility or sensitivity*) y la **resiliencia** (*resilience*) donde la resiliencia a su vez puede dividirse en dos términos: **la capacidad de resistir** (*coping capacity*) y **la recuperación** (*recovery*).

Ya en el ámbito del cambio climático, el IPCC define la vulnerabilidad como el grado de daño que el cambio climático puede producir en un sistema natural o social, y se establece que la vulnerabilidad es función de:

- la **susceptibilidad o sensibilidad** (*sensitivity*) de un sistema a cambios en el clima (el grado de respuesta de un sistema a un cambio dado en el clima, incluyendo efectos perjudiciales y beneficiosos);
- la **capacidad de adaptación** (*adaptive capacity*) definida como el grado en el cual, ajustes en prácticas, procesos o estructuras pueden moderar o eliminar el daño potencial o permiten aprovecharse de las oportunidades creadas por un cambio dado en el clima. Este concepto podría equivaler al concepto de **resiliencia** dado por la Comisión Europea (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004).

En las secciones siguientes se explica de forma más concreta cómo se van a tratar cada uno de estos conceptos en este estudio.

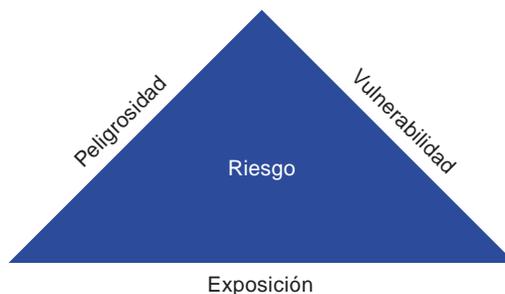
3. Descripción de la Metodología planteada

3.1. Metodología para la evaluación del riesgo

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 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, éste 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 2).

FIGURA 2
EL TRIÁNGULO DEL RIESGO



Fuente: Schneiderbauer y Ehrlich, 2004.

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

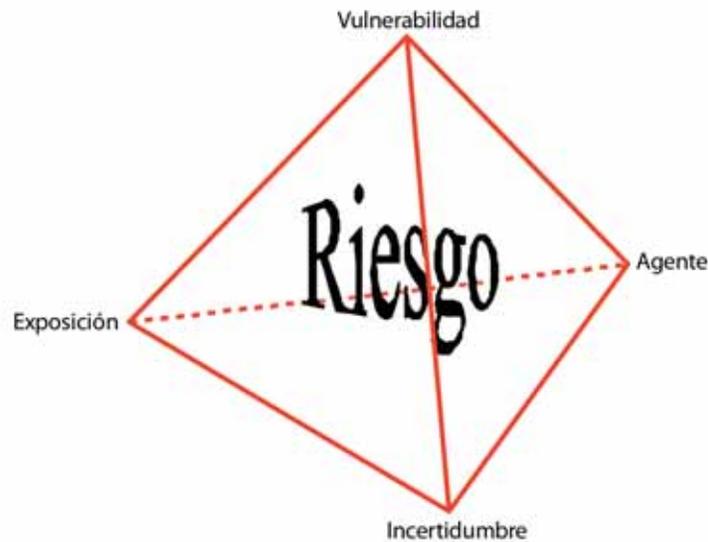
$$R_{ah} = H_{ah} E_a V_{ah} \quad (1)$$

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 (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**, **incertidumbre**, **exposición**, y **vulnerabilidad** (véase la figura 3), y que se definieron en la sección anterior. Nótese que estos elementos constituyen el tetraedro del riesgo (“*risk tetraedral*”), y son los elementos que se emplearán en este estudio para la determinación cuantitativa del riesgo.

FIGURA 3
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.

- 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 tal efecto ya se considera en la vulnerabilidad.
- Para estimar la vulnerabilidad (*vulnerability*) es importante determinar la sensibilidad (*sensitivity 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.

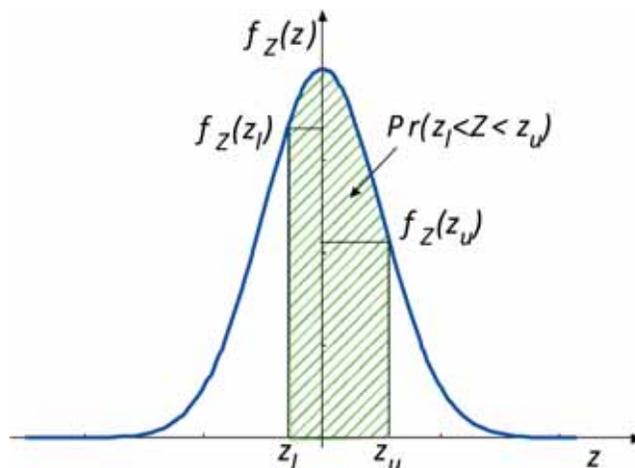
Para facilitar el desarrollo, supóngase que se va estudiar el riesgo de inundación de la costa. El agente considerado para cuantificar este riesgo sería la cota de la inundación (Z), que de forma simplificada depende del nivel del mar (X) y del ascenso (Y) debido al oleaje a través del siguiente funcional:

$$z = g(x,y) \quad (2)$$

Nótese que las variables están en minúsculas porque hacen referencia a instancias particulares de las variables aleatorias. Por tanto, si se conoce la distribución estadística de las variables X e Y , partiendo del conocimiento de la función de densidad conjunta $f_{(X,Y)}(x,y)$, la variable cota de inundación, que define el daño, es una variable aleatoria cuya función de densidad depende tanto de las distribuciones de X e Y como del funcional (2) que las relaciona.

En la figura 4 se muestra la función de densidad y la probabilidad de que la variable aleatoria Z (el agente o amenaza) esté entre los valores z_i y z_{i+1} . Nótese que esa probabilidad representa, para el agente cota de inundación, cual es la incertidumbre asociada a que el nivel se encuentre entre esas dos cotas, y se corresponde con la integral mostrada en la figura 4. En los documentos dedicados a las dinámicas y los impactos se explica cómo se han determinado o estimado esas probabilidades cuantitativamente en cada caso considerado.

FIGURA 4
FUNCIÓN DE DENSIDAD DE LA VARIABLE ALEATORIA COTA DE INUNDACIÓN
(AGENTE O AMENAZA, HAZARD)



Fuente: Elaboración propia.

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

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_z(z)E(z)V(z)dz \quad (3)$$

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 .

Nótese que la definición matemática del riesgo está en consonancia con la definición propuesta para este proyecto, ya que representa el valor esperado de la exposición por la vulnerabilidad, y es una estimación del valor esperado de las pérdidas.

Es importante recalcar que la expresión (3) constituye una conceptualización genérica, que permite obtener muchas de las definiciones de riesgo existentes en la literatura como particularizaciones de la misma. Así por ejemplo, si en el evento inundación se considera un único umbral límite z_{lim} a partir del cual se produce daño, y la probabilidad de que se supere ese umbral es P , y si, además, se definen la vulnerabilidad y la exposición como valores constantes e iguales a los que se producen con ese nivel de inundación, la expresión (3) quedaría como:

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f_z(z)E(z)V(z)dz = E(z_{lim})V(z_{lim}) \int_{z_{lim}}^{\infty} f_z(z)dz = E(z_{lim})V(z_{lim})P \quad (4)$$

Como se ve, la expresión (4) coincide con la definición de riesgo como producto de probabilidad 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) se simplifica y queda como:

$$R = E(z_{lim})V(z_{lim})P(z_{lim}) = C \times P \quad (5)$$

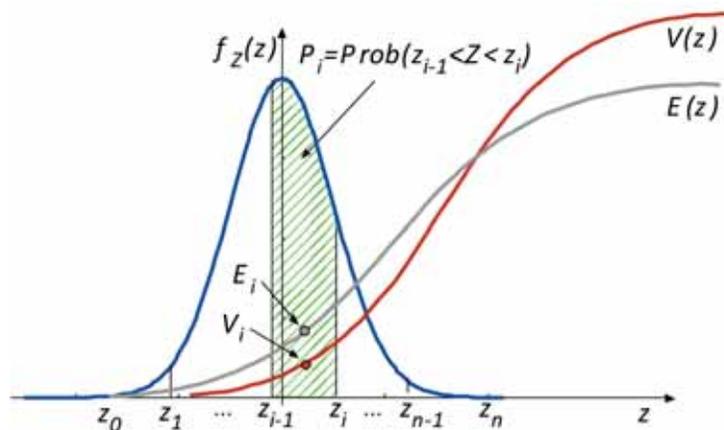
Donde el riesgo es igual a la probabilidad por las consecuencias. Expresión esta última que también se emplea en la literatura.

Desde el punto de vista práctico es inviable trabajar de forma diferencial empleando la expresión (3), ya que es complicado definir de forma continua tanto la función de exposición como la de vulnerabilidad. Por ese motivo la ecuación (3) se discretiza integrando mediante la regla del trapecio de la siguiente manera:

$$R \approx \sum_{i=1}^n P_i E_i V_i \quad (6)$$

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 5.

FIGURA 5
DISCRETIZACIÓN EN TÉRMINOS DE LA MAGNITUD DEL AGENTE
PARA LA POSTERIOR EVALUACIÓN DEL RIESGO



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la definición del riesgo presentada en (6) y esta discretización, el riesgo es igual a cero si cualquiera de las tres componentes: probabilidad (P_i), exposición (E_i) o vulnerabilidad (V_i), es nula. En esta definición también se tienen en cuenta los siguientes factores:

- 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.

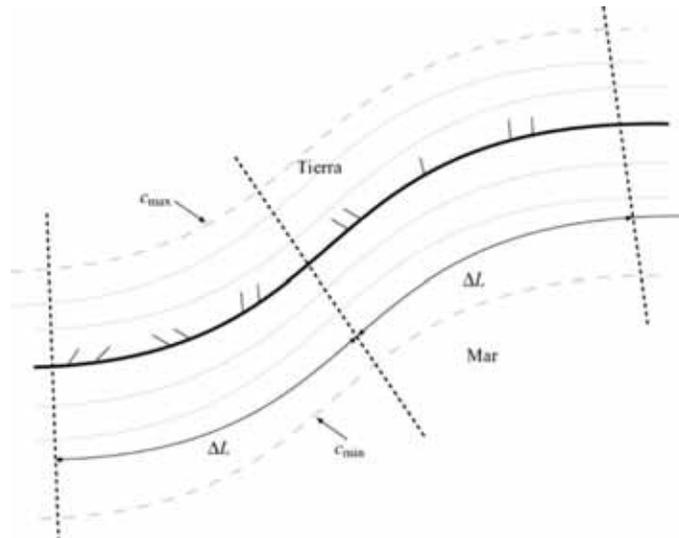
Para tratar de explicar la aplicación de esta metodología desde el punto de vista práctico se va a considerar el ejemplo del cálculo del riesgo de inundación a lo largo de la línea de costa.

3.2. Caso práctico: Evaluación del riesgo por sumergencia de la costa

El primer paso para la determinación del riesgo de inundación de la costa es la discretización de la misma en tramos o unidades de estudio en los que calcular el riesgo. Esta discretización determina la escala espacial del estudio y el nivel de detalle. Por otro lado, la selección de las dimensiones de estas unidades está condicionada por el alcance del estudio y por los datos disponibles sobre dinámicas, cartografía, geomorfología, ecosistemas y actividades socioeconómicas de la zona analizada. A continuación se presenta un ejemplo genérico de aplicación. En el documento referente a la vulnerabilidad y la exposición se describe el proceso para establecer las dimensiones de las unidades de estudio y el método de análisis SIG seguido.

Una vez definida la longitud de cada tramo, ΔL , se establecen las cotas, c_{\min} y c_{\max} , que van a delimitar la anchura de cada unidad de estudio, tal y como se muestra en la figura 6.

FIGURA 6
DISCRETIZACIÓN LONGITUDINAL DEL TRAMO DE COSTA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

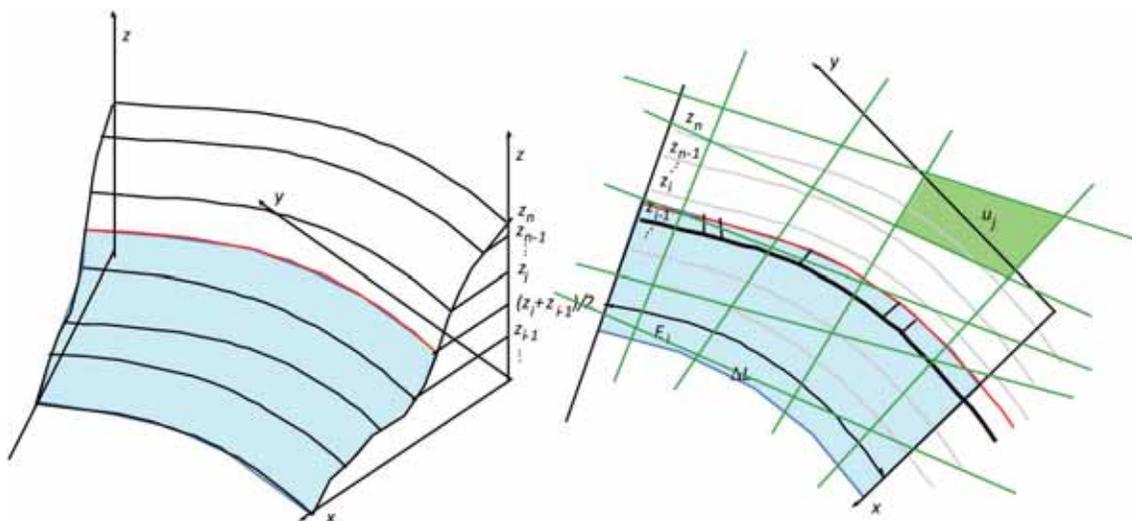


Fuente: Elaboración propia.

Dependiendo del grado de resolución de la información disponible, cada unidad de estudio estará dividida en celdas (píxeles), u_j , con diferentes atributos (cuadrícula verde en la figura 7).

Para cada uno de las unidades de estudio y en función de los niveles de cotas de inundación en los que se discretice, se obtiene sobre el modelo cartográfico de la línea de costa, la zona de exposición correspondiente a la cota media del intervalo considerado (véase la zona azul en la figura 7).

FIGURA 7
DISCRETIZACIÓN LONGITUDINAL DEL TRAMO DE COSTA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO. LOS NIVELES DE COTA DE INUNDACIÓN VAN DETERMINANDO LA ZONA EXPUESTA (ZONA EN AZUL)



Fuente: Elaboración propia.

Una vez definida la zona de exposición es necesario evaluar la vulnerabilidad de cada una de las celdas, u_j , comprendidas en la zona expuesta para cada magnitud i -ésima del agente. Nótese que una vez realizada esa tarea la expresión aproximada del riesgo para ese tramo de costa se obtiene de la siguiente manera:

$$R \approx \sum_{i=1}^n \left(P_i \sum_j A_{ij} V_j \right) \quad (7)$$

Donde la suma en j se corresponde con cada una de las celdas contenidas en la zona expuesta A_{ij} , es el área expuesta de la celda j -ésima para la magnitud i -ésima del agente, y V_{ij} es la vulnerabilidad de la unidad j -ésima para la magnitud i -ésima del agente.

Dada la magnitud del estudio, y la dificultad de definir una vulnerabilidad diferente en función de la intensidad del agente, en este caso inundación, se considera que ésta es independiente de la intensidad y solo varía con el agente. Por lo tanto, $V_{ij} = V_j$ de forma que, en este caso, (7) queda:

$$R \approx \sum_{i=1}^n \left(P_i \sum_j A_{ij} V_j \right) \quad (8)$$

Nótese que, pese a que conceptualmente, para evaluar el riesgo se multiplica la exposición por la vulnerabilidad, desde el punto de vista práctico y para cada caso concreto, es necesario definir cómo se calcula ese término (véase documento de impactos en las costas). En el caso de la inundación es sencillo, ya que tan sólo consiste en multiplicar las vulnerabilidades asociadas a cada unidad j -ésima por el área (que representa la exposición) de la misma que resulta inundada con el nivel i -ésimo del agente (nivel del mar en este caso).

3.3 Determinación de los intervalos de confianza del riesgo (*uncertainty*)

La estimación puntual del riesgo derivada de la expresión (6) está condicionada por dos factores. El primero tiene que ver con la incertidumbre de los datos, que se caracteriza principalmente mediante la información de los ajustes de las distribuciones de cada una de las variables aleatorias de las que depende cada agente. De tal forma que, asociados a los datos, se dispone de un estimador de los parámetros de las distribuciones ($\hat{\theta}$) y de una matriz de varianzas-covarianzas ($\hat{\sigma}_{\theta}$) que caracteriza la incertidumbre de los parámetros. Por ese motivo, el valor del riesgo en la expresión (6) se va a denotar como \hat{R} , ya que corresponde con al estimador puntual del riesgo para unos parámetros dados, en concreto para el valor medio estimado.

El segundo condicionante tiene que ver con el criterio utilizado para la definición de la vulnerabilidad, que en muchos casos es subjetivo, y condiciona el resultado. Si se encargara la definición de la vulnerabilidad a varios equipos de trabajo la cuantificación de la vulnerabilidad probablemente sería diferente. Además, a diferencia de los parámetros de las distribuciones, en este caso no se tiene una medida cuantitativa de la incertidumbre.

Dada la importancia de cuantificar la incertidumbre asociada a la estimación del riesgo, en este proyecto se va a calcular teniendo únicamente en cuenta la incertidumbre de los parámetros de las distribuciones, y para ello se emplea el método de estimación por puntos (Hong, 1998; Morales y otros, 2010).

3.4 Efectos del cambio climático en la evaluación del riesgo

Partiendo de la metodología presentada en los puntos anteriores, la variación del riesgo en la costa debido al cambio climático, se lleva a cabo en las siguientes etapas:

- En primer lugar se estudia el riesgo presente teniendo en cuenta los ajustes de las distribuciones de las variables climáticas incluyendo sus tendencias al día de hoy, con sus incertidumbres a partir del método de estimación por puntos ($\hat{R}_{2010}, \hat{\sigma}_{R,2010}$).
- El segundo paso es repetir el proceso de evaluación del **riesgo** con los parámetros en el **horizonte de proyección**, por ejemplo el año 2050, con lo que se obtiene ($\hat{R}_{2050}, \hat{\sigma}_{R,2050}$).

Dado que se han calculado únicamente los dos primeros momentos de las distribuciones de riesgos en el 2010 y en el 2050, el **incremento de riesgo** se define como:

$$\Delta \hat{R}_R = \hat{R}_{2050} - \hat{R}_{2010} \quad (9)$$

Donde $\Delta \hat{R}$ es una variable aleatoria normal cuyos parámetros son $\Delta \hat{R} = \hat{R}_{2050} - \hat{R}_{2010}$ y $\sigma_{\Delta \hat{R}} = \sqrt{\hat{\sigma}_{R,2050}^2 + \hat{\sigma}_{R,2010}^2}$.

Con esta información se puede calcular la esperanza de la variación del riesgo, así como los intervalos de confianza que se calculan como:

$$\Delta \hat{R} \pm \Phi^{-1}(1-\alpha/2)\sigma_{\Delta \hat{R}} \quad (10)$$

Donde α es el nivel de confianza 0,95 en una distribución normal.

Una vez realizado este cálculo, se pueden generar mapas de riesgo y de variación de riesgo (documento 4 del proyecto).

Nótese que en la metodología desarrollada, para evaluar el riesgo en un cierto año horizonte, se debe obtener la función de densidad de probabilidad del agente $f_z(z)$, la vulnerabilidad $V_{(z)}$ y la exposición $E_{(z)}$. En este trabajo se ha considerado exclusivamente el riesgo asociado a la variación del agente, aunque la metodología es lo suficientemente genérica como para considerar que la vulnerabilidad, o la exposición, son variables a lo largo del tiempo (por ejemplo, por cambios demográficos o de renta en el largo plazo).

Ya que en la evaluación del riesgo asociado a cada impacto subyacen diversas hipótesis, que impiden homogeneizar los riesgos absolutos en las unidades en que se presentan, se debe uniformizar el riesgo en una escala donde sean intercomparables los distintos resultados. Para ello, cada riesgo absoluto, se discretiza en cuatro rangos: bajo, medio, alto y muy alto. Estos rangos se definen de dos maneras, según la distribución de los resultados: 1) linealmente entre el valor de 0 y el máximo riesgo obtenido en el caso de que la población de resultados se distribuya de manera aproximadamente simétrica respecto a una media, o 2) con los percentiles de 25, 50 y 75% si la distribución de resultados es asintótica y no simétrica respecto de la media.

Otra opción para representar el riesgo es analizarlo desde el punto de vista del aumento relativo respecto a las condiciones actuales. Si bien con el aumento absoluto del riesgo (9) se consigue localizar los puntos conflictivos por variación máxima de un determinado impacto, en función de la magnitud de las consecuencias, analizando éstas en términos relativos (11), se pueden definir las zonas que, pese a no ser las de mayor aumento absoluto, sufren mayor incremento en proporción a su riesgo actual. Esta aproximación puede ser muy útil para variables donde la sensibilidad sea mayor ante un aumento rápido respecto a las condiciones actuales, más que ante la magnitud del impacto. Incluso, pueden existir zonas que ya están en riesgo o impactadas y, el aumento del impacto, pese a ser mayor en magnitud, no sea tan grave como en otras donde actualmente su riesgo es mínimo. Esta aproximación, además, cuenta con la ventaja de que es adimensional, al presentarse en tanto por ciento de cambio.

$$\Delta \hat{R}_R = \frac{\hat{R}_{2050} - \hat{R}_{2010}}{\hat{R}_{2010}} \cdot 100 \quad (11)$$

A su vez, en el caso concreto de las obras marítimas, diseñadas para un cierto periodo de retorno, se define un índice de seguridad (12) que está relacionado con el riesgo en la medida que expresa la pérdida de seguridad de una obra marítima respecto a la que fue diseñada originalmente (con recurrencia media de N años), inducida por la variación futura esperable de las acciones de cálculo (representada por el periodo de retorno en el futuro, N_o). Este índice se analizará más detenidamente en el apartado dedicado a las infraestructuras portuarias en el documento 3 de este estudio relativo a los impactos del cambio climático en la costa de ALyC.

$$IS = \frac{1/N_o}{1/N} = \frac{N}{N_o} \quad (12)$$

3.5 Agentes e impactos considerados en este estudio

Como se ha mencionado al inicio, a la hora de plantear el estudio de los efectos del cambio climático en la costa es necesario definir: (1) los agentes o acciones susceptibles de cambiar y de causar impactos en la costa; (2) los impactos a estudiar y (3) la metodología de evaluación del cambio (incremento/disminución del riesgo). En los apartados anteriores se ha abordado el tercer punto. Se ha definido la metodología general de cálculo y evaluación del riesgo y se ha presentado una aplicación simplificada para el caso de riesgo por inundación.

Una vez establecida la metodología, para llevar a cabo una correcta estimación del riesgo, es importante la definición precisa de los **agentes** o amenazas (*hazard*) que van a causar **impactos** en la costa, así como su correcta caracterización estadística (incertidumbre, *uncertainty*).

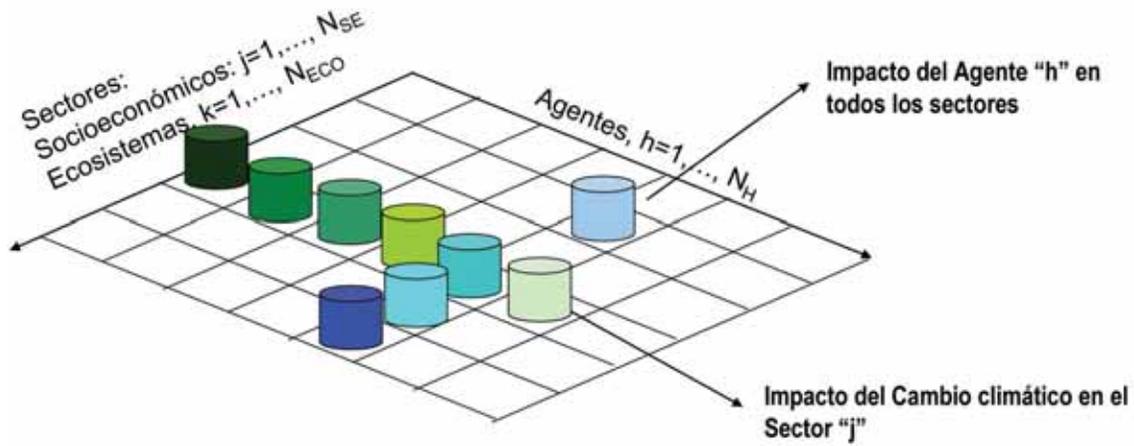
La estimación del impacto del cambio climático en la costa es una tarea que entraña gran complejidad no solo por la dificultad que supone obtener predicciones fiables de la evolución de las amenazas, sino también por los numerosos factores físicos, biológicos, socioeconómicos, políticos, etc. que se deben tener en cuenta si se quiere tener una medida del riesgo futuro. Como se ha visto, para cuantificar ese riesgo se necesita, asumiendo que las amenazas están perfectamente definidas, el cálculo de la vulnerabilidad de la costa, siendo ésta la suma de la vulnerabilidad de los numerosos componentes de la misma que abarcan desde el aspecto físico al administrativo. Esto requiere una cantidad ingente de datos que se incrementa a medida que se aumenta la resolución del estudio (de global a local) y que, en general, no están disponibles ni siquiera para el estado actual, así que mucho menos para situaciones futuras.

En este contexto, este estudio pretende avanzar en el conocimiento de los impactos del cambio climático en la costa de ALyC, centrándose principalmente en el medio físico. Una de las principales aportaciones de este trabajo es la obtención de estos impactos a alta resolución utilizando para ello técnicas avanzadas tanto estadísticas como de modelado numérico.

En la figura 8 se presenta un esquema del modelo que se va a seguir en este trabajo. Como indica la figura, existen unos agentes o amenazas cuya variación debida al cambio climático podrá generar un impacto sobre los ecosistemas y los sectores socioeconómicos de un tramo de costa determinado. Este modelo permite calcular el impacto y el riesgo desde distintas aproximaciones. Por ejemplo, podrá evaluarse de forma global: impacto de todos los agentes analizados sobre todos los sectores y ecosistemas (todo el plano de la cuadrícula de la figura 8) o de forma parcial: impacto de un agente sobre todos los sectores socioeconómicos (cilindros en tonos azules).

Aplicando este esquema a la zona de estudio, se va a analizar la variación debida al cambio climático de los agentes climáticos oceánicos y su impacto en la costa. En concreto, se analizaría de forma global el riesgo de todos los elementos (sectores y ecosistemas) de la costa ante los distintos impactos y sobre tres elementos particulares de la costa como las playas, las infraestructuras portuarias y los arrecifes de coral.

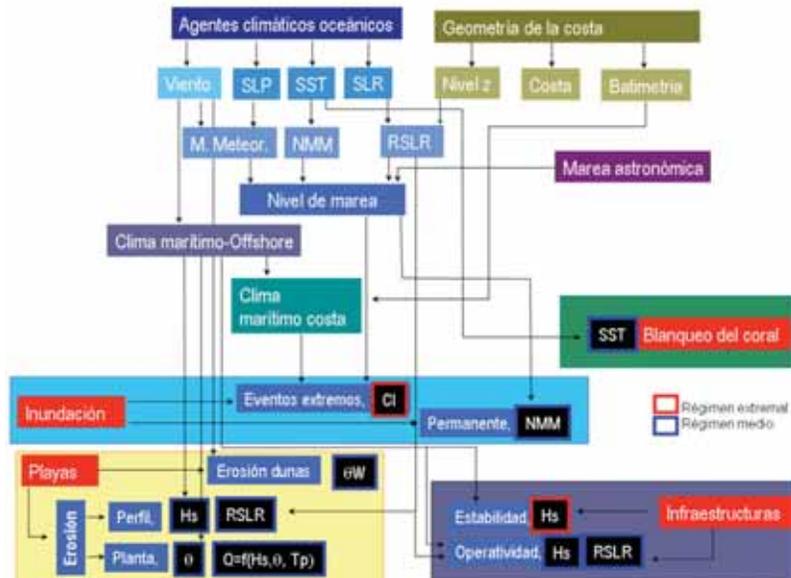
FIGURA 8
ESQUEMA CONCEPTUAL



Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinados los impactos que se van a considerar, es preciso identificar los agentes o amenazas que los producen, las relaciones entre ellos y las variables que se utilizan para cuantificar cada fenómeno. En la figura 9 se presenta un esquema que representa los elementos implicados en el análisis de los impactos sobre las costas de forma genérica.

FIGURA 9
DEFINICIÓN Y MARCO GENERAL DE LOS AGENTES E IMPACTOS EN LAS COSTAS Y SU RELACIÓN ENTRE SÍ



Fuente: Elaboración propia.

Como se ve en la figura 9, se ha denominado agentes climáticos oceánicos a aquellos íntimamente ligados a la dinámica marina, y que son los siguientes:

- a) Viento
- b) SLP (*Sea Level Pressure*): Presión atmosférica en la superficie del mar
- c) SLR (*Sea Level Rise*): Subida del nivel del mar
- d) SST (*Sea Surface Temperature*): Temperatura de la superficie del mar

A través de la acción de los agentes a, b, c y d, de la marea astronómica y conociendo el movimiento de la superficie de la Tierra (subsistencia/elevación) respecto del nivel del mar se obtiene el nivel del mar relativo (*Relative Sea Level Rise, RSLR*), y el clima marítimo tanto en profundidades indefinidas (*Clima marítimo-Offshore*) como en la costa (*Clima marítimo costa*). Así, se obtienen las variables que representan cada fenómeno en régimen medio y en extremal (enmarcadas en azul y en rojo, respectivamente, en la figura 9).

Las líneas de flujo de la figura terminan en bloques que representan las variables utilizadas para cuantificar los impactos.

La **inundación** de la costa puede ser causada por eventos extremos y entonces será **temporal** o por la subida del nivel medio del mar (*NMM*) y será **permanente**. En el primer caso, se calculará mediante la variable *Cota de Inundación (CI)*, que es, a su vez, una combinación de variables de clima marítimo en la costa (altura de ola significativa, *H_s*, periodo, *T* y dirección, θ) y de nivel de marea. En el caso de inundación permanente, ésta se evaluará analizando la variable *NMM*.

Para calcular la **erosión de las playas** se va a obtener: (1) el retroceso del **perfil de playa** que depende de las variables *H_{s12}* (altura de ola significativa superada 12 horas al año) y *RSLR* (aumento relativo del nivel del mar, y (2) el giro en **planta de las playas**, calculado a través del cambio en la dirección del flujo medio de energía (θ) y del transporte potencial de sedimentos, que depende de las características del clima marítimo (*H_s*, *T* y θ).

Se va a calcular el **riesgo en las infraestructuras** a través de la evaluación de su **estabilidad**, calculada mediante el régimen extremal de oleaje (*RE(H_s)*) y de su **operatividad** que dependerá del régimen medio de oleaje (*RM(H_s)*) y del aumento del nivel del mar (*RSLR*).

Por último, **el riesgo en los arrecifes de coral** se va a analizar a través del efecto que la variación de la temperatura del mar (*SST*) produce en estos ecosistemas. Esto se hará calculando la probabilidad de que se produzca el fenómeno denominado blanqueo, (*bleaching*).

Evidentemente, a partir de la información generada se podrían evaluar otros riesgos por integración de diferentes variables asociadas a los agentes considerados y la vulnerabilidad específica para cada caso.

La metodología es suficientemente genérica como para introducir cualquier otro tipo de agentes o variables, así como impactos, pudiendo incluir, por ejemplo, amenazas sobre la zona costera de origen continental (caudales de ríos, precipitación, escorrentía, temperatura ambiente, etc).

En los documentos específicos se define de forma más exhaustiva el tratamiento de cada una de las variables utilizadas en este estudio.

4. Conclusiones

Este documento se ocupa de la descripción de la metodología integral de evaluación de riesgo desarrollada para el estudio regional de los efectos del cambio climático en la costa de ALyC. La conceptualización de los diferentes términos y factores que integran la evaluación del riesgo se han definido y referenciado en primer término para evitar confusiones terminológicas entre las muchas disciplinas que utilizan conceptos como peligrosidad, vulnerabilidad, exposición, consecuencias o riesgo. Partiendo de una definición clara y concreta de los conceptos involucrados en la evaluación del riesgo se ha construido una formulación capaz de incluir la incertidumbre y los distintos factores socioeconómicos y físicos de una forma integral mediante la definición de tres factores: la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición. Así, cada riesgo está asociado a un determinado impacto sobre un cierto sector y la estructura matemática queda plenamente establecida en el desarrollo del presente documento.

Obsérvese que la metodología propuesta es una posible solución a la evaluación del riesgo, ambiciosa y suficientemente generalista para ser aplicada en otros ámbitos del análisis de riesgo de fenómenos naturales, aunque en este caso haya sido utilizada para el análisis de los impactos en las costas del cambio climático.

La figura 10 muestra un esquema del desarrollo metodológico que se propone. Partiendo de la evaluación de las dinámicas, 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 geoespaciales, permite la definición de la evaluación del riesgo, su análisis y la toma de decisiones derivadas, tales como estrategias de adaptación.

FIGURA 10
DEFINICIÓN Y MARCO GENERAL DE LOS AGENTES E IMPACTOS
EN LAS COSTAS Y SU RELACIÓN ENTRE SÍ



Fuente: Elaboración propia.

5. Bibliografía

- Birkmann, J., (2006), “Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards disaster Resilient Societies”. Jörn Birkmann (Ed.). United Nations University.
- Carter, T.R.; Parry, M.L.; Harasawa, H., (1994), *IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations*, London; University College.
- Coburn, A.W., T.J.S. Spence, y A. Pomonis, (1991), *Vulnerabilidad y evaluación de riesgo*, PNUD/UNDRO.
- Hong, H.P., (1998), “An efficient point estimate method for probabilistic analysis”, *Reliability Engineering and System Safety*, 59, 261-267.
- IPCC (2007), *Climate Change - The Physical Science Basis 2007*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC (1995), *Climate Change 1995: IPCC Second Assessment Report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Meyer V. (2005), *Methoden der Sturmflut-Schadenpotentialanalyse an der deutschen Nordseeküste*, Dissertation at the University of Hannover, UFZ-Dissertation 3/2005.
- McCarthy y otros, (2001), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Morales, J.M., Baringo, L., Conejo, A.J., Minguez, R., (2010), “Probabilistic power flow with correlated loads and wind sources”. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 4(5), 641-651.
- Schanze (2002), “After the river Elbe flooding – societal risk prevention needs a transdisciplinary flood research”. *GAIA II* (4), 247-254.
- 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. ISBN 92-894-8732-1.



Este documento auxiliar es parte 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 la descripción de la metodología integral de evaluación de riesgo desarrollada para el estudio regional del cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe. Para su elaboración, se han revisado y redefinido las metodologías propuestas en la literatura para el cálculo de riesgos. La metodología para la evaluación del riesgo puede ser aplicada en otros ámbitos del análisis de riesgo, entre ellos otros fenómenos naturales, aunque en este caso haya sido utilizada para el análisis de los impactos en las costas del cambio climático.

La aplicación de esta metodología se lleva a cabo en el estudio a partir de la evaluación de las dinámicas costeras, seguida de la definición de los impactos derivados por el cambio climático y particularmente considerando su distribución estadística actual y futura. Paralelamente se contempla un análisis de la vulnerabilidad y la exposición de los medios socioeconómico y físico, basado en datos geoespaciales, que permite la definición de la evaluación del riesgo al cambio climático, su análisis y la toma de decisiones, tales como la definición y el estudio de estrategias de adaptación.