

Fuente: sjrankin <a href="http://www.flickr.com/photos/24354425@N03/37380130065">Hurricane Maria

## **Metodologías para evaluar la amenaza, vulnerabilidad, exposición y riesgo por ciclones tropicales**

---

*Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres*

*Colombia menos vulnerable, comunidades más resilientes*

Juan Manuel Santos Calderón  
Presidente de la República

Carlos Iván Márquez Pérez  
Director Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD

Graciela Ustáriz Manjarrés  
Subdirectora General Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres -  
UNGRD

Lina Dorado González  
Subdirectora para el Conocimiento de Riesgo

### **Autores**

Gloria León Aristizábal – Subdirección para el Conocimiento de Riesgo - UNGRD  
Joana Pérez Betancourt – Subdirección para el Conocimiento de Riesgo - UNGRD

### **Revisión de estilo:**

Oficina Asesora de Comunicaciones - UNGRD

© Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2018

Está prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación con fines comerciales. Para utilizar información contenida en ella se requiere citar la fuente.

## Introducción.

Un evento de múltiples riesgos, como los ciclones tropicales, implica más de un peligro natural donde los riesgos pueden llegar a estar correlacionados entre sí, produciendo afectaciones simultáneas, en cascada o distribuidas en el tiempo, un ejemplo fue el caso del huracán Matthew, que en octubre de 2016, se acercó a nuestro país, y pasó a 125 km al norte de Punta Gallinas - La Guajira con una potente categoría 5, generando no solo lluvias intensas en zonas del norte de Colombia, sino también algunas inundaciones, crecientes súbitas, vendavales y deslizamientos, demandando la asistencia de la UNGRD en 21 municipios de 5 departamentos y atención a 26.548 familias afectadas.

Una comunidad sometida a eventos de peligro debe tener una mayor conciencia, preparación y códigos de conducta para reducir sus impactos.

El objetivo de este documento es identificar las distintas metodologías que se usan en la actualidad para las evaluaciones de riesgo para ciclones tropicales con el propósito de tener conocimiento sobre los métodos y criterios para abordar los análisis de amenaza de estos sistemas, qué técnicas se usan en los modelos de exposición y cómo se aplican los modelos de vulnerabilidad, con el propósito de preparar otras evaluaciones relacionadas con el riesgo de ciclones tropicales que den directrices para mitigar sus efectos.

Este documento presenta cuatro capítulos, el primero una breve descripción de los antecedentes de política de la gestión del riesgo de desastres, el segundo describe la conceptualización de riesgo por ciclones tropicales, el tercero describe experiencias de metodologías usadas para la evaluación del riesgo por ciclones tropicales y el cuarto presenta cómo se calcula el riesgo por ciclones tropicales.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	1
1. Antecedentes de la política.....	1
1.1. Políticas Nacionales de gestión del riesgo.....	1
1.2. Políticas Internacionales de gestión de riesgo.....	3
2. Conceptualización de riesgo por ciclones tropicales.....	6
2.1. Amenazas asociadas a ciclones tropicales.....	12
2.1.1. Ciclones tropicales.....	14
2.1.2. Amenazas asociadas a ciclones tropicales.....	17
2.2. Exposición ante ciclones tropicales.....	20
2.3. Vulnerabilidad ante ciclones tropicales.....	21
2.4. Consideraciones para la evaluación del riesgo por ciclones tropicales....	22
3. Experiencias de metodologías de evaluación de riesgo por ciclones tropicales.	24
3.1. Estimación de amenaza.....	24
3.1.1. Vientos fuertes.....	25
3.1.2. Marea de tormenta.....	34
3.2. Estimación de la exposición.....	36
3.3. Estimación de Vulnerabilidad.....	40
4. Estimación y Cálculo de Riesgo.....	43
4.1. Riesgo probabilístico.....	43
4.2. Riesgo usando teledetección y análisis espacial.....	45
4.2.1. Ecuaciones de riesgo.....	46
4.2.2. Criterios y selección de escala.....	47
4.2.3. Toma de decisiones multicriterio.....	48
4.2.4. Modelación de riesgos.....	49
Bibliografía.....	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema metodológico de riesgo según IPCC .....	4
Figura 2: Ciclos para la gestión de impactos ciclónicos (Adaptado de Khan, 2008) 7	
Figura 3: Esquema general de evaluación del riesgo por ciclones tropicales .....	11
Figura 4: Esquema de un sistema ciclónico organizado .....	13
Figura 5: Inundación producida por una marejada ciclónica .....	18
Figura 6: Modelo de SLOSH, para estimar nivel de inundación por una marejada ciclónica .....	19
Figura 7: Diagrama de flujo del módulo de amenaza por huracán .....	30
Figura 8: Componentes de modelo Florida Public Hurricane Loss Model – FPHLM .....	31
Figura 9: Funciones de vulnerabilidad de viento (izquierda) y marea de tormenta (derecha) .....	41
Figura 10: Modelo general de riesgo .....	43

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de la información y los tipos de datos necesarios en cada etapa de la gestión de desastres ciclónicos (Hoque et al., 2017) .....	9
Tabla 2: Características de los sistemas ciclones Tropicales.....	15
Tabla 3: Características de ciclones tropicales que han pasado sobre zonas insulares, costeras o al interior de Colombia. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2 -IBTrACS.....	16
Tabla 4: Descripción general de algunos datos y métodos utilizados para modelar el riesgo de ciclón tropical .....	44

# 1. Antecedentes de la política.

## 1.1. Políticas Nacionales de gestión del riesgo.

El Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres (SNPAD), se creó el día 13 de noviembre de 1985 como una red institucional sistémica, responsable de coordinar todas las acciones encaminadas a la prevención y atención de desastres en todo el territorio nacional. Este sistema se crea a raíz del desastre que generó la erupción del Volcán Nevado del Ruiz.

En principio, el SNPAD se consolidó con un enfoque notablemente asistencialista, aunque se reconoce la incorporación de la función de la prevención. Posteriormente, con la formulación del Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (PNPAD), en 1998, se avanzó hacia una aproximación conceptual más amplia, o de transición, pese a que las intervenciones integrales fueron limitadas. Aun así, se estableció como un referente a nivel de América Latina.

Con la Ley 46 de 1988<sup>1</sup> y Decreto Ley 919 de 1989<sup>2</sup>, se asignan los lineamientos y directrices a cada uno de sus actores que conforman el PNPAD. Posteriormente con el Decreto 93 de 1998<sup>3</sup> se establece y regula las acciones que se adoptan en dicho sistema. Adicionalmente con la Ley 99 de 1993<sup>4</sup>, se faculta a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR) para que asesoren y colaboren con las entidades territoriales a efecto de incorporar el tema del riesgo en la planificación.

<sup>1</sup>

[http://www.ideam.gov.co/documents/24024/26915/C\\_Users\\_hbarahona\\_Desktop\\_Monica+R\\_normas+pag+web\\_ley+46+de+1988.pdf/7990561a-63f5-4927-9c91-fad4e81383a7](http://www.ideam.gov.co/documents/24024/26915/C_Users_hbarahona_Desktop_Monica+R_normas+pag+web_ley+46+de+1988.pdf/7990561a-63f5-4927-9c91-fad4e81383a7)

<sup>2</sup> <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=13549>

<sup>3</sup> <http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/decreto+93+de+1998.pdf/0fb4bff6-e1d5-4c23-aba0-243e67014884>

<sup>4</sup> [http://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/colombia/colombia\\_99-93.pdf](http://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/colombia/colombia_99-93.pdf)

No obstante, con la emergencia y calamidad que se presentó en el periodo de 2010-2011, en gran parte del país, debido a eventos de inundación y movimientos en masa, principalmente, generados por las condiciones lluviosas presentes en dicho periodo, influenciadas por fenómenos de variabilidad climática como El Niño/ Oscilación del Sur (ENSO), fase “La Niña”. Como resultado de estos sucesos se evidenció que no existen instrumentos claros ni una definición de roles para las diferentes tareas relacionadas con el manejo y atención del riesgo de carácter nacional, regional y local.

Por tal, se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), como entidad adscrita al Departamento Administrativo de la Presidencia de la República, con el fin de mejorar y actualizar el desempeño del direccionamiento y la coordinación del SNPAD (Decreto 4147 de 2011<sup>5</sup>).

Con la Ley 1523 de 2012<sup>6</sup>, se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD). Además, se define lo siguiente:

***“La gestión del riesgo de desastres, en adelante la gestión del riesgo, es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible”.***

***“Análisis y evaluación del riesgo: Implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar***

<sup>5</sup> <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2011/Documents/Noviembre/03/dec414703112011.pdf>

<sup>6</sup> <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/ley152324042012.pdf>



los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. Se estima el valor de los daños y las pérdidas potenciales, y se compara con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo y preparación para la respuesta y recuperación”.

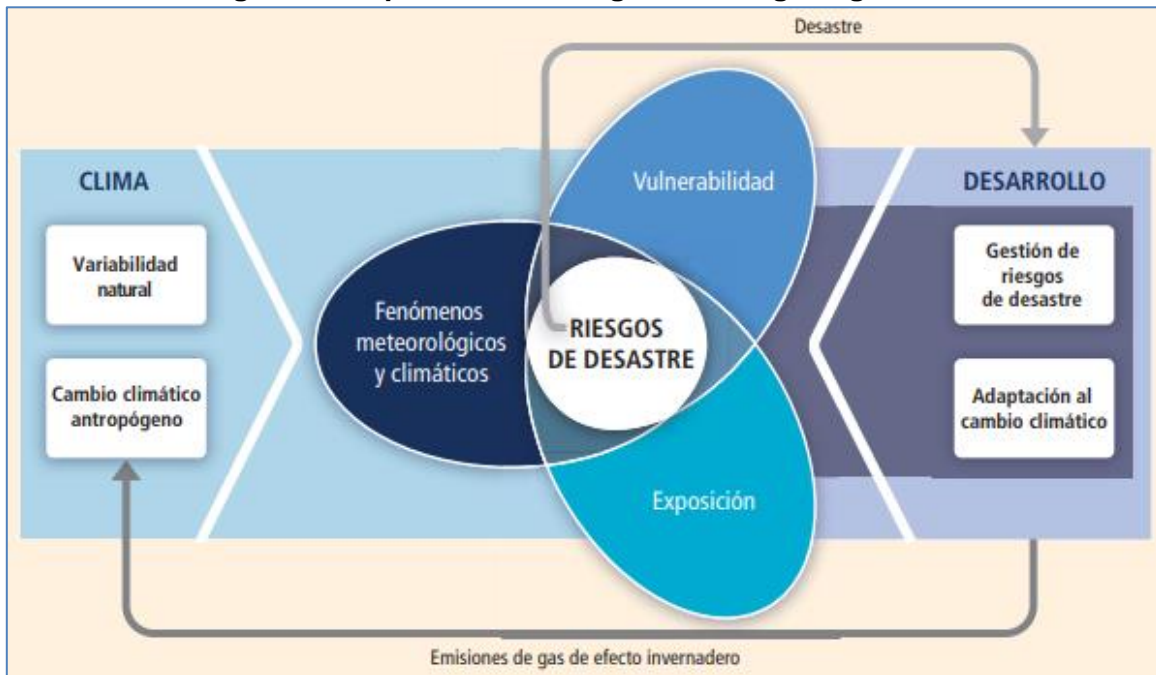
## 1.2. Políticas Internacionales de gestión de riesgo.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) de las Naciones Unidas, en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático (IPCC, 2012), definen la gestión de riesgos de desastre como los procesos para diseñar, aplicar y evaluar estrategias, políticas y medidas destinadas a mejorar la comprensión de los riesgos de desastre. Así como, fomentar la reducción y la transferencia de riesgos de desastre y promover la mejora continua en las prácticas de preparación, respuesta y recuperación para casos de desastre, con el objetivo explícito de aumentar la seguridad humana, el bienestar, la calidad de vida, la resiliencia y el desarrollo sostenible. En el marco de lo anterior IPCC (2012) define el riesgo de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo} = f \{ \text{Amenaza (eventos meteorológicos extremos); Exposición; Vulnerabilidad} \} \quad (1)$$

El esquema de la Figura 1 y ecuación 1., indica que la naturaleza y la gravedad de los impactos debidos amenazas asociadas a fenómenos meteorológicos extremos, incluidos ciclones tropicales no dependen solo de los propios fenómenos sino también de la exposición y la vulnerabilidad del sistema en cuestión.

Figura 1: Esquema metodológico de riesgo según IPCC



Fuente: IPCC (2012)

Los impactos adversos se consideran cuando los desastres que producen daños generalizados y provocan alteraciones graves en el funcionamiento normal de las comunidades o sociedades. Adicionalmente el IPCC (2012), las siguientes definiciones:

- ✓ **Fenómenos meteorológicos o climáticos extremos.** Es la ocurrencia de un valor de una variable meteorológica o climática por encima (o por debajo) de un valor de umbral cercano al extremo superior (o inferior) de la horquilla de valores observados de la variable.
- ✓ **Exposición.** La presencia de personas, medios de subsistencia, servicios y recursos ambientales, infraestructura, o activos económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente.
- ✓ **Vulnerabilidad.** La predisposición a verse afectado negativamente.

- ✓ **Desastre.** Alteraciones graves del funcionamiento normal de una comunidad o una sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con las condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales, económicos o ambientales adversos generalizados que requieren una respuesta inmediata a la emergencia para satisfacer las necesidades humanas esenciales, y que puede requerir apoyo externo para la recuperación.
- ✓ **Riesgos de desastre.** La probabilidad de que, durante un período específico de tiempo, se produzcan alteraciones graves del funcionamiento normal de una comunidad o una sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales, económicos o ambientales adversos generalizados que requieren una respuesta inmediata a la emergencia para satisfacer las necesidades humanas esenciales, y que pueden requerir apoyo externo para la recuperación.

Es de anotar, que la exposición y la vulnerabilidad son dinámicas, varían en función del tiempo y espacio. Además, dependen de los factores económicos, sociales, geográficos, demográficos, culturales, institucionales, gobernanza y ambientales (IPCC, 2012).

## 2. Conceptualización de riesgo por ciclones tropicales.

Debido al forzamiento radiactivo influenciado por factores antropogénicos, se están presentando cambios en los patrones climáticos globales e incrementos de fenómenos extremos meteorológicos y oceanográficos. El cambio climático global está modificando los niveles de amenaza y exacerbando el riesgo de desastres. Algunos estudios calculan que, para el 2050, en la Cuenca del Caribe, el cambio climático sumará 1.000 millones de dólares americanos, adicionales a las pérdidas anuales esperadas solo por daños de vientos ciclónicos (UNISDR , 2015).

La razón de ser de la gestionar el riesgo, es convertirse en una parte inherente del arte del desarrollo, no un simple componente adicional, sino una serie de prácticas integradas que busque reducir el impacto de las amenazas, en lugar de gestionar los desastres como indicadores del riesgo sin gestionar. Para gestionar los riesgos inherentes a la actividad social y económica, es necesario combinar tres enfoques (UNISDR , 2015):

- ✓ Gestión prospectiva del riesgo; su finalidad es evitar la acumulación de nuevos riesgos. La evaluación de riesgos de los eventos extremos debe seguir un enfoque prospectivo, anticipando la tasa de ocurrencia de eventos de diferentes magnitudes y las consecuencias asociadas.
- ✓ Gestión correctiva del riesgo, que busca reducir los riesgos existentes.
- ✓ Gestión compensatoria del riesgo para respaldar la resiliencia de las personas y las sociedades que enfrentan un riesgo residual que no se puede reducir de manera efectiva.

Los impactos de los ciclones tropicales se pueden reducir mediante el uso de enfoques de gestión apropiados. Un plan eficaz de gestión de desastres

ciclónicos se estructura en cuatro fases (Figura 2): respuesta, recuperación, prevención / reducción y preparación (Hoque *et al.*, 2017; Khan, 2008).

**Figura 2: Ciclos para la gestión de impactos ciclónicos (Adaptado de Khan, 2008)**



La respuesta y la recuperación se consideran en la fase posterior al impacto del ciclón, mientras que la fase previa al impacto está definida por la prevención y la preparación.

La fase de respuesta incluye las acciones para reducir el impacto de los ciclones tropicales y proteger la vida y la propiedad durante e inmediatamente después de su llegada e incorpora las operaciones de evacuación, socorro,

búsqueda y rescate, y la gestión de los recursos naturales. La ubicación espacial, el tipo y la intensidad, el porcentaje de área y las estructuras afectadas constituyen la información requerida para respaldar estas actividades. Esta información se deriva a través de un proceso de evaluación general de impactos y es un proceso importante para entregar información de apoyo en la fase de respuesta. La restauración y la reconstrucción de las áreas afectadas por el ciclón, en particular, el seguimiento del avance de la remoción de escombros y el rebrote de vegetación, y la reconstrucción de asentamientos y estructuras, se incluyen en la fase de recuperación.

La fase de prevención implica la reducción de la probabilidad y los impactos de los desastres ciclónicos mediante la incorporación de las medidas requeridas y la planificación. El proceso incluye el mapeo del riesgo de ciclones a través del mapeo de la amenaza, la vulnerabilidad y la capacidad de mitigación. Además, incluye el desarrollo de los sistemas necesarios para gestionar los desastres de ciclones tropicales y reducir sus impactos. El monitoreo de las amenazas por los ciclones, la identificación de áreas probables, el desarrollo de sistemas de alerta, la capacitación adecuada de voluntarios y los planes de evacuación se consideran parte de las actividades de preparación. El modelo de riesgo ciclónico es un proceso importante en esta etapa que puede proporcionar escenarios realistas que identifiquen áreas que pueden verse afectadas en el futuro (Hoque *et al.*, 2017).

Las fases de prevención y preparación incluyen medidas apropiadas y planificación que reducen la probabilidad y el impacto de los desastres de ciclones tropicales. La gestión del riesgo de ciclones es un proceso esencial para generar la información requerida para estas dos fases en el contexto de la vulnerabilidad de los ciclones, la evaluación y modelado de riesgos y su mitigación. La fase de preparación también incluye los procesos de seguimiento y pronóstico de ciclones para producir la información requerida para los sistemas de alertas (Hoque *et al.*, 2017).

Dado el corto historial de muchas cuencas oceánicas donde ocurren ciclones tropicales, se puede afirmar que la mayoría de las zonas costeras aún no han experimentado el evento de ciclón tropical de mayor intensidad o peligrosidad. Para evaluar la posibilidad de que ocurran eventos altamente destructivos en el futuro, independientemente de la metodología de análisis de riesgo, es necesario contemplar el uso de modelos analíticos probabilísticos, donde integre la información histórica disponible para predecir posibles consecuencias catastróficas, teniendo en cuenta sus incertidumbres (Bernal, Villegas, & Cardona, 2015).

**Tabla 1: Resumen de la información y los tipos de datos necesarios en cada etapa de la gestión de desastres ciclónicos (Hoque et al., 2017)**

Fase	Proceso	Tipo de información	Tipo de dato requerido	Escala	Exactitud
Respuesta	Evaluación de impactos	Área, cantidad, tasa y tipo de impactos en paisajes particulares	Resolución moderada a muy alta de imágenes satelitales para producir multidados de uso y cobertura del suelo	Local	Precisión general 85-90% clasificación de uso y cobertura del suelo
Recuperación	Evaluación de recuperación	Área, cantidad, tasa y tipo de recuperación en el paisaje (remoción de escombros, reconstrucción, rebrote de vegetación)	Resolución moderada a muy alta de imágenes satelitales para producir multidados de uso y cobertura del suelo	Local	Precisión general 85-90% para clasificación de uso y cobertura del suelo
Prevención / Reducción	Evaluación de riesgos	Infraestructura clave y áreas actuales en riesgo con ubicación espacial, nivel de riesgo, factores responsables del riesgo y adecuadas opciones de mitigación	Altura de la marea de tormenta, frecuencia de ciclones, velocidad del viento ciclónico, rangos de mareas, precipitación, población, uso y cobertura del suelo de imágenes satelitales y topografía de modelo digital de elevación (DEM)	Local/ Regional	Exactitud vertical absoluta total de DEM dentro de los 20 m. Precisión general 85-90% para clasificación de uso y cobertura del suelo
Preparación	Modelación de riesgos	Infraestructura clave y áreas que estarían en riesgo en el futuro	Históricos de velocidad de viento ciclónico y altura de la marea de	Local/ Regional	Exactitud vertical absoluta total de DEM dentro de

Fase	Proceso	Tipo de información	Tipo de dato requerido	Escala	Exactitud
		bajo escenarios de cambio climático con ubicación espacial, nivel de riesgo, factores responsables del riesgo y probables estrategias de mitigación	tormenta, aumento proyectado del nivel del mar, uso y cobertura del suelo de imágenes satelitales, topografía (elevación y pendiente) de DEM		los 20 m. Precisión general 85-90% para clasificación de uso y cobertura del suelo

Dada la limitación de información sobre eventos catastróficos ocurridos en el pasado y los eventos que ocurrirán en el futuro, las técnicas de teledetección y análisis espacial pueden proporcionar valiosa fuente de información en cada fase de gestión del impacto ciclónico. En la Tabla 1 se resume el tipo de información y datos requeridos en cada etapa de la gestión de desastres ciclónicos.

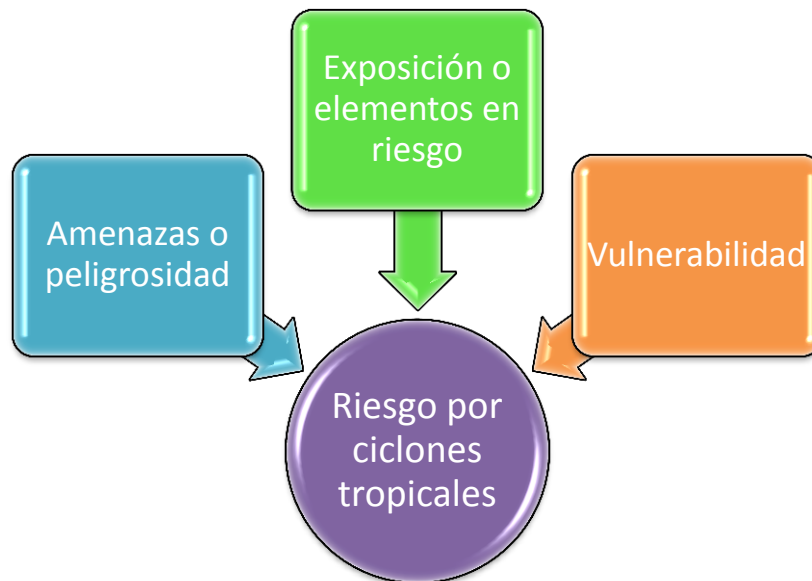
Resolución satelital de alta resolución (píxeles < 5 m) antes y después del evento ciclónico es el uso más común de teledetección para la gestión de desastres ciclónicos (Klemas, 2009). La información sobre la ubicación espacial, el tipo y la intensidad, el porcentaje del área y las estructuras afectadas se derivan de la evaluación de impacto, mientras que la remoción de escombros, el rebrote de la vegetación y la información de reconstrucción se obtiene de la evaluación de recuperación. La detección remota por satélite y el análisis espacial también pueden ser utilizado para ayudar a las medidas de gestión de riesgos a través de la estimación de la amenaza por ciclones, la vulnerabilidad y evaluación de la capacidad de mitigación y modelado en condiciones climáticas futuras probables (Lin et al., 2010; Li & Li, 2013; Hoque et al., 2017).

En general, los modelos de evaluación de riesgo de ciclones tropicales consisten, por un lado, en un componente meteorológico, para evaluar la amenaza como probabilidades de viento o mareas de tormenta y, por otro lado, modelos de proyección de pérdidas que toman en cuenta la vulnerabilidad (Powell *et al.*, 2005).



En la Figura 3, se presenta un esquema para evaluación del riesgo por ciclones tropicales, donde el riesgo está en función de la amenaza, exposición y nivel o grado de vulnerabilidad del sistema o población expuesta.

**Figura 3: Esquema general de evaluación del riesgo por ciclones tropicales**



La Organización de las Naciones Unidas Desastres (UNDRO por su sigla en inglés), conjuntamente con Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO por su sigla en inglés) (UNDRO, 1979), presentaron las siguientes definiciones conceptuales sobre riesgo en aras de unificar términos.

- ✓ **Amenaza, peligro o peligrosidad (Hazard-H):** Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un sitio dado.
- ✓ **Vulnerabilidad (Vulnerability -V):** Es el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable

ocurrencia de un suceso desastroso, expresado en una escala desde cero (0=sin daño) a uno (1=pérdida total).

- ✓ **Elementos en riesgos o Exposición (Elements at risk-E):** Hace referencia a la distribución de lo que potencialmente puede ser afectado, como la población, bienes (infraestructura, actividades económicas, servicios públicos, utilidades entre otros).
- ✓ **Riesgo específico (Specific Risk-Rs):** es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una función de la amenaza y la Vulnerabilidad.
- ✓ **Riesgo total (Total Risk-Rt):** Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y afectaciones sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un desastre u evento, es decir el producto del riesgo específico Rs y los elementos en riesgo o expuestos, E.

Según lo anterior, la evaluación del riesgo se puede expresar en la ecuación 2, donde la ecuación 1, definida por el IPPC, está en el marco de la siguiente expresión.

$$\text{Riesgo total (Rt)} = \text{Exposición(E)} * \text{Riesgo específico (Rs)} = \text{Amenaza (H)} * \text{Exposición(E)} * \text{Vulnerabilidad (V)} \quad (2)$$

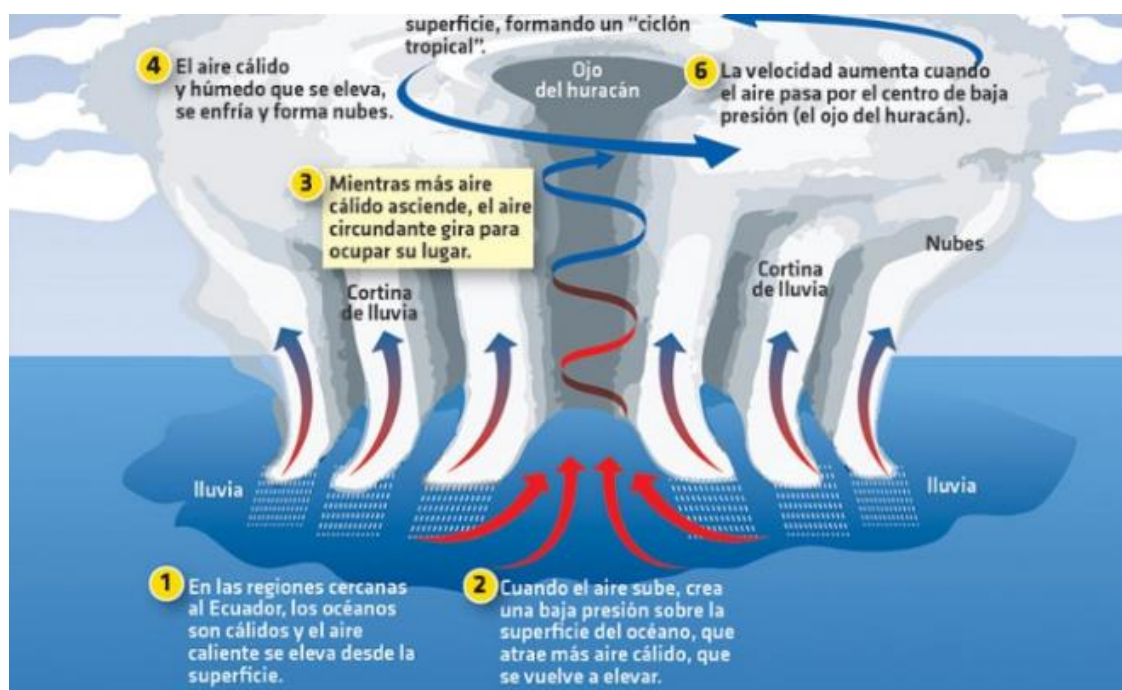
## 2.1. Amenazas asociadas a ciclones tropicales.

La identificación de las amenazas asociadas a los ciclones tropicales constituye un paso preliminar y de alta relevancia al análisis y evaluación del riesgo. El conocimiento de las condiciones de ocurrencia de eventos peligrosos, así como las características reportadas sobre eventos históricos importantes, proveen una primera idea del potencial destructivo de la amenaza, lo que permite conocer anticipadamente, de manera aproximada, los periodos de retorno de los eventos más importantes. La amenaza asociada a un ciclón tropical se determina

a través de un análisis de frecuencia de ocurrencia y severidad, a partir de información histórica de los eventos, estimadas con base en parámetros de intensidad del peligro determinado en una ubicación geográfica específica (CAPRA, 2009).

Según el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2013) hay evidencias muy sólidas del aumento del número de tormentas en el Océano Atlántico a partir de la década de 1970, desde que se disponen de observaciones de satélites se ha detectado un claro aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas de la máxima intensidad. Además, la mayoría de las proyecciones los escenarios de cambio climático indican que es probable que se presente un aumento de la velocidad máxima media del viento de los ciclones tropicales y de la intensidad de las lluvias a ellos asociadas.

**Figura 4: Esquema de un sistema ciclónico organizado**



Fuente: IMúllix (2018)

### 2.1.1. Ciclones tropicales.

Los ciclones tropicales son sistemas de baja presión, con escalas horizontales entre 100-1000 kilómetros (km) y se extienden a lo largo de la troposfera (WMO, 2017). Su formación se debe principalmente a la transferencia de calor de la superficie del océano, y por ello su disipación ocurre cuando llegan a agua fría o transitan sobre tierra de núcleo cálido que se forma sobre el océano y presenta una clara circulación de tipo espiral (Figura 4) con nubes-precipitación-vientos fuertes-presión bien organizado (Emanuel, 2003).

Entre su nacimiento y su máximo desarrollo pueden pasar por cuatro etapas de acuerdo con el grado de organización:

- ✓ **Perturbación tropical:** Área de baja presión en el trópico con carácter definido, mantiene su identidad por más de 24 horas. El sistema puede o no estar relacionado a disturbios perceptibles en el campo de los vientos. Si adquiere mejor organización e intensidad, puede ser el grado inicial de un ciclón tropical.
- ✓ **Depresión Tropical:** Hay evidencia de una circulación cerrada alrededor de un centro con vientos sostenidos máximos<sup>7</sup> menores de  $62 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (34 nudos ó 38 millas por horas (mph)).
- ✓ **Tormenta Tropical:** El sistema meteorológico presenta vientos máximos sostenidos entre  $63$  y  $117 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (34 y 63 nudos o 39 y 73 mph) pero circunscritos a la parte más interna y próxima al centro. En esta categoría al ciclón tropical se le asigna un nombre.
- ✓ **Huracán:** Vientos máximos sostenidos alrededor de la parte central que exceden los  $118 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (64 nudos o 74 mph). Los huracanes se clasifican en cinco (5) categorías (Tabla 2) de acuerdo con su potencia arrasadora según la escala Saffir-Simpson.

<sup>7</sup> La intensidad de los ciclones tropicales se define en términos del viento máximo promedio cerca del centro del ciclón a la altura estándar de 10 m sobre el océano o sobre una superficie terrestre llana y abierta. La velocidad media del viento se describe de acuerdo con la norma de la OMM, es decir, en términos del viento promediado durante un período de 10 minutos. Los datos de algunos métodos de análisis (como ADT, AMSU, SSMIS y SATCON) se distribuyen con valores de viento promedio de 1 minuto, norma empleada en los Estados Unidos.

**Tabla 2: Características de los sistemas ciclones Tropicales**

Ciclón tropical	Velocidad del viento	Marea*	Presión central*	Daños
	km*h <sup>-1</sup>	m	hPa	
Depresión tropical	0 - 62	0	> 980	<i>Daños mínimos locales.</i> Las lluvias persistentes pueden llegar a causar algunos daños e incluso inundaciones. Aumento del oleaje.
Tormenta tropical	63 - 117	0 - 3	> 980	<i>Daños mínimos.</i> Las lluvias abundantes pueden provocar inundaciones. Daños principalmente en árboles y arbustos. Fuerte oleaje.
Huracán Categoría 1	119 - 153	1.2 - 1.5	980 - 994	<i>Vientos muy peligrosos podrían producir algunos daños:</i> Casas bien construidas podrían tener daños en los marcos de los techos, tejas, revestimientos de vinilo y canaletas. Grandes ramas de árboles se romperán y los árboles plantados superficialmente pueden ser desgarrados. Grandes daños a las líneas eléctricas y postes eléctricos probablemente producirán apagones que podrían durar hasta varios días. Caminos y carreteras en costas bajas inundadas; daños menores en construcciones, muelles y atracaderos.
Huracán Categoría 2	154 - 177	1.8 - 2.4	965 - 979	<i>Vientos extremadamente peligrosos van a causar daños extensivos:</i> Bien construidas podrían sufrir daños mayores en los techos y paredes laterales. Muchos árboles plantados superficialmente van a ser desgarrados o quebrados y bloquearán numerosas calles. Se espera casi la pérdida total de electricidad con apagones que podrían durar desde varios días hasta semanas. Carreteras y caminos inundados cerca de las costas. Las marismas se inundan.
Huracán Categoría 3	178 - 208	2.7 - 3.7	945 - 964	<i>Daños devastadores van a ocurrir:</i> Casas bien construidas pueden incurrir en un daño mayor o remoción de la cubierta del techo y los astiles. Muchos árboles van a ser desgarrados o quebrados, bloqueando numerosas calles. La electricidad y el agua no estarán disponibles por varios días o semanas después de que pase la el ciclón. Marejadas sobre lo normal, inundando extensas áreas de zonas costeras.
Huracán Categoría 4	209 - 251	4.0 - 5.5	920 - 944	<i>Daños Catastróficos van a ocurrir:</i> Casas bien construidas pueden sufrir daños severos con pérdida de la mayor parte de la estructura de los techos y/o paredes exteriores. La mayoría de los árboles van a ser desgarrados o quebrados y postes de electricidad serán derribados. Los postes y árboles caídos van a aislar las áreas residenciales. La pérdida de energía durará por semanas hasta posiblemente meses. La mayor parte del área va a estar inhabitable por semanas o meses. Se producen altas marejadas. Los terrenos llanos son inundados.
Huracán Categoría 5	≥ 252	≥ 5.5	< 920	<i>Daños Catastróficos van a ocurrir:</i> Un gran porcentaje de las casas van a ser destruidas, con un derrumbe total del techo y de las paredes. Los postes y árboles caídos van a aislar las áreas residenciales. La pérdida de energía durará por semanas hasta posiblemente meses. La mayor parte del área va a estar inhabitable por semanas o meses. Ocurren daños considerables por inundaciones. Situación caótica.

\*Valor aproximado

**Tabla 3: Características de ciclones tropicales que han pasado sobre zonas insulares, costeras o al interior de Colombia. Fuente: Elaboración Propia, según base de datos HURDAT2 -IBTrACS**

Nombre	Estado	Lugar	Fecha	Vientos máximos sostenidos (km/h)	Presión central (hPa)
Sin Nombre	H2	Norte de La Guajira (Bahía Hondita, Norte parque Natural Macuira)	24-09-1877	167	SD
Sin Nombre	H2	Norte de La Guajira (Bahía Honda)	8-10-1892	157	SD
Sin Nombre	H2	Centro de la isla de San Andrés	10-09-1911	157	SD
HATTIE	H1	Nororiente de la isla de San Andrés	27-10-1961	120	911
ALMA	DT	Centro de la isla de Providencia	19-05-1970	46	1007
JOAN	TT	Norte de La Guajira (Uribia)	17-10-1988	111	995
BRET	TT	Sur de La Guajira (entre Barranca y Fonseca), Norte de la Sierra Nevada de Santa Marta, Norte de Magdalena (Zona Bananera) Norte de Atlántico (entre Baranoa y Polonuevo), Norte de Bolívar (cerca de Santa Catalina)	8-08-1993	74	1006
CESAR	TT	Norte de La Guajira (Bahía Hondita)	25-07-1996	74	1002
RINA	Perturbación	Occidente de la isla de Providencia	22-10-2011	46	1006

## En la

Tabla 3, se presentan condiciones físicas e impactos que caracterizan los sistemas ciclónicos según su etapa de formación. Es de anotar, que generalmente los ciclones tropicales más intensos son los más peligrosos, pero los impactos directos dependen de muchos factores además de la intensidad, como toca tierra o superficie continental sobre una zona de alta densidad de población puede provocar más daños, heridas y muertes que una tormenta muy intensa que azota una zona rural o con poca población. Adicionalmente, en la

Tabla 3, se muestran las características de los ciclones que han presentado impactos, generando riesgo en el población y bienes en algunas zonas de la costa Caribe colombiana.

### 2.1.2. Amenazas asociadas a ciclones tropicales.

La evaluación de las amenazas que ponen en peligro los elementos expuestos de una zona determinada es el primer paso para el análisis de riesgo. La principal amenaza directa asociada a los ciclones tropicales son los vientos fuertes, que pueden impulsar elementos y escombros a altas velocidades, además ocasionan caídas de árboles, pérdida de techo y fallas en las construcciones, la mayor parte de los daños materiales y financieros suelen ser causados por los vientos huracanados (Cochran, 2000). La segunda amenaza es la marea de tormenta costera, que consiste en un aumento de agua y oleaje debido a los efectos de vientos fuertes, a las bajas presiones atmosféricas y mareas astronómicas, que produce inundaciones costeras y la tercera amenaza es la acumulación de lluvia, ocasionado lluvias torrenciales o días consecutivos lluviosos que puede generar inundaciones.

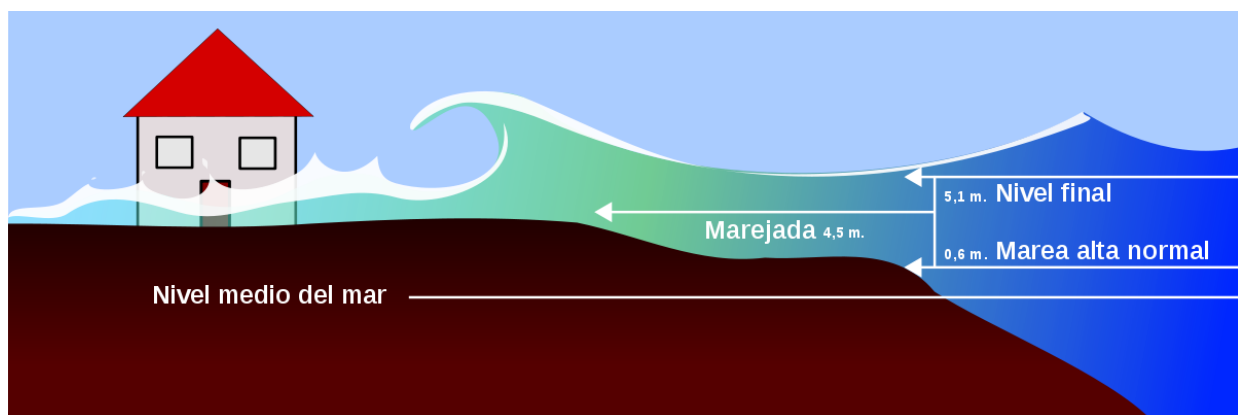
**Amenazas de vientos fuertes:** Es la amenaza dada por las probabilidades de ocurrencia de velocidad del viento fuertes relacionadas con los ciclones tropicales para las zonas costeras. La intensidad de los ciclones tropicales en la cuenca del océano Atlántico, Caribe y Golfo de México se define en términos del viento máximo sostenido cerca del centro del ciclón a la altura estándar de 10 m sobre el océano o sobre una superficie terrestre llana y abierta, como el promedio de 1 minuto, mientras que las ráfagas son unos segundos (3-5 s) de vientos máximos. Típicamente, en un ambiente de huracán, el valor máximo de 3 segundos de ráfagas durante un período de un minuto es en el orden de 1.3 veces

(ó 30% más fuerte que) más que 1 minuto de vientos sostenidos (AOML-NOAA, 2018).

La fuerza ejercida por el viento es proporcional al cuadrado de su velocidad, por lo tanto, puede esperarse que la totalidad de los daños debidos al viento aumente en forma muy rápida con los ciclones tropicales más violentos.

**Amenazas de marea de tormenta costera:** Es el aumento anormal del nivel del agua, causado por la marejada ciclónica y la marea astronómica. La marejada ciclónica, es el aumento anormal del agua en la costa del mar o de un lago, producida por los vientos fuertes de un ciclón que ha llegado a tierra y por la baja presión de la tormenta (AOML-NOAA, 2018). En el hemisferio norte, los valores más altos en la marejada ciclónica ocurren en el cuadrante delantero derecho del huracán. Los huracanes que son más intensos y grandes producen marejadas más altas. Además, las aguas menos profundas mar afuera contribuyen a mayores inundaciones por marejadas ciclónicas. La marejada ciclónica es hasta ahora la amenaza más grande a la vida y la propiedad a lo largo de la costa inmediata.

**Figura 5: Inundación producida por una marejada ciclónica**



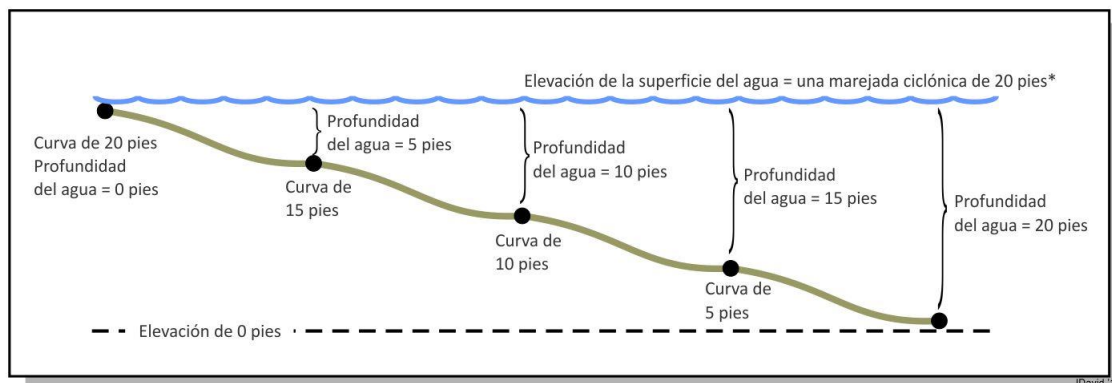
Fuente: AOML-NOAA (2018)



Esta acumulación la cual es un gran domo o cúpula de agua entre 75 a 150 km de anchura que invade la costa por influencia directa del ciclón tropical. Es producida principalmente por los vientos en altura, empujando la superficie oceánica. En su punto de máxima profundidad puede alcanzar a medir hasta cinco (5) metros (IDEAM, 2010) (Figura 5). La inundación se refiere a la altura de la marejada ciclónica que esta sobre el nivel del suelo.

Para estimar el nivel de inundación se puede utilizar el modelo Overland Surges from Hurricanes - SLOSH (por sus siglas en inglés), que al restar el promedio de la elevación de cada celda ("grid cell") con el nivel del mar calculado por el modelo es la referencia a un nivel vertical.

**Figura 6: Modelo de SLOSH, para estimar nivel de inundación por una marejada ciclónica**



\*Esto solamente representa la marejada ciclónica. Es posible que haya olas por encima de la superficie  
Centro de Servicios Costeros de la NOAA, Entrenamiento de Hacer Mapas de Inundaciones Costeras/El Programa de COMET

Fuente: AOML-NOAA (2018)

**Amenaza de acumulación de lluvia o lluvia torrencial:** Las lluvias que acompañan a los sistemas ciclónicos pueden ser de muy fuertes intensidad y durar varios días o se pueden disipar en horas. En la incidencia de la precipitación se reconocen como importantes la topografía local, la humedad y la velocidad de avance del ciclón. La fuerte precipitación causa dos tipos de destrucción.

El primero es debido a la infiltración del agua en los edificios causando daños estructurales; si la lluvia es continua y persistente, las estructuras simplemente pueden colapsar por el peso del agua absorbida.

El segundo, más generalizado, común y mucho más dañino, es la inundación sobre tierra, que pone en riesgo todos los valles junto con sus estructuras e instalaciones críticas de transporte tales como carreteras y puentes (OEA, 1993). De hecho, las inundaciones son la mayor amenaza de los ciclones tropicales para la gente que vive tierra adentro. Las inundaciones repentinas, definidas como un rápido aumento en los niveles de agua, pueden ocurrir rápidamente debido a la intensa lluvia. Inundaciones de largo plazo en los ríos y arroyos pueden persistir por varios días después del ciclón.

Las cantidades de lluvia no son directamente relacionadas a la fuerza de los ciclones tropicales, sino más bien a la velocidad de traslación y al tamaño de la tormenta, así como a la geografía del área. Las tormentas más grandes que se mueven lentamente producen más cantidades de lluvia. En adición, el terreno montañoso aumenta la lluvia de un ciclón tropical.

## **2.2. Exposición ante ciclones tropicales.**

La exposición se refiere principalmente a los componentes de bienes o a la población expuesta que puede verse afectada por un evento asociado a un sistema ciclónico. Para realizar la caracterización de la exposición es necesario identificar los diferentes componentes individuales incluyendo su ubicación geográfica, sus características geométricas, físicas e ingenieriles principales, su vulnerabilidad ante el evento amenazante, su valoración económica y el nivel de ocupación humana que puede llegar a tener en un escenario de análisis determinado (CAPRA, 2009).

De los sistemas ciclónicos que son originados en el Atlántico que han pasaron por el Mar Caribe, solo el 17% afectó directamente las costas colombianas (UNGRD, 2016). En Colombia son más frecuentes los ciclones tropicales en sus latitudes más septentrionales, por ello el área del Caribe occidental, donde se encuentra el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, presenta la mayor incidencia de estos sistemas, mientras que en la zona costera son raros, se destaca la Alta Guajira por ser la más expuesta. La mayor parte de los impactos de los ciclones tropicales en nuestro país son por efectos indirectos<sup>8</sup>, muy pocos de estos sistemas han tenido tránsito sobre las islas y costas colombianas.

### 2.3. Vulnerabilidad ante ciclones tropicales.

El impacto de las amenazas asociadas a los ciclones tropicales puede causar grandes pérdidas económicas, humanas y heridos tanto en los asentamientos costeros como en los continentales debido a la combinación de vientos muy fuertes, mareas de tormenta y fuertes lluvias (Bernal, Villegas, & Cardona, 2015). Para evaluar los riesgos planteados por los ciclones en una zona determinado, se debe evaluar la vulnerabilidad del sistema expuesto ante a cada amenaza o peligro.

La caracterización de la vulnerabilidad ante ciclones tropicales se realiza mediante la generación de funciones que relacionan el nivel de daño de cada componente con la intensidad del evento o amenaza asociado ante el sistema ciclónico. La función de vulnerabilidad debe estimarse para cada uno de los tipos constructivos característicos, de manera que puedan asignarse a cada uno de los componentes de la base de datos de exposición. Mediante las funciones de vulnerabilidad asignadas es posible cuantificar el daño o afectación producida en cada uno de los activos ante una amenaza presentada. Cada función de

---

<sup>8</sup> Efectos indirectos son consecuencias razonablemente previsibles de la acción del evento, pero son posteriores en el tiempo o se alejan más de los efectos directos (causados por la acción del evento y ocurren al mismo tiempo y lugar). Los efectos indirectos son conocidos como efectos secundarios. <https://www.fema.gov/types-effects>

vulnerabilidad está caracterizada por un valor medio y una varianza con lo cual es posible estimar su función de probabilidad respectiva (CAPRA, 2009).

## **2.4. Consideraciones para la evaluación del riesgo por ciclones tropicales.**

Entre 1982 y 2012, en promedio anualmente las pérdidas por desastres asociados a fenómenos naturales registrados a nivel mundial hacen a 42 millones de años de vida humana. El concepto de “años de vida humana” ofrece una representación más clara de los impactos de los desastres, ya que proporciona un parámetro con el que se describe el tiempo necesario para producir el desarrollo económico y el progreso social (UNISDR, 2015).

Al llevar a cabo un análisis de riesgo de catástrofe probabilístico asociadas a ciclones tropicales, componente relevante del riesgo, que incluyen los activos expuestos, su vulnerabilidad física y las intensidades de peligro, deben estar representados de tal manera que puedan ser estimados consistentemente a través de un procedimiento riguroso y sólido, en ambos términos analíticos y conceptuales. El análisis de riesgo probabilístico es una técnica de vanguardia que permite la contabilización de muchas de las incertidumbres asociadas con las intensidades de peligro y la caracterización de la vulnerabilidad física (Bernal, Villegas, & Cardona, 2015).

Los desastres pueden considerarse pasivos contingentes implícitos que aumentan las vulnerabilidades fiscales de cualquier país. En otras palabras, un desastre futuro es una deuda pública oculta e incierta que se convierte en un pasivo fiscal realizado cuando ocurre el evento. Para evaluar adecuadamente la sostenibilidad fiscal de un país, esta "deuda contingente", que representa las pérdidas potenciales de futuras catástrofes, debe agregarse a la deuda explícita actual (Bernal, Villegas, & Cardona, 2015).

Por lo tanto, los gobiernos deben reconocer que los desastres futuros deben ser considerados en los balances del país, ya que pueden generar importantes desequilibrios macroeconómicos. La mejor forma de evaluar estas pérdidas potenciales es mediante el uso de un marco probabilístico que permita a los gobiernos medir el riesgo de desastres en el contexto de la sostenibilidad fiscal. Con este enfoque, es posible identificar estrategias óptimas de protección financiera que impliquen transferir o retener este riesgo soberano (Bernal, Villegas, & Cardona, 2015).

### 3. Experiencias de metodologías de evaluación de riesgo por ciclones tropicales.

La evaluación del riesgo por ciclones tropicales ha sido analizada a través de la relación de amenaza por la vulnerabilidad, obteniendo un riesgo porcentual, que puede ser llevado en un valor económica al multiplicarlo por los elementos en riesgo o expuestos, donde han tenido en cuenta las múltiples amenazas asociadas como vientos fuertes, inundaciones por marea de tormenta, lluvias torrenciales y/o inundación por lluvias.

#### 3.1. Estimación de amenaza.

El objetivo de una evaluación de una amenaza es identificar la probabilidad de ocurrencia de un peligro especificado, en un período de tiempo futuro específico, así como su intensidad y área de impacto, a través de un conjunto de eventos.

Ciertas amenazas tienen disponibles técnicas bien establecidas para su evaluación. Esto es el caso de inundaciones, terremotos y peligros volcánicos. Otras amenazas, como las asociadas a los ciclones tropicales, tienen metodologías de evaluación menos definidas.

Por otro lado, evaluaciones de amenazas múltiples son difíciles de lograr debido en parte a los diferentes enfoques adoptados por las diversas disciplinas al evaluar los peligros potenciales específicos, como es el caso ante la ocurrencia de ciclones tropicales. El evento no se puede analizar de manera aislada y debe considerar los diferentes componentes que realmente representan amenaza, ya sea por separado o en conjunto.

Los componentes primarios de los ciclones tropicales son los vientos y la marea de tormenta, los componentes secundarios son las inundaciones derivadas por las lluvias torrenciales, los tornados, deslizamientos, entre otros.

### 3.1.1. Vientos fuertes.

Para estimar las probabilidades de velocidad del viento en una ubicación particular, se tiene en cuenta los eventos históricos de ciclones tropicales. Se utiliza las trayectorias de eventos que pasan dentro de un radio dado de exploración.

Usualmente se cuenta solo con la base de datos de ciclones tropicales que proporciona información sobre seguimiento e intensidad del mismo, razón por la cual se requiere incorporar un modelo de viento empírico o analítico para deducir el viento causado por estos sistemas en el sitio de interés seleccionados. A partir de la serie temporal obtenida de vientos se calculan las probabilidades.

Si bien es posible utilizar curvas de riesgo de viento y de mareas de tormenta para evaluar los riesgos, hoy se usan conjuntos de eventos para capturar la extensión espacial y la correlación de los riesgos de viento y marea de tormenta para modelar las pérdidas. Se generan conjunto de eventos que simulan la frecuencia, ubicación, intensidad, tamaño de acuerdo a los vientos máximos, velocidad de traslación, rumbo y debilitamiento del sistema.

En la mayoría de los modelos, la frecuencia e intensidad de los ciclones se parametriza a través de la diferencia de la presión central y periférica del sistema, o por un parámetro llamado intensidad relativa. También se utiliza el parámetro de Holland B que caracteriza la tasa de aumento de la presión atmosférica desde el centro de la tormenta hacia afuera, de manera que la velocidad máxima del viento del ciclón es directamente proporcional a  $\sqrt{B\Delta p}$ . Por lo tanto, es posible que las

tormentas con igual presión central tengan velocidades máximas del viento que pueden diferir aproximadamente en un 50%.

### *Conjunto de datos*

El conjunto de datos “International Best Track Archive for Climate Stewardship”<sup>9</sup> (IBTrACS) es una colección completa de todos los ciclones tropicales registrados en el mundo, incluida las cuencas del Atlántico, Golfo de México y Mar Caribe Norte, que a su vez es derivada de la base de datos Best Track Data (HURDAT2), para el periodo 1852 a 2017.

Sin embargo, el registro histórico es muy limitado para la inferencia estadística, en particular para aquellos lugares donde la frecuencia de los sistemas ciclónicos es muy baja, por ello, es común aumentar artificialmente el número de ciclones.

Los ciclones sintéticos son generados mediante diferentes técnicas estadísticas, como el uso de las simulaciones de Monte Carlo para la generación de trayectorias con un campo de viento estimado con base en un conjunto de ecuaciones de regresión adaptadas de los datos históricos. También se utilizan modelos dinámicos que se basan en la comprensión física de los ciclones tropicales en un ambiente y clima específicos para simular estos sistemas y producir trayectorias con sus respectivos campos de viento. La tercera técnica es una aproximación dinámica-estadística, donde las trayectorias son simuladas con técnicas estadísticas y a través de un modelo dinámico de intensidad de viento que se ejecuta a lo largo de las trayectorias, se produce el campo de viento del sistema. Listado y características principales modelos de trayectoria e intensidad pueden ser consultados en la NOAA [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/F2\\_esp.html](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/F2_esp.html).

---

<sup>9</sup> <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>



### *Modelo de viento*

Se necesitan modelos de campo de viento para calcular las velocidades del viento en los lugares de interés y en las ubicaciones de propiedad para el modelado de pérdidas. Los campos de viento también son un insumo principal para los modelos mareas de tormenta.

Típicamente, los campos de viento de los ciclones tropicales se modelan para obtener: el campo de viento gradiente (aproximación física al viento real a un nivel donde el rozamiento despreciable), el campo de viento a nivel de superficie y/o factores de ráfaga.

Generalmente, el modelo de viento se basa en el modelo (3) mejorado de campo de viento de Holland (2008) y después se ajusta la disminución de la velocidad en la periferia del ciclón con modelo de perfil radial empírico mediante un factor que depende de la distancia al centro del sistema y el radio máximo ciclónico (4).

$$v_m = \left( \frac{b_s}{\rho e} \Delta p \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$v_m = \left( \frac{b_s}{\rho e} \Delta p (r/r_m) \right)^{0.5} \quad (4)$$

dónde  $\rho$  es la densidad del aire,  $e$  es la base de los logaritmos naturales,  $\Delta p$  es la caída de la presión central del ciclón como una función de la distancia radial  $r$ , radio de los vientos máximos  $r_m$  y  $b_s$  es una cantidad que depende del cambio temporal de la presión, la velocidad de translación del sistema y de la latitud.

Algunas aplicaciones emplean modelos más complejos y que consideran la fricción superficial en los cálculos del campo de viento medio inicial, produciendo un campo de viento medio promediado verticalmente en lugar de un campo de viento de gradiente. Estos modelos explican los efectos de la fricción superficial sobre las asimetrías del campo eólico. A continuación, los vientos de nivel gradiente (o los vientos promediados verticalmente) se ajustan para referirse a vientos de nivel superficial a través del uso de un modelo de capa límite atmosférica o un factor de reducción de velocidad de viento. Se usan varios enfoques diferentes, que producen reducciones sobre aguas marítimas que van del 5 al 35% (Vickery *et al.*, 2000).

Finalmente, los vientos medios a nivel de superficie se ajustan según el terreno y el tiempo promedio usando los factores de ráfaga. La rugosidad del terreno o de la superficie es un parámetro utilizado para modelar los efectos de fricción de árboles, edificios y otros objetos en los vientos cerca de la superficie de la tierra. El tiempo promedio es el período de tiempo durante el cual ocurren los vientos máximos. La mayoría de los modelos disponibles usan tiempos promedios de 3 segundos o 1 minuto. Vickery *et al.* (2009) presenta una descripción completa del estado del arte en la modelación del campo de viento<sup>10</sup>.

La precisión del modelo de campo de viento debe validado comparando directamente los vientos modelados con las velocidades del viento registrado durante eventos reales ocurridos.

### *Experiencias*

El Modelo de Riesgo Global<sup>1112</sup> (Global Risk Model - GRM) es un modelo estadísticos, que usa datos históricos y datos de simulación de viento, y se desarrolló en el marco del Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del

<sup>10</sup> [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Powell/HurrHaz\\_2009.pdf](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/Powell/HurrHaz_2009.pdf)

<sup>11</sup> <https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/bgdocs/CIMNE-INGENIAR,%202014a.pdf>

<sup>12</sup> <http://preview.grid.unep.ch/>

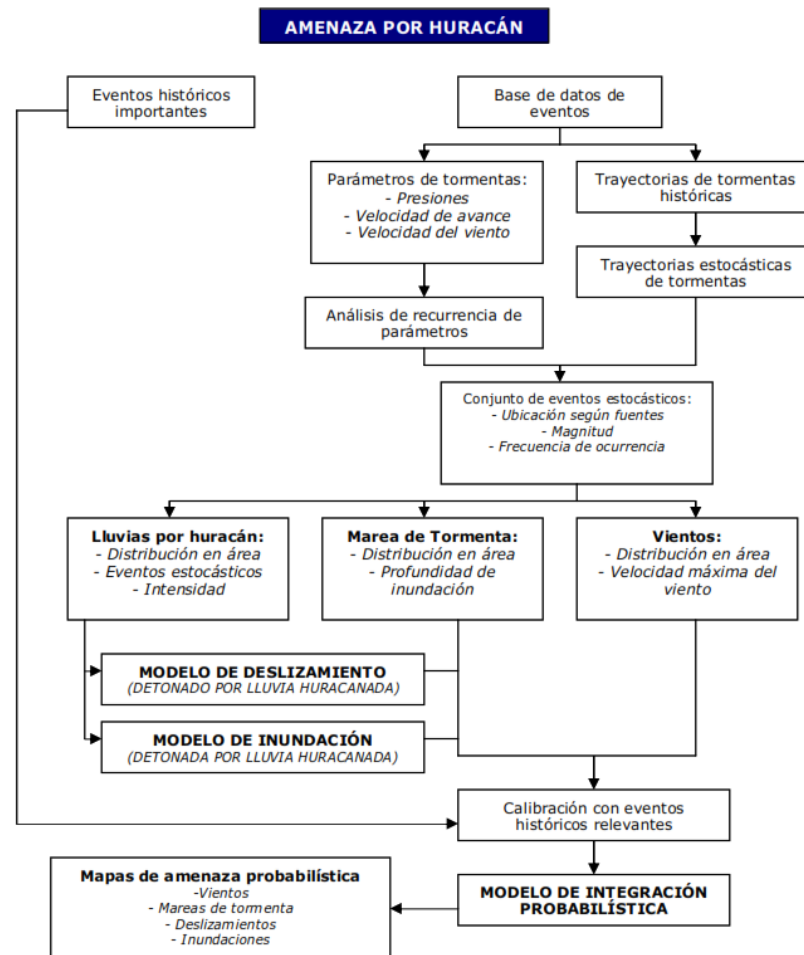
Riesgo de Desastres de 2013 (GAR13) de las Naciones Unidas como resultado de una estrecha colaboración con UNISDR, INGENIAR Ltda., CIMN, UNEP-GRID, WAPMERR, CIMA, NGI y GEM<sup>13</sup>, aplicando una evaluación basada en eventos históricos para crear un conjunto estocástico de ciclones.

La amenaza asociada a los ciclones tropicales la define por medio de su frecuencia de ocurrencia anual y su severidad (Figura 7), calculado las velocidades para ráfagas de 3 segundos a 10 metros sobre superficie para ubicaciones geográficas específicas (CIMNE & INGENIAR, 2015). Utiliza un conjunto de eventos estocásticos a través de la simulación de una serie de eventos aleatorios, Los eventos estocásticos se generan mediante el proceso bidimensional de Wiener. Calcula el viento gradiente usando la representación de Holland, para obtener luego las velocidades del viento modificada para sitios específicos por rugosidad y efectos topográficas, para finalmente generar las ráfagas. Para cada evento se calcula la frecuencia de ocurrencia como el inverso de la cantidad de años de registro y las observaciones de datos en cada cuenca. La amenaza peligro se caracteriza, en cualquier punto de un territorio determinado, a través de la probabilidad distribución de la intensidad definida en términos de su valor esperado y su varianza. El análisis de amenazas se realiza utilizando el software Tropical Cyclones Hazard Modeler (Bernal., 2014).

---

<sup>13</sup> United Nations Office for Disaster Risk Reduction – UNISDR (Geneva), INGENIAR Ltda. (Bogotá), International Center for Numerical Methods in Engineering – CIMNE (Barcelona), United Nations Environment Programme / Global Resource Information Database – UNEP-GRID (Geneva), Geoscience Australia (Canberra), World Agency on Planetary Monitoring and Earthquake Risk Reduction – WAPMERR (Geneva), CIMA Foundation (Savona), Norwegian Geotechnical Institute – NGI (Oslo) and the Global Earthquake Model – GEM (Pavia).

Figura 7: Diagrama de flujo del módulo de amenaza por huracán

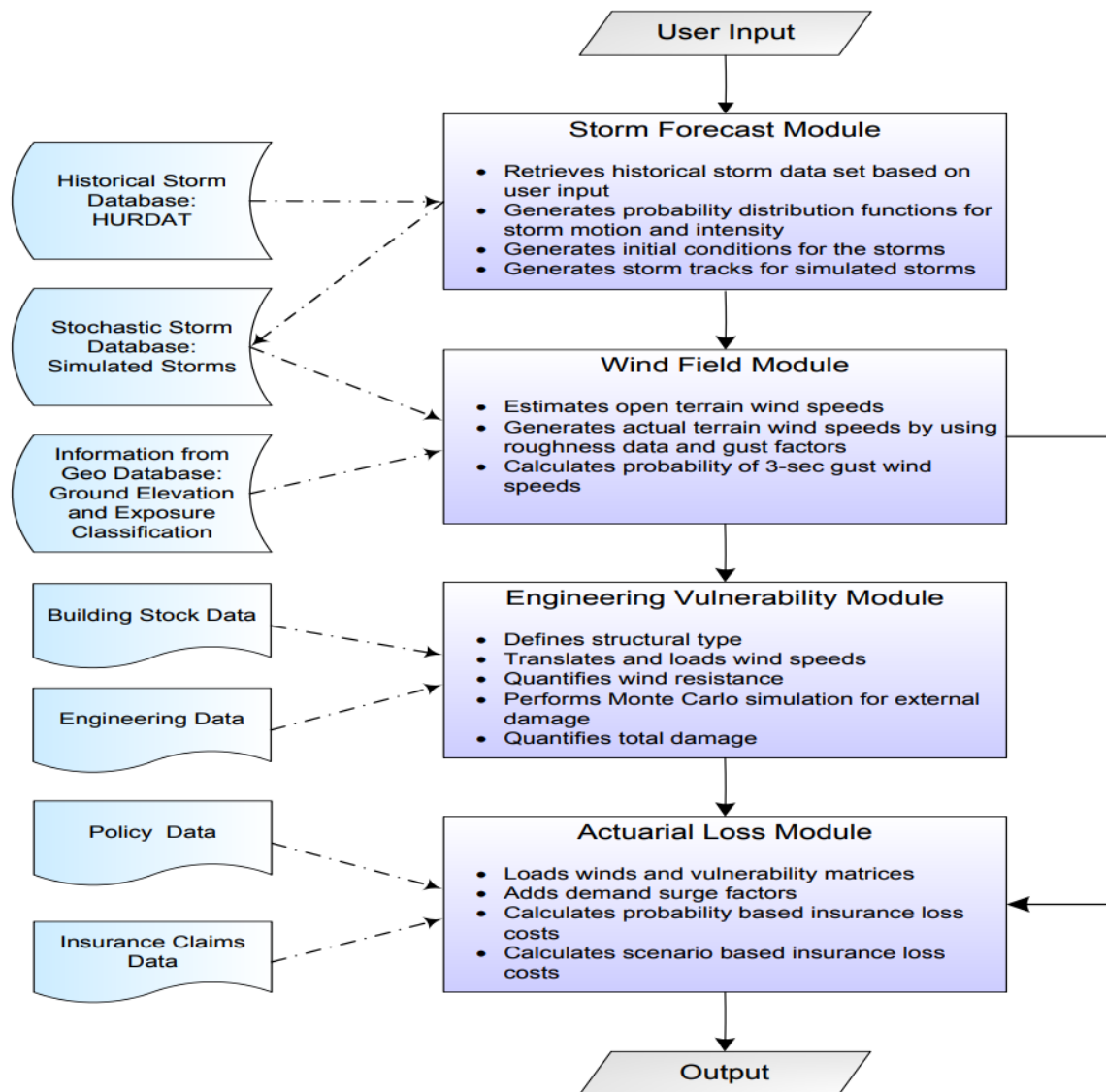


Fuente: ERN (2009)

El modelo FPHLM<sup>14</sup> (Florida Public Hurricane Loss Model) Version 6.2, se desarrolló en torno a un proyecto para evaluar pérdidas en propiedades privadas y comerciales, financiado por FL-Office of Insurance Regulation, actualmente es operado por la Universidad Internacional de Florida, con el apoyo de otras cuatro universidades del estado y con la División de Investigaciones de Huracanes de la NOAA.

<sup>14</sup> <https://www4.cis.fiu.edu/hurricaneloss/index.html>

**Figura 8: Componentes de modelo Florida Public Hurricane Loss Model – FPHLM**



Fuente: FPHLM (2018)

El modelo consta de tres componentes principales: riesgo de viento (meteorología), vulnerabilidad (ingeniería) y costo de pérdida asegurada (actuarial). Tiene más de una docena de subcomponentes.

Los componentes del modelo de viento son:

- ✓ Modelo de trayectoria e intensidad de tormenta: genera las trayectorias e intensidades de los ciclones hasta la llegada a tierra para huracanes simulados en función de las condiciones iniciales históricas.
- ✓ Modelo de Decaimiento de Tormentas en el Interior: Estima el debilitamiento después de tocar tierra.
- ✓ Modelo de campo de viento: genera velocidades de viento de terreno abierto para cada uno de los códigos postales afectados por huracanes.
- ✓ Modelo de factor de ráfaga: genera velocidades máximas de ráfagas de viento para cada código postal.
- ✓ Modelo de rugosidad del terreno: corrige la velocidad del viento en terreno abierto con base en su rugosidad.
- ✓ Modelo de probabilidades de viento: Genera probabilidades de viento para cada código postal.

El modelo usa un área de amenaza definida para capturar mejor las características estadísticas de los ciclones tropicales históricos, tomando un radio de 1.000 km centrado en 26°N y 82°W, de manera que cubre toda la península y zonas aledañas. El modelo tiene la capacidad de simular estocásticamente con procesos de Markov los ciclos climáticos y la actividad de los ciclones tropicales para diferentes períodos del registro histórico usando el conjunto de datos HURDAT-IBTrACS. Cuatro opciones adicionales están disponibles para simular condiciones El Niño (menos huracanes), neutra, La Niña (más huracanes) y ciclos climáticos multidecadales. El modelo usa dos pruebas de ajustes para la distribución de frecuencia de ocurrencia anual de huracanes: el binomio negativo y el modelo de Poisson. Las pruebas de bondad de ajuste Chi-Cuadrado determinan cuales ajustes serán usados para las subsiguientes simulaciones. El modelo de viento se basa en los modelos de Holland y Vickery para calcular el viento en

superficie, el radio del viento máximo que incluyen términos de fricción, efectos de turbulencia, campo asimétrico del viento, capa superficial marina, influencias de fricción terrestre. La precisión del modelo de viento se valida mediante comparaciones con datos observados.

El modelo CatFocus<sup>15</sup> de PartnerRe para evaluar el riesgo de ciclones tropicales en las cuencas del Atlántico, Pacífico y sur del Océano Índico, consiste en modelos regionales integrados dentro de un marco coherente y está diseñado para trabajar con todos formatos de datos de exposición estándar. El modelo de viento está basado en los mejores archivos de seguimiento actualizados, otros datos meteorológicos y oceanográficos para generar simulaciones estocásticas para cientos de miles de eventos de ciclones tropicales. El modelo simula los parámetros de posición, velocidad máxima sostenida del viento) y radio del viento máximo y de ráfagas, para describir el campo de viento completo. Las simulaciones entregan los parámetros de posición e intensidad, necesarios para calcular el campo de viento de una manera que sea consistente con los registros observados. Un componente clave del modelo de campo de viento son las formas de relación entre el viento máximo y su radio máximo de acción obtenidas con técnicas avanzadas de modelado estadístico que ayudan a crear consistencia interna entre estadísticas de conjuntos de eventos observados y estocásticos. En el modelo de campo de viento se utiliza la ecuación de vórtice de Rankine modificada para aproximar la forma radial del campo de viento fuera del radio de los vientos máximos e incorpora características tales como la velocidad a la que se reduce la velocidad del viento con la distancia del ojo del ciclón, los efectos de los ciclos de la pared del ojo y cómo son modificados los vientos rotativos por la velocidad de traslación y efecto de la superficie subyacente del mar o tierra. La velocidad extrema se ajusta a través de la distribución de probabilidad para periodos de retorno de 1 en 100 años.

<sup>15</sup> [http://partnerre.com/opinions\\_research/the-catfocus-tropical-cyclone-model/](http://partnerre.com/opinions_research/the-catfocus-tropical-cyclone-model/)

Se hacen estimaciones robustas de la amenaza de viento por ciclones tropicales utilizando grandes conjuntos de eventos sintéticos a partir de datos históricos o de algoritmos basados en la física. Si bien las trayectorias y vientos de tormenta se pueden simular muy rápidamente a partir de algoritmos estadísticos o modelos dinámicos simples (como el Modelo de Beta y Advección – BAM), la estimación mediante el uso de modelos de física completa en la práctica no es comunes por ser demasiado costosas.

### 3.1.2. Marea de tormenta.

La marea de tormenta es ampliamente reconocida como uno de los efectos más destructivos relacionados con los ciclones tropicales. El objetivo es determinar la profundidad de inundación costera como la altura del agua de mar en la costa y la profundidad de inundación resultante sobre la tierra. La altura total de avance debe modelarse por el avance forzado por el viento, la aceleración barométrica y la aceleración debido a la configuración de la onda.

La marea de tormenta asociada con eventos ciclónicos se evalúa partir de los mismos conjuntos históricos y simulados de usados en la evaluación de la amenaza por vientos fuertes. La amenaza de marea de tormenta debe modelarse en términos de la distribución geográfica de la profundidad de inundación costera.

#### *Experiencias*

El Modelo de Riesgo Global determina la altura de subida del agua de mar en la línea de costa como consecuencia del estrés tangencial ejercido por los fuertes vientos y la baja presión atmosférica. La altura de avance total en una ubicación costera se modela como compuesta por dos partes, una por el aumento de la altura forzada por el viento, y la otra por el aumento barométrico. La marea astronómica no se considera en el análisis dada la naturaleza global de esta evaluación de riesgos. Para determinar la sobre elevación forzada por el viento,



utiliza un modelo simple pero muy robusto para la predicción del nivel del mar costero basado en la surgencia costera por transporte de Ekman. El aumento barométrico se incluye en un modelo simple aplicando el efecto barométrico inverso y considerando el ajuste completo, es decir, una disminución en la presión barométrica de 1 mb corresponde a un aumento en el nivel del mar de 0.01 m. La amenaza de marea de tormenta se modela en términos de la distribución geográfica de la altura, similar al caso del campo de viento. Por cada ciclón histórico se calculan cien alturas de inundación por marea de tormenta, cada una correspondiente a una simulación de la trayectoria histórica. Con el conjunto de inundaciones calcula para cada ubicación el valor esperado y la varianza de la altura de la inundación, que representa respectivamente el primer momento natural y el segundo momento central de una distribución de probabilidad Gamma que define la naturaleza aleatoria de la altura.

En análisis de amenaza, los campos de viento y presión son usados para la simulación de mareas de tormenta conducir la tormenta. Se ha visto que si se usa una alta resolución numérica de grilla se puede capturar mejor la variación espacial de las características de la marea de tormenta. Los modelos SLOSH y ADCIRC son ampliamente utilizados para el cálculo de marea de tormenta.

El modelo SLOSH (Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes) fue desarrollado por Techniques Development Laboratory of the National Weather Service (Jelesnianski *et al.*, 1992). Es un modelo de dos dimensiones que representan la hidrodinámica de la marea de tormenta mediante ecuaciones de aguas someras utilizado por el Centro Nacional de Huracanes en tiempo real. La precisión de las alturas de sobreelevación del modelo es de  $\pm 20\%$  cuando el huracán está adecuadamente descrito. Puede ejecutarse hasta con una resolución espacial de aproximadamente 1 km.

ADCIRC es un modelo de circulación avanzada, fue desarrollado como un proyecto conjunto entre USACE Engineering Research, el Development Center de

la Universidad de Notre Dame y la Universidad de Carolina del Norte – Chapel Hill (Luettich *et al.*, 1992), describe completamente el complejo proceso físico asociado con marea ciclónica y también puede simular mareas astronómica y olas de viento.

Para el Atlas Nacional de Riesgos de México<sup>16</sup>, utilizaron el método simplificado de CENAPRE (Guía para la Elaboración de Mapas de Riesgo por Inundaciones Costeras por Marea de Tormenta). Determina las amenazas por inundación de marea de tormenta o marejada con base en relaciones obtenidas con los vientos máximos sostenidos, el radio máximo de vientos, la presión central ciclónica, la velocidad de desplazamiento y latitud de centro del ciclón tropical.

### 3.2. Estimación de la exposición.

Los valores de los elementos en riesgo o exposición de bienes se pueden estiman a partir de fuentes de información secundaria, ya sea de bases de datos existentes, o derivados por medio de procedimientos simplificados basados en información social y macro económica general, como densidad poblacional, estadísticas de construcción o información particular más específica, que ayude crear una base de datos de exposición, construida de manera geo-referenciada. Cuando la información específica activo por activo no se encuentra disponible, se recomienda el uso de modelos simplificados de exposición (CAPRA, 2009).

#### *Experiencias*

El Modelo de Riesgo Global construyó una base de datos de exposición a nivel mundial GED (Global Exposure Database) para llevar a cabo una evaluación probabilista del riesgo a nivel de país, pero con una resolución de información de georreferenciada a nivel de áreas urbanas (grupos de pixeles de 5 km x 5 km aproximadamente) a las cuales le asociaron registros que representan las

<sup>16</sup> <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>

edificaciones de cada lugar considerando diferentes tipos estructurales y agrupaciones. Adicionalmente, su clasificación permite obtener resultados teniendo en cuenta el interés de los gobiernos. Es decir, no sólo se establece una estimación proxy del portafolio total de bienes o activos tanto del sector público como privado, sino del portafolio de responsabilidad fiscal del gobierno, que incluye los bienes fiscales como los estratos de bajos ingresos de la población que serían objeto del apoyo del gobierno en caso de desastre.

Este modelo de exposición para la evaluación del riesgo a nivel de país refleja la presencia de los siguientes grupos de edificaciones (CIMNE *et al.*, 2012):

- ✓ Construcciones residenciales de la población de estratos socioeconómicos bajo, medio-bajo, medio-alto y alto.
- ✓ Construcciones del sector educativo (públicas y privadas).
- ✓ Construcciones del sector salud (públicas y privadas).
- ✓ Construcciones comerciales.
- ✓ Construcciones industriales.
- ✓ Construcciones del gobierno central.

Para cada agrupación o sector la desagregación de los componentes expuestos está según las características que permitan representar su vulnerabilidad física (a través de una función de daño) ante eventos naturales que puedan afectarlos, por tanto la información mínima necesaria para cada componente o elemento expuesto es la siguiente:

- ✓ Identificador
- ✓ Ubicación geográfica (latitud, longitud)
- ✓ Valor económico del componente físico (catastral, comercial, de reposición, entre otros.)
- ✓ Ocupación (habitantes)
- ✓ Tipo constructivo (vulnerabilidad)

GDE se basa en la estimación del número de personas que habitan en edificaciones de un tipo constructivo particular de cada una de las agrupaciones o sectores. El número de personas por tipo constructivo y sector en cada ubicación geográfica se convierte en un indicador de exposición y se utiliza como base para distribuir el valor económico expuesto como se explica más adelante. Para considerar la vulnerabilidad de los diferentes elementos expuestos de cada sector ante las amenazas naturales, cada componente o activo es agrupado de acuerdo con el tipo constructivo al que pertenece. Adicionalmente y con el fin de establecer una referencia que permita la comparación entre países y a la vez contar con valores económicos que representen el nivel de desarrollo y el capital real del país, se utiliza como valor económico físico expuesto, el stock de capital urbano descontando el valor del terreno. Para el efecto se utilizó el informe “Where is the wealth of nations” del Banco Mundial (2006). Este monto representa el valor la infraestructura, maquinaria y equipo del país. Dicho valor se distribuye entre los componentes considerados en la GED en forma proporcional al número de personas y otros factores relevantes, como se explica más adelante.

La GED se construyó fundamentalmente con base en indicadores nacionales. La distribución de tipos estructurales se realizó de acuerdo con la población que habita en cada uno de ellos y no de acuerdo al número de edificaciones de cada uno de los tipos constructivos. Se utilizó la fuerza laboral, el nivel de ingreso, los servicios de salud y educación para la estimación a nivel subnacional de las características de las edificaciones de acuerdo con los niveles de complejidad de cada área urbana o asentamiento. El valor expuesto total de cada país corresponde al stock de capital físico distribuido a nivel subnacional de acuerdo con la distribución de población y de acuerdo con la distribución del Producto Interno Bruto, PIB del país. Este indicador da cuenta, según su cobertura al interior del país, del valor de la infraestructura de servicios públicos, transporte y otros que no son elementos expuestos que se intentan incluir en el presente modelo de exposición. La distribución geográfica de la población corresponde a la

cobertura ofrecida por LandScan (ORNL, 2012) con una resolución de 1km (30"x30"). Las máscaras urbanas para delimitar las áreas urbanizadas se refinaron mediante el uso del conjunto de datos BUREF, desarrollado por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea. Este conjunto de datos fue generado con LandScan (2010) y MODIS (2006). La rejilla de referencia de 5x5 Km de GED 2015 incluye toda la superficie terrestre de la Tierra, incluyendo áreas de tierra deshabitada. El número total de celdas de la grilla es de 9,008,829, con 4,574,010 celdas inhabitadas.

El modelo FPHLM usa modelos de simulación de ingeniería que tiene en cuenta cada tipo de construcción, todos los posibles daños del viento a la estructura, el interior, los contenidos, la estructura de la instalación. Con base en "1998 Florida Hurricane Catastrophe Fund Industry Data Guide" se clasifican los tipos de construcción utilizados para caracterizar las estructuras de cada propiedad, completada con la fuente de datos HAZUS, que contiene principalmente datos sobre el techo tipos y altura de las estructuras, datos de la encuesta de vivienda American Housing Survey (AHS) y además se utilizan los códigos postales, para una cobertura de 51 condados y 97% de la población de Florida.

El modelo CatFocus ha desarrollado metodologías de modelado que respaldan el procesamiento de todas las principales normas de la industria datos formatos, incluso una robusta y avanzada metodología para la agregación de datos, en consideración a que requieren ser desglosados en función de un conjunto de pesos espaciales derivados de los últimos datos de población y uso del suelo. Cuanto más detallado esté disponible los datos de exposición en términos de características de riesgo y cuanto mayor sea la resolución geográfica de zonas de agregación, menos suposiciones se hacen. Los siguientes parámetros clave de exposición usa el modelo de ciclón tropical: ubicación (coordenadas geográficas), características de riesgo (por ejemplo, ocupación,

construcción material y código de diseño), valor cubierto (suma asegurada), estructura de seguros y reaseguros (como deducibles y límites).

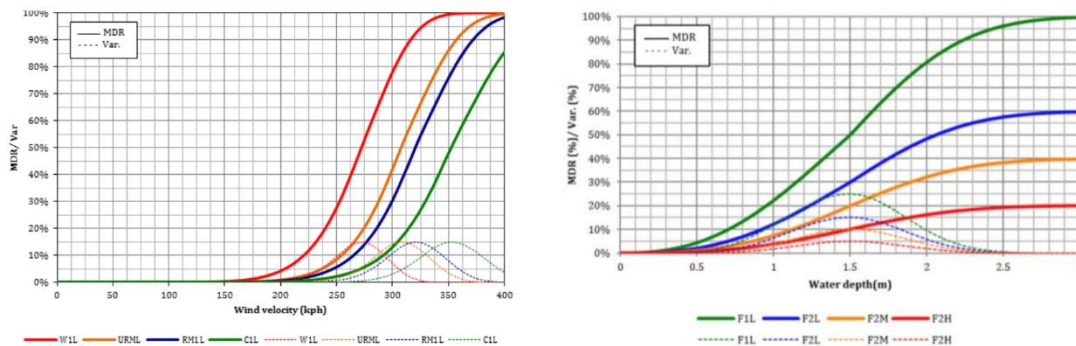
### 3.3. Estimación de Vulnerabilidad.

La pérdida generalmente se entiende como la pérdida relativa al valor de reposición de la exposición elemento. En general, un elemento expuesto es cualquier objeto que sea susceptible de sufrir daños o pérdidas debido a la ocurrencia de un evento peligroso. Una vez que todos los elementos expuestos se identifican en un territorio, es necesario asignar a cada uno de ellos al menos un valor de reemplazo económico y una definición de su vulnerabilidad identificando una clase de construcción.

La susceptibilidad al daño de todos los activos expuestos a los riesgos naturales considerados se modela a través de funciones de vulnerabilidad, que caracterizan el comportamiento de los elementos que pertenecen a un específico clase de construcción durante la ocurrencia de un evento de peligro. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de la pérdida en función de la intensidad producida para un escenario específico.

Los modelos de vulnerabilidad trabajan en función de uno o más parámetros de demanda. En la mayoría de los casos, para los modelos de los ciclones tropicales se utiliza un único parámetro de demanda, como la velocidad máxima del viento o la profundidad máxima de inundación por marea de tormenta y con funciones matemáticas se relacionan con el impacto físico directo. La pérdida media frente a la demanda puede denominarse curva de vulnerabilidad, curva de daño, función de pérdida o cualquier combinación de estos términos. La Figura 9 presenta un ejemplo de funciones de vulnerabilidad de viento y sobre elevación de la marea de tormenta, donde el daño esperado está en función de la velocidad pico del viento y la altura del agua para cada clase de construcción.

**Figura 9: Funciones de vulnerabilidad de viento (izquierda) y marea de tormenta (derecha)**



Fuente: CIMNE & INGENIAR (2015)

Estas funciones de vulnerabilidad se asignan con base en funciones disponibles para componentes similares de estudios específicos y se asignan puramente con carácter indicativo. En caso de realizar evaluaciones para zonas específicas o para un sistema en particular se hace necesario la realización de estudios específicos para la asignación de funciones que correspondan al comportamiento esperado del sistema que se desee analizar (CAPRA, 2009).

### *Experiencias*

El Modelo de Riesgo Global, usa funciones de vulnerabilidad para viento y marea de tormenta causado por ciclones que permiten estimar la relación media de daño, en función de la velocidad máxima de viento sostenida en 5 segundos a una altura de referencia de 10 m desde la superficie del terreno y para una rugosidad del terreno baja, adoptadas de las funciones de vulnerabilidad tomadas del HAZUS-MH System (FEMA, 2011).

El modelo FPHLM usa cuatro componentes en su modelo de vulnerabilidad:  
(1) modelos de simulación de ingeniería: simula para cada tipo de construcción,

todos los posibles daños del viento a la estructura, el interior, los contenidos, la estructura de la instalación y el modelo ALE, (2) modelo de daño de ingeniería: genera matrices de daños para cada tipo de construcción. Produce proporciones de daños para la estructura, los contenidos, la estructura adjunta y modelo ALE y (3) modelo de mitigación de ingeniería: genera funciones de vulnerabilidad (matrices de daños) para estructuras mitigadas (por ejemplo, con contraventanas, extremos de hastial reforzados, techo a la cadera, correas de pared a techo, etc.).

El modelo CatFocus dispone de relaciones de daños de todos los riesgos ubicados para cualquier sitio específico, determinadas en función de las velocidades del viento modeladas. La clase de ocupación, la calidad de la edificación, el tipo de construcción, y la cobertura se usan para identificar las funciones de vulnerabilidad relevantes que definen el daño promedio para una velocidad de viento dada como porcentaje del valor total de la tierra.



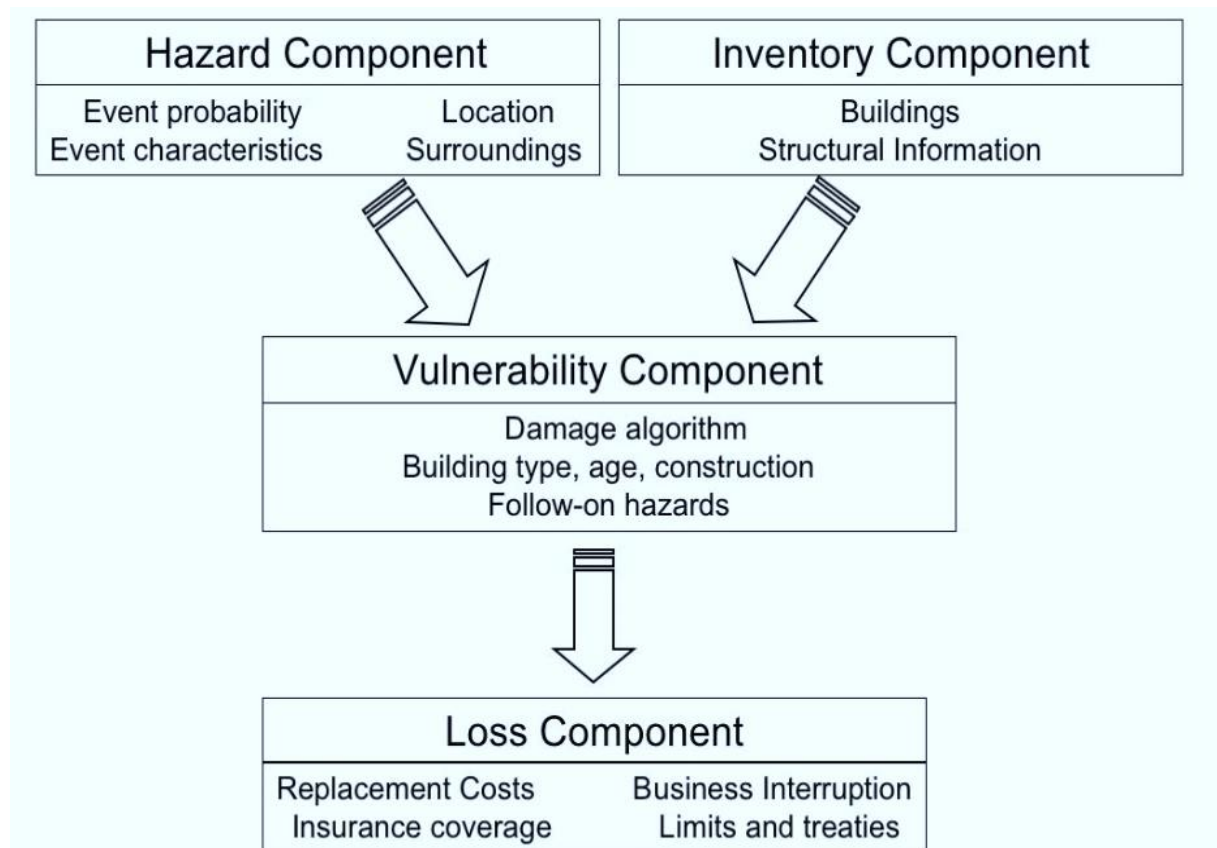
## 4. Estimación y Cálculo de Riesgo.

### 4.1. Riesgo probabilístico.

El propósito de una evaluación de riesgo probabilístico es caracterizar y cuantificar las pérdidas en un conjunto de elementos expuestos, dada la ocurrencia de eventos peligrosos (Figura 10).

Se fundamenta en determinar las funciones de densidad de probabilidad de pérdida en cada uno de los eventos de amenaza, para diferentes niveles de intensidad, estimando dicha pérdida en cada uno de los elementos expuestos por los eventos estocásticos incluidos en el conjunto con que se representan cada una de las amenazas (Bernal, Villegas, & Cardona, 2015).

**Figura 10: Modelo general de riesgo**



Fuente: WMO IWTC-VII 4.1 Risk Assessment

El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la llamada curva de excedencia de pérdidas (loss exceedance curve) que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia.

También se utilizan estimadores de riesgo que permitan expresarlo con un solo número. Entre los más comunes se encuentran pérdida anual esperada y la pérdida máxima probable. En la **Referencia**, se muestran las características de experiencias en el modelamiento del riesgo de ciclones tropicales.

**Tabla 4: Descripción general de algunos datos y métodos utilizados para modelar el riesgo de ciclón tropical**

Datos	Método	Tratamiento
Datos históricos IBTrACS, simulaciones estocásticas de ciclones, catálogo de ciclones tropicales futuros NCAR, rugosidad WMO 210 para 7 clases de terreno, áreas urbanas SEDAC, batimetría GEBCO_08, topografía SRTM 90m, Global Exposure Database (GED), Curvas HAZUS	Global Risk Model (GRM)	Modelo de riesgos / métricas actuariales
Datos históricos HURDAT-IBTrACS, simulaciones estocásticas de ciclones, LANDSAT (50 m), Códigos postales, Curvas HAZUS	The Florida Public Hurricane Loss Model Version 6.2	Modelo de riesgos / métricas actuariales
Datos históricos IBTrACS, datos meteorológicos y oceanográficos, funciones de vulnerabilidad	CatFocus de PartnerRe	Modelo de riesgos / métricas actuariales
Datos fisiográficos, aumento del nivel del mar y datos de uso del suelo	Modelo matemático simulación numérica	Modelado de riesgos / periodos de retorno
Datos de campo históricos de ciclones tropicales	Modelos de predicción retrospectiva (hindcasting models) del viento	Modelado de riesgos / riesgos / periodos de retorno
Datos históricos sobre ciclones tropicales	Modelo de riesgo de ciclones tropicales (Tropical Cyclone Risk Model - TCRM)	Modelado de riesgos / índices de daños
Datos históricos sobre ciclones tropicales	Modelo de marea de tormenta SLOSH	Modelado de riesgos / probabilidad mareas ciclónicas
Datos históricos sobre ciclones tropicales	Modelo de marea de tormenta basado en técnicas SIG y teledetección	Modelado de riesgos / probabilidad mareas ciclónicas
Parámetros históricos de huracán	Modelo de marea de tormenta basado en CH3D-SSMS	Modelado de riesgos / periodos de retorno
Datos ciclónicos, datos SRTM 3	Modelo de oleaje basado en el viento	Modelado marea de tormenta / periodos de retorno
Imágenes Ikonos, DEM datos espaciales y de campo	Basado en un índice de evaluación de ciclón	Mapeo de riesgo para periodos de retorno en 100 años

## 4.2. Riesgo usando teledetección y análisis espacial.

Los métodos para la evaluación de riesgos se centran principalmente en el tipo de datos espaciales, componentes y criterios de riesgo, procesamiento multicriterio, ecuación de riesgo, escala de estudio y validación. Los investigadores utilizan una amplia gama de conjuntos de datos espaciales para la evaluación de riesgos de ciclones tropicales. Teledetección y datos de campo se combinan en muchos de los estudios.

Los datos de campo se usan para generar diferentes capas de criterios de los componentes riesgos, entre ellos se incluye la precipitación, trayectoria de ciclones, velocidad del viento, aumento del nivel del mar y población.

La mayoría de los datos de teledetección son usados en forma de imágenes ópticas y DEM. Los datos ópticos se usan para derivar información sobre el uso y la cobertura del suelo, así como erosión costera. Los datos DEM se usan para generar elevación, pendiente, altura de la marejada ciclónica, entre otros. A pesar de que los datos de LIDAR pueden proporcionar información precisa, su uso es limitado.

Muchas técnicas y una amplia gama de sensores remotos y datos espaciales como criterios de evaluación han sido utilizados para mapear el riesgo ciclónico tropical. Los problemas fundamentales en la evaluación del riesgo de ciclones están en la selección de los componentes de la ecuación de riesgo y su procesamiento. En general, hay cuatro componentes de riesgo: amenaza, vulnerabilidad, exposición y mitigación, que se utilizan en un procedimiento de evaluación de riesgos efectivo. La mayoría de los trabajos se centran en estudios de vulnerabilidad, seguidos por los de riesgo, exposición y capacidad mitigación (Hoque et al., 2017). Para una evaluación real y precisa de riesgo se deben

seleccionar criterios suficientes de cada una de los componentes de riesgo y evaluar el peso que debe tener cada uno de ellos, así como la escala espacial a usar. La validación de los resultados es muy importante para aumentar la confiabilidad y confianza en los procesos previos a la toma de decisiones.

La identificación de escenarios realistas de riesgo por ciclones tropicales para el futuro se logra mediante el modelado del riesgo de ciclones tropicales. El conjunto de datos espaciales para este propósito se puede clasificar datos de teledetección y datos de campo derivado de fuentes primarias y secundarias. Datos del terreno en el contexto de DEM son vitales para la modelización de mareas de tempestad basadas en SIG. Se usan modelos hidrodinámicos avanzados como el modelo Overland Surges from Hurricanes - SLOSH o procesamientos simples basados en SIG.

#### 4.2.1. Ecuaciones de riesgo.

El riesgo se considera como la probabilidad de daño esperado por un peligro particular (Li & Li 2013; Dewan 2013). La ecuación de evaluación de riesgos más comúnmente utilizada es:

$$\text{Riesgo} = \text{vulnerabilidad} * \text{amenaza} \text{ (3)}$$

donde, la vulnerabilidad es la medida en que una comunidad y el medio ambiente es probable que se vean afectados por una amenaza particular. La amenaza es un evento que puede afectar la vida, la propiedad y el medio ambiente.

Varios estudios (Rafiq *et al.*, 2010; Dewan, 2013; Khalid & Babb 2008) utilizaron esta ecuación para la evaluación del riesgo de ciclones tropicales. Esta ecuación ha sido modificada para producir resultados más confiables, incorporando

la capacidad de mitigación en el procedimiento efectivo de evaluación de riesgos. La ecuación modificada por Bobby (2012) y Li & Li (2013) queda:

$$Riesgo = \frac{vulnerabilidad \cdot amenaza}{capacidad de mitigación} \quad (4)$$

Algunos estudios revelan que es crítico valorar la exposición con la vulnerabilidad para la evaluación de riesgos (Poompavai & Ramalingam 2013; Rafiq et al., 2010). La ecuación final por lo tanto queda.

$$Riesgo = \frac{vulnerabilidad \cdot exposición \cdot amenaza}{capacidad de mitigación} \quad (5)$$

#### 4.2.2. Criterios y selección de escala.

La selección de criterios y escala apropiados son una parte crítica de los enfoques de evaluación de riesgos ciclónicos. La generación de información detallada, precisa y confiable depende de la selección adecuada de los criterios, la calidad de los datos y sus técnicas de procesamiento (Dewan, 2013). Del mismo modo, el tamaño del área de estudio también juega un papel importante en la obtención de información detallada, la cual puede ayudar a identificar opciones de mitigación adecuadas e implementar planes apropiados para reducir los impactos de los ciclones tropicales a nivel local. La mayoría de los estudios sobre la evaluación del riesgo de ciclones tropicales utilizando teledetección y análisis espacial se realiza a escala regional, cubriendo áreas mayores a 1.000 km<sup>2</sup> con criterios muy limitados (Li & Li 2013; Rafiq et al., 2010; Khalid y Babb, 2008). Estos estudios muestran que los criterios limitados y un sitio de estudio grande (> 1.000 km<sup>2</sup>) afectan la fiabilidad y precisión de la información de riesgos. Además, los estudios que usaron DEM a 30 m de resolución como criterios de evaluación en el procedimiento de evaluación de riesgos proporcionaron resultados más precisos en comparación con los que utilizaron DEM de resolución más gruesa (Yin *et al.*, 2013).

### 4.2.3. Toma de decisiones multicriterio.

Se utilizan varios criterios en el procedimiento de evaluación de riesgos efectivo y requieren su ponderación en el contexto del análisis de toma de decisiones. El análisis de decisión multicriterio es un enfoque adecuado para analizar y ponderar los criterios particulares en el proceso de evaluación de riesgo de ciclón.

El proceso de jerarquía analítica, la teoría de atributos múltiples y el ranking superior son los métodos más comunes en este enfoque.

Proceso de jerarquía analítica (AHP): es una herramienta eficaz para analizar los criterios múltiples para respaldar el proceso de toma de decisiones. Este método es más popular para la ponderación multicriterio. Yin *et al.* (2013) examinaron la evaluación de riesgo compuesta de un tifón en la zona costera de China utilizando datos de análisis espaciales y de teledetección integrando diversos datos relevantes de criterios. Los resultados confirman una evaluación de riesgos más confiable y realista.

- Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT): es un método avanzado para ponderar los criterios en la toma de decisiones. Utiliza puntajes numéricos basados en diferentes opciones en una sola escala. En este método, todos los criterios divergentes se transforman en una sola escala 0-1 a través de funciones de valor de utilidad para llevar a cabo la decisión general. El juicio de las partes interesadas tiene más prioridad en esta técnica, ya que se supone que son más racionales y conocedores en sus juicios. La aplicación de esta técnica para la evaluación del riesgo de ciclón en la literatura actual es todavía escasa.

#### 4.2.4. Modelación de riesgos.

La modelación de riesgos proporciona un escenario de riesgo realista para el futuro. Incluye el nivel de riesgo con la ubicación espacial, la infraestructura clave y las áreas en riesgo, los factores responsables del riesgo y las probables estrategias de mitigación. La precisión del modelo de riesgo depende de la precisión del DEM, su escala, la calidad de los datos y sus técnicas de procesamiento (Zerger, 2002)

Varios tipos de técnicas de modelado se incorporan durante el modelado de riesgo de desastre ciclónico. Algunos de ellos se basan en software de modelado completamente avanzado y otros en un simple procesamiento basado en GIS.

## Bibliografía

- AOML-NOAA. (5 de 05 de 2018). *Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML) - Hurricane Research Division (HRD)-NOAA*. Obtenido de [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A8\\_esp.html](http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A8_esp.html)
- Bernal, G., Villegas, C., & Cardona, O. (2015). *Probabilistic Risk Assessment of Tropical Cyclones: National Disaster Risk Profile*. INGENIAR-National University of Colombia, Manizales) & Jonnathan Vigh (NOAA).
- Bernal., G. (2014). *CAPRA Team TCHM. Tropical Cyclones Hazard Modeler. Part of the CAPRA Team Software Suite for natural hazards and risk assessment*.
- Blanchard, B. H. (2005). On the radial variation of the tangential wind speed outside the radius of maximum wind during hurricane Wilma (2005). *Louisiana: Coastal Studies Institue, Louisiana State University*. 1–11.
- Bobby, S. (2012). Disaster Risk Index (DRI) for Tropical Cyclone of Bangladesh. *In: International Journal of Engineering Research and Technology, 2012. vol 3 (May-2012). ESRSA Publications*, 1-6.
- Brooks, N. (2003). Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. *Tyndall Centre Clim. Change Res. Working Pap.*, 38, 1–16.
- CAPRA. (2009). *TOMO I: METODOLOGÍA DE MODELACIÓN PROBABILISTA DE RIESGOS NATURALES. INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T1-1. COMPONENTES PRINCIPALES DEL ANÁLISIS DE RIESGO*. Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales -América Latina - Consultores en Riesgos y Desastres.
- CENAPRED. (2014). *IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE RIESGO POR INUNDACIONES COSTERAS POR MAREA DE TORMENTA: CASO ISLA ARENA, MUNICIPIO DE CALKINÍ, CAMPECHE*. Mexico.
- CIMNE & INGENIAR. (2015). *UPDATE ON THE PROBABILISTIC MODELLING OF NATURAL RISKS AT GLOBAL LEVEL: GLOBAL RISK MODEL. BACKGROUND PAPER. Prepared for the Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015* . International Center for Numerical Methods in Engineering and INGENIAR Ltda.
- CIMNE, I. S. (2012). *Probabilistic modelling of natural risks at the global level: Global Risk Model. Background paper for the GAR13*.
- Cochran, L. (2000). Wind engineering as related to tropical cyclones. *C.p.p.'s technical publications*.



- Darling, R. (1991). Estimating probabilities of hurricane wind speeds using a large-scale empirical model. *J. Climate*, 4, 1035-1046.
- Dewan, A. (2013). Hazards, Risk, and Vulnerability Floods in a Megacity. *Springer*, 35–74.
- Emanuel, K. (2003). Tropical cyclones. . *Annu.Rev. Earth Planet. Sci.*,31, 75-104.
- ERN. (2009). *Informe Técnico ERNCAPRA-T1-3: Modelos de evaluación de amenazas naturales y selección.*
- FEMA. (2011). *HAZUS-MH MR3. Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Hurricane Model.* Federal Emergency Management Agency .
- Frazier, T. W. ( 2010). Influence of potential sea level rise on societal vulnerability to hurricane storm-surge hazards. *Appl. Geogr.* 30 (4), 490e505.
- Fuentes M., Ó. A. (2006). *Elaboración de mapas de riesgo por inundaciones costeras por marea de tormenta [Book Section] // Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos.[s.l.] : CENAPRED - Primera edición.*
- Harper, B. (2002). Estimación de parámetros de ciclones tropicales en la región australiana: relaciones viento-presión y cuestiones relacionadas para la planificación y el diseño de ingeniería. . *Bridgeman Downs, Australia: Systems Engineering Australia Pty.*
- Ho, F. P. (1987). Hurricane climatology for the Atlantic and Gulf Coasts of the United States. . *NOAA Tech. Rep. NWS 38, U.S. Department of Commerce, Washington, DC*, 195.
- Holland, G. (1980). An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *MonWea. Rev.*, 108, 1212-1218.
- Holland, G. (2008). A Revised Hurricane Pressure-Wind Model. . *Mon Wea Rev* , 136, 3432–3445.
- Hoque, M. A. (2017). A systematic review of tropical cyclone disaster management research. *Ocean and Coastal Management*, 146, 109-120.
- Hoque, M. A. (2017). Tropical cyclone disaster management using remote sensing and spatial analysis: A review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.  
*doi:10.1016/j.ijdr.2017.02.008.*
- IDEAM. (2010). *AMENAZAS COSTERAS.* Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- IMúllix. (30 de 04 de 2018). *Temporada de huracanes 2016 y los radares doppler meteorológicos.* Obtenido de <http://imullix.blogspot.com.co/2016/06/temporada-de-huracanes-2016-y-los.html>

- IPCC. (2012). *Gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jelesnianski, C. P. (1992). *SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricane Phenomena*. Silver Spring, MD: National Weather Service: NOAA Technical Report NWS 48.
- Jiménez, M. e. (2012). *Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos*. CENAPRED.
- Khalid F, B. R. (2008). Hazard and Risk Assessment from Hurricane Ivan (2004) in Grenada using Geographical Information Systems and Remote Sensing. *Journal of Maps* 4, 4-10.
- Khan, M. (2008). Disaster preparedness for sustainable development in Bangladesh. . *Disaster Prev. Manag.* 17 (5), 662e671.
- Klemas, V. (2009). The role of remote sensing in predicting and determining coastal storm impacts. *J. Coast. Res.* , 1264e1275.
- Knapp, K. R. (2010). The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone data. . *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 363–376.
- Kruk, M. (2010). A technique for merging global tropical cyclone best track data2. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 680-69.
- Kruk, M. C. (2010). A technique for merging global tropical cyclone best track data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 680-692.
- Landsea, C. W. (2013). Atlantic hurricane database uncertainty and presentation of a new database format. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 3576-3592.
- Levinson, D. H. (2010). Toward a homogenous global tropical cyclone best track dataset. . *Bulletin of the American Meteorological Society*, , 91 , 377-380.
- Li, K. L. (2013). Risk assessment on storm surges in the coastal area of Guangdong Province . *Nat. Hazards* 68, 1129e1139.
- Lin, N. E. (2010). Risk assessment of hurricane storm surge for New York City. *J. Geophys. Res. Atmos.* (1984e2012) 115 (D18), 1-11.
- Luetlich, R. J. (1992). *ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL*,

- Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6*. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station.
- Mahendra, R. M. (2011). Assessment and management of coastal multi-hazard vulnerability along the Cuddalore Villupuram, east coast of India using geospatial techniques. *Ocean Coast. Manag.* 54 (4), 302e311.
- Middlemann, M. H. (2007). *Natural hazards in Australia: identifying risk analysis requirements*. Geoscience Australia.
- OEA. (1993). *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*. Washington, D.C.: Organización de los Estados Americanos. <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/begin.htm#Contents>. Obtenido de Capitulo 12. Peligros de huracanes: <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/ch17.htm>
- Powell, M. e. (2005). State of Florida Hurricane Loss Projection Model: Atmospheric science component. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 93, 651–674.
- Puotinen, M. (2007). Modelling the risk of cyclone wave damage to coral reefs using GIS: a case study of the Great Barrier Reef, 1969–2003. . *Int J Geogr Inf Sci* 21, 97-120.
- Rafiq L, B. T. (2010). Application of Satellite Derived Information for Disaster Risk Reduction; Vulnerability Assessment for SW-Coast of Pakistan. In: *Michel U, Civco DL (eds) Earth Resources and Environmental Remote Sensing-Gis Applications, vol 7831. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*.
- Schwerdt, R. W. (1979). Meteorological criteria for standard project hurricane and probable maximum hurricane wind fields, Gulf and East Coasts of the United States. . *NOAA Tech. Rep. NWS 23, U.S. Department of Commerce, Washington, DC.* , 317.
- UNDRO. (1979). *Natural disasters and vulnerability analysis*. Ginebra : United Nations Disaster Relief Organization.
- UNGRD. (2016). *Caracterización Escenario – Ciclones Tropicales*. Bogotá- Colombia.
- UNISDR . (2015). *Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión del riesgo de desastres. Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres*. Ginebra, Suiza: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR).
- USACE. (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM)*. Washington: U. S. Army Corps of Engineers.
- Vickery, P. P. (2000). Hurricane wind field model for use in hurricane simulations. *Journal of structural engineering*, 10, 1203-1221.

- Wang Y, R. D. (2012). Joint distribution model for prediction of hurricane wind speed and size. .  
*Struct Saf*, 35, 40–51.
- WMO. (2017). *Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting*. Geneva, Switzerland.: WMO-No.  
1194.
- Yin, J. Y. (2013). Composite risk assessment of typhoon-induced disaster for China’s coastal area.  
*Nat Hazards* 69, 1423-1434.
- Zerger, A. (2002). Examining GIS decision utility for natural hazard risk modelling. *Environmental  
Modelling & Software* 17, 287-294.



**UNIDAD NACIONAL PARA LA GESTIÓN DE RIESGO DE DESASTRES**

**Avenida calle 26 # 92 + 32, piso 2 – Edificio Gold 4**

**PBX: + 57(1) 552 9696 – 01 8000 11 32 00**

**[www.gestiondelriesgo.gov.co](http://www.gestiondelriesgo.gov.co)**

---