

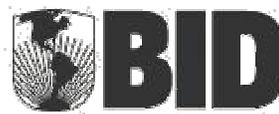
# **CAPRA**

**CENTRAL AMERICA PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT**  
**EVALUACIÓN PROBABILISTA DE RIESGOS EN CENTRO AMÉRICA**

## **EL SALVADOR**

**TAREA III**  
**EVALUACIÓN DEL RIESGO DE DESASTRE**

**INFORME TÉCNICO SUBTAREA 3.2**  
**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PROBABILISTA**  
**DEL RIESGO**





**Evaluación de Riesgos Naturales**  
**- América Latina -**  
Consultores en Riesgos y Desastres

**Consortio conformado por:**

**Colombia**

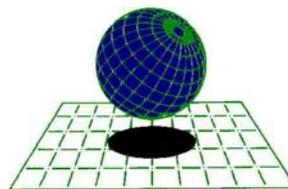
Carrera 19A # 84-14 Of 504  
Edificio Torrenova  
Tel. 57-1-691-6113  
Fax 57-1-691-6102  
Bogotá, D.C.



INGENIERIA TECNICA Y CIENTIFICA LTDA

**España**

Centro Internacional de Métodos Numéricos  
en Ingeniería - CIMNE  
Campus Nord UPC  
Tel. 34-93-401-64-96  
Fax 34-93-401-10-48  
Barcelona



**C I M N E**

**México**

Vito Alessio Robles No. 179  
Col. Hacienda de Guadalupe Chimalistac  
C.P.01050 Delegación Álvaro Obregón  
Tel. 55-5-616-8161  
Fax 55-5-616-8162  
México, D.F.



ERN Ingenieros Consultores, S. C.

**ERN** Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina  
[www.ern-la.com](http://www.ern-la.com)

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico – Consorcio ERN América Latina

---

**Omar Darío Cardona A.**  
Dirección General del Proyecto

**Luis Eduardo Yamín L.**  
Dirección Técnica ERN (COL)

**Gabriel Andrés Bernal G.**  
Coordinación General ERN (COL)

**Mario Gustavo Ordaz S.**  
Dirección Técnica ERN (MEX)

**Eduardo Reinoso A.**  
Coordinación General ERN (MEX)

**Alex Horia Barbat B.**  
Dirección Técnica CIMNE (ESP)

**Martha Liliana Carreño T.**  
Coordinación General CIMNE (ESP)

Especialistas y Asesores – Grupos de Trabajo

---

**Julián Tristancho**  
Especialista ERN (COL)

**Miguel Genaro Mora C.**  
Especialista ERN (COL)

**César Augusto Velásquez V.**  
Especialista ERN (COL)

**Karina Santamaría D.**  
Especialista ERN (COL)

**Mauricio Cardona O.**  
Especialista ERN (COL)

**Sergio Enrique Forero A.**  
Especialista ERN (COL)

**Mario Andrés Salgado G.**  
Asistente Técnico ERN (COL)

**Juan Pablo Forero A.**  
Asistente Técnico ERN (COL)

**Andrés Mauricio Torres C.**  
Asistente Técnico ERN (COL)

**Diana Marcela González C.**  
Asistente Técnico ERN (COL)

**Carlos Eduardo Avelar F.**  
Especialista ERN (MEX)

**Benjamín Huerta G.**  
Especialista ERN (MEX)

**Mauro Pompeyo Niño L.**  
Especialista ERN (MEX)

**Isaías Martínez A.**  
Asistente Técnico ERN (MEX)

**Edgar Osuna H.**  
Asistente Técnico ERN (MEX)

**José Juan Hernández G.**  
Asistente Técnico ERN (MEX)

**Marco Torres**  
Asesor Asociado (MEX)

**Johner Venicio Correa C.**  
Asistente Técnico ERN (COL)

**Juan Miguel Galindo P.**  
Asistente Técnico ERN (COL)

**Yinsury Sodel Peña V.**  
Asistente Técnico ERN (COL)

**Mabel Cristina Marulanda F.**  
Especialista CIMNE(ESP)

**Jairo Andrés Valcárcel T.**  
Especialista CIMNE(ESP)

**Juan Pablo Londoño L.**  
Especialista CIMNE(ESP)

**René Salgueiro**  
Especialista CIMNE(ESP)

**Nieves Lantada**  
Especialista CIMNE(ESP)

**Álvaro Martín Moreno R.**  
Asesor Asociado (COL)

**Mario Díaz-Granados O.**  
Asesor Asociado (COL)

**Liliana Narvaez M.**  
Asesor Asociado (COL)

**Juan Camilo Olaya**  
Asistente Técnico ERN (COL)

**Steven White**  
Asistente Técnico ERN (COL)

Asesores Nacionales

---

**SNET Francisco Ernesto Durán**  
& **Giovanni Molina** El Salvador

**Osmar E. Velasco**  
Guatemala

**Oscar Elvir Honduras**  
**Romaldo Isaac Lewis** Belice

Banco Interamericano de Desarrollo – Medio Ambiente / Desarrollo Rural / Desastres Naturales

---

**Flavio Bazán**  
Especialista Sectorial

**Tsuneki Hori**  
Consultor Interno

**Cassandra T. Rogers**  
Especialista Sectorial

**Oscar Anil Ishizawa**  
Consultor Interno

**Sergio Lacambra**  
Especialista Sectorial

Banco Mundial – Gestión de Riesgo de Desastres / Región Latinoamérica y el Caribe

---

**Francis Ghesquiere**  
Coordinador Regional

**Edward C. Anderson**  
Especialista

**Joaquín Toro**  
Especialista

**Stuart Gill**  
Especialista

**Fernando Ramírez C.**  
Especialista

# Tabla de contenido

---

<b>1</b>	<b>Análisis probabilista de riesgos .....</b>	<b>1-1</b>
1.1	Generalidades .....	1-1
1.2	Análisis del riesgo.....	1-1
1.2.1	Procedimiento para el análisis del riesgo .....	1-1
1.2.2	Ecuación básica .....	1-2
1.2.3	Temporalidad de las amenazas .....	1-3
1.2.4	Incertidumbres.....	1-5
1.2.5	Estimadores puntuales del riesgo.....	1-5
1.2.6	Probabilidad de excedencia de valores de pérdida.....	1-6
1.2.7	Análisis para un solo escenario.....	1-6

# Índice de tablas

---

TABLA 1-1 TEMPORALIDAD DE AMENAZAS ..... 1-4

# 1 Análisis probabilista de riesgos

---

## 1.1 Generalidades

El análisis probabilista del riesgo tiene como objetivo fundamental determinar las distribuciones de probabilidad de las pérdidas que pueden sufrir en lapsos dados los activos expuestos, como consecuencia de la ocurrencia de amenazas naturales, integrando de manera racional las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. La pregunta básica que el análisis probabilista de riesgos debe contestar es: dado que se tiene un conjunto de activos expuestos a los efectos de una o varias amenazas naturales, ¿con qué frecuencia se presentarán pérdidas que superen un valor dado?

Puesto que la frecuencia de los eventos catastróficos es particularmente baja, queda descartada la posibilidad de contestar la pregunta anterior formulando modelos puramente empíricos del proceso de ocurrencia de estos eventos. Esto obliga a la construcción de modelos probabilistas como el que aquí se describe.

El procedimiento de cálculo probabilista consiste entonces, en forma resumida, en evaluar las pérdidas en el grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la amenaza, y luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia de cada escenario.

El análisis probabilista de riesgo involucra incertidumbres que no pueden despreciarse y deben propagarse a lo largo del proceso de cálculo. El presente numeral describe las bases generales de cálculo para alcanzar el objetivo planteado.

## 1.2 Análisis del riesgo

### 1.2.1 Procedimiento para el análisis del riesgo

La evaluación de riesgo requiere de tres pasos de análisis, que se describen a continuación:

- *Evaluación de la amenaza:* para cada uno de los peligros considerados, se define un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan de manera integral la amenaza correspondiente. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
- *Definición del inventario de elementos expuestos:* debe definirse el inventario de elementos expuestos, el cual debe especificar la localización geográfica del bien expuesto más los siguientes parámetros, que califican el elemento:

- Valor físico o costo de reposición del bien
  - Valor humano o número de ocupantes estimado
  - Clase estructural a la que pertenece el bien
- *Vulnerabilidad de las construcciones*: debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad para cada tipo de amenaza. Esta función caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de fenómenos amenazantes. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Se definen mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno.

### 1.2.2 Ecuación básica

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista del riesgo expuesto anteriormente, es necesario plantear entonces la metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los activos expuestos en lapsos determinados de tiempo y ante la ocurrencia de amenazas naturales.

El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas (loss 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, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

$$v(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) F_A(\text{Evento } i) \quad (\text{Ec. 1})$$

En la ecuación anterior  $v(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$  y  $F_A(\text{Evento } i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ , mientras que  $\Pr(P > p | \text{Evento } i)$  es la probabilidad de que la pérdida sea superior a  $p$ , dado que ocurrió el  $i$ -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de  $v(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida  $p$ , identificado como  $Tr$ .

Como se verá más adelante, la curva de pérdidas contiene toda la información necesaria para describir en términos de probabilidad el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas.

La pérdida  $p$  a que se refiere la ecuación 1 es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los bienes expuestos. Conviene hacer notar lo siguiente:

- La pérdida  $p$  es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe, por tanto, ser vista y tratada como una

variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad, condicionada a la ocurrencia de cierto evento.

- La pérdida  $p$  se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación, que debe ser incluido en el análisis.

En vista de la Ecuación 1, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

1. Para un escenario, determinar la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los bienes expuestos.
2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien, determinar la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Un vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, calcular la probabilidad de que esta exceda un valor determinado,  $p$ .
4. La probabilidad determinada en el inciso anterior, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, es la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida  $p$ .

El cálculo se repite para todos los eventos, con lo que se obtiene el resultado indicado por la Ecuación 1.

Es interesante señalar también que en la Ecuación 1 no se hace distinción entre eventos que pertenezcan a diferentes amenazas. En efecto, la suma en esa ecuación podría incluir, por ejemplo, sismos y huracanes o sismos y erupciones volcánicas. Esto puede hacerse porque se ha supuesto que tanto los eventos asociados a una misma amenaza como los eventos asociados a distintas amenazas no ocurren simultáneamente. Sin embargo, algunos fenómenos potencialmente dañinos sí ocurren simultáneamente, por lo que en estos casos hay que tomar previsiones especiales para la determinación de la distribución de probabilidad de  $p$ , tal como se analiza en el siguiente numeral.

### 1.2.3 Temporalidad de las amenazas

Algunos de los fenómenos naturales producen pérdidas por varios conceptos, que ocurren de manera simultánea. Por ejemplo, el paso de un huracán genera tanto un campo de vientos fuertes, como inundaciones por aumento en los niveles de la marea y por las lluvias intensas asociadas; los daños por viento y por inundación, entonces, ocurren casi al mismo tiempo, y no pueden considerarse eventos independientes.

El caso que se menciona en el párrafo anterior puede considerarse como uno en que tres amenazas diferentes (viento, inundación por marea de tormenta e inundación por exceso de lluvia) ocurren simultáneamente, asociadas a la misma *temporalidad*.

Con esto en mente, las amenazas estudiadas en esta fase del proyecto CAPRA podrían agruparse en las temporalidades que se indican en la Tabla 1-1

**Tabla 1-1**  
**Temporalidad de amenazas**

ANÁLISIS DE TEMPORALIDAD DE LAS AMENAZAS	TEMPORALIDAD			
	1	2	3	4
Tipo de amenaza				
Sismo				
Tsunami				
Huracán – Viento				
Huracán - Marea de tormenta				
Huracán - Lluvias				
Lluvias no huracanadas				
Inundación				
Deslizamiento				
Volcán - Caída de cenizas				
Volcán - Flujos piroclásticos				
Volcán - Flujos de Lava				

De acuerdo con la tabla anterior, el sismo, entendido como el movimiento mismo del suelo debido al paso de ondas sísmicas, el tsunami y los deslizamientos de tierra que pueden inducirse por el movimiento ocurrirían en la misma temporalidad (la 1, de acuerdo con la Tabla 1-1), pero en una temporalidad diferente a aquella en que ocurrirían los daños por viento, marea de tormenta e inundación.

La evaluación de pérdidas durante un escenario se realiza entonces considerando que las amenazas que pertenecen a una misma temporalidad ocurren de manera simultánea. No existe una manera sencilla y libre de ambigüedades para evaluar las pérdidas en estas condiciones (varias amenazas ocurriendo simultáneamente). Para los fines de este proyecto se ha propuesto la siguiente expresión para evaluar la pérdida en cada uno de los bienes expuestos, que corresponde a un modelo de daño en cascada, en el cual el orden de exposición a las diferentes intensidades es irrelevante:

$$P_i = \prod_{j=1}^M (1 - P_{ij}) \quad (\text{Ec. 2})$$

en donde  $P_i$  es la pérdida asociada al escenario  $i$ ,  $P_{ij}$  es la pérdida asociada al escenario  $i$  por concepto de la amenaza  $j$ , y  $M$  es el número de amenazas simultáneas consideradas en la temporalidad a la que pertenece el escenario  $i$ .

Conviene recordar que  $P_{ij}$  son variables aleatorias y, por tanto,  $P_i$  también lo es. Sin embargo, si las distribuciones de probabilidad de las  $P_{ij}$  son conocidas, y se hacen suposiciones razonables sobre su nivel de correlación (que están perfectamente correlacionadas, por ejemplo) los momentos de la distribución de probabilidad de  $P_i$  pueden determinarse a partir de la Ecuación 2.

#### 1.2.4 Incertidumbres

Como se observa en la Ecuación 1, y como se planteó anteriormente, la pérdida que se presenta en un grupo de bienes expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que debe ser tratada como variable aleatoria.

Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario. En otras palabras, por ejemplo, es impráctico determinar la distribución de probabilidad de la pérdida en un edificio, dado que en un sitio localizado a 100 Km de distancia ocurrió un sismo con magnitud 6.

Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$ , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$\Pr(P > p | Evento) = \int_I \Pr(P > p | I) f(I | Evento) dI \quad (\text{Ec. 3})$$

El primer término del integrando,  $\Pr(P > p | I)$ , es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor  $p$  dado que la intensidad local fue  $I$ ; este término, por tanto, toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término  $f(I | Evento)$  es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

#### 1.2.5 Estimadores puntuales del riesgo

Como se indicó anteriormente, la curva calculada aplicando la Ecuación 1 tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones es impráctico utilizar una curva completa, por lo que conviene utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número. Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales más comúnmente utilizados.

- (a) *Pérdida anual esperada* ( $P_{AE}$ ): se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la  $P_{AE}$  cantidad anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La  $P_{AE}$  puede obtenerse por integración de  $\nu(p)$  o mediante la siguiente expresión:

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} E(P|\text{Evento } i)F_A(\text{Evento } i) \quad (\text{Ec. 4})$$

- (b) *Pérdida máxima probable* ( $PML$  por las iniciales en inglés de Probable Maximum Loss): se trata de una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno muy largo (o, alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja). No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuentemente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. En la industria aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la  $PML$  varían entre 200 y al menos 1500 años.

### 1.2.6 Probabilidad de excedencia de valores de pérdida

La curva de pérdidas,  $\nu(p)$ , calculada con la Ecuación 1 indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada,  $p$ . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en un lapso  $T$ , es decir, en los próximos  $T$  años, con la siguiente expresión:

$$Pe(p, T) = 1 - e^{-\nu(p)T} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde  $Pe(p, T)$  es la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en los próximos  $T$  años.

### 1.2.7 Análisis para un solo escenario

El análisis probabilista de riesgo se realiza normalmente para el conjunto completo de escenarios especificados en las diferentes amenazas. Sin embargo, si así se desea, el análisis puede realizarse para un solo escenario (uno solo de los sumandos en la ecuación 1). Si se hace que la frecuencia anual de ocurrencia de este escenario sea 1, la aplicación de la Ecuación 1 nos conduciría a las probabilidades de excedencia (ya no frecuencias anuales de excedencia) de valores de pérdida  $p$ , dado que el escenario en cuestión ocurrió.

Este caso tiene aplicaciones importantes en el campo de la planeación territorial, ya que sus resultados, mapeados por ejemplo en términos del valor esperado de la pérdida, son fácilmente incorporables en los planes de ordenamiento territorial.