



# COSTA RICA

## TOMO II ANÁLISIS PROBABILISTA DE AMENAZAS Y RIESGOS NATURALES

INFORME TÉCNICO ERN-CAPRA-T2-18

## ANÁLISIS BENEFICIO-COSTO DE LA MITIGACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN EDIFICACIONES PÚBLICAS DE COSTA RICA



opportunities for all



**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.

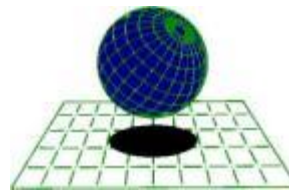


**ITEC**

**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

---

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

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

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

**Mauricio Cardona O.**  
Asistente Técnico ERN (COL)

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

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

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

**Andrei Garzón B.**  
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)

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

**Jairo Andrés Valcarcel 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)

---

Asesores Nacionales

---

**Osmar E. Velasco**  
Guatemala

**Sandra Zúñiga**  
Nicaragua

**Alonso Brenes**  
Costa Rica

---

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

---

**Francis Ghesquiere**  
Coordinador Regional

**Oscar A. Ishizawa**  
Especialista

**Joaquín Toro**  
Especialista

**Fernando Ramírez C.**  
Especialista

**Edward C. Anderson**  
Especialista

**Stuart Gill**  
Especialista

---

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

---

**Flavio Bazán**  
Especialista Sectorial

**Cassandra T. Rogers**  
Especialista Sectorial

**Hori Tsuneki**  
Consultor Interno

## LIMITACIONES Y RESTRICCIONES

La aplicación que aquí se presenta es de carácter ilustrativo y presenta limitaciones y restricciones debido al nivel de resolución de la información disponible, de lo cual debe ser consciente el usuario final para efectos de poder dar un uso adecuado y consistente a los resultados obtenidos teniendo en cuenta el tipo de análisis realizado, el tipo y calidad de datos empleados, el nivel de resolución y precisión utilizado y la interpretación realizada. En consecuencia es importante señalar lo siguiente:

- Los modelos utilizados en los análisis tienen simplificaciones y supuestos para facilitar el cálculo que el usuario debe conocer debidamente. Éstas están descritas en detalle en los informes técnicos respectivos (ver referencias).
- Los análisis se han desarrollado con la mejor información disponible que presenta limitaciones en su confiabilidad y su grado actualización. Es posible que exista información mejor y más completa a la cual no se tuvo acceso.
- La información utilizada y los resultados de los análisis de amenaza, exposición y riesgo tienen una asociado un nivel de resolución según las unidades de análisis utilizadas, lo que se explica en el documento descriptivo del ejemplo.
- El uso que el usuario final le dé a la información no compromete a los autores de los estudios realizados, quienes presentan este ejemplo como lo que puede ser factible de hacer si se cuenta con información confiable con la precisión adecuada.
- Es responsabilidad del usuario comprender el tipo de modelo utilizado y sus limitaciones, la resolución y calidad de los datos, las limitaciones y suposiciones de los análisis y la interpretación realizada con el fin de darle a estos resultados un uso adecuado y consistente.
- Ni los desarrolladores del software, ni los promotores o financiadores del proyecto, ni los contratistas o subcontratistas que participaron en las aplicaciones o ejemplos de uso de los modelos asumen ninguna responsabilidad por la utilización que el usuario le dé a los resultados que aquí se presentan, por lo tanto están libres de responsabilidad por las pérdidas, daños, perjuicios o efectos que pueda derivarse por la utilización o interpretación de estos ejemplos demostrativos.

## Tabla de contenido

---

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1-1</b>
<b>2</b>	<b>Metodología de análisis.....</b>	<b>2-1</b>
<b>3</b>	<b>Resultados del análisis .....</b>	<b>3-1</b>
3.1	Reducción de vulnerabilidad y modelo de costos.....	3-1
3.2	Resultados portafolio total.....	3-3
3.3	Resultado del análisis beneficio-costos .....	3-3
3.4	Resultados por provincia .....	3-5
<b>4</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>4-1</b>
<b>5</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>5-1</b>

## Índice de figuras

---

FIGURA 2-1 ANÁLISIS DE VALOR PRESENTE NETO DE COSTOS, BENEFICIOS E INVERSIÓN INICIAL EN MEDIDAS ESTRUCTURALES DE MITIGACIÓN .....	2-2
FIGURA 3-1 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD PARA DIFERENTES TIPOLOGÍAS .....	3-2
FIGURA 3-2 CURVA PML PARA LOS ESTADOS ACTUAL Y REHABILITADO .....	3-3
FIGURA 3-3 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA LOS ESTADOS ACTUAL Y REHABILITADO .....	3-3
FIGURA 3-4 FUNCIÓN DE PROBABILIDAD PARA LA RELACIÓN BENEFICIO-COSTO .....	3-4
FIGURA 3-5 FUNCIONES DE PROBABILIDAD PARA LA RELACIÓN BENEFICIO-COSTO PARA LAS DIFERENCIAS PROVINCIAS .....	3-7

## Índice de tablas

---

TABLA 3-1 TIPOS CONSTRUCTIVOS REPRESENTADOS E INTERVENCIONES PROPUESTAS. ....	3-1
TABLA 3-2 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE REFORZAMIENTO.....	3-2
TABLA 3-3 MOMENTOS ESTADÍSTICOS, FACTORES DE FORMA Y RESULTADOS DE ANÁLISIS.....	3-4
TABLA 3-4 MOMENTOS ESTADÍSTICOS, FACTORES DE FORMA Y RESULTADOS DE ANÁLISIS PARA SAN JOSÉ.3-5	
TABLA 3-5 MOMENTOS ESTADÍSTICOS, FACTORES DE FORMA Y RESULTADOS DE ANÁLISIS PARA ALAJUELA Y CARTAGO .....	3-5
TABLA 3-6 MOMENTOS ESTADÍSTICOS, FACTORES DE FORMA Y RESULTADOS DE ANÁLISIS PARA HEREDIA Y GUANACASTE .....	3-6
TABLA 3-7 MOMENTOS ESTADÍSTICOS, FACTORES DE FORMA Y RESULTADOS DE ANÁLISIS PARA PUNTARENAS Y LIMÓN .....	3-6

---

# 1 Introducción

---

En la práctica, la forma más efectiva para disminuir el riesgo sobre la infraestructura consiste en realizar obras de reforzamiento y rehabilitación estructural y no estructural. Este proceso requiere de una inversión económica bastante alta, la cual tiene como objeto disminuir la vulnerabilidad del elemento y con esto el nivel de riesgo. Esta reducción de la vulnerabilidad y/ riesgo se traduce en una disminución de pérdidas esperadas ante la ocurrencia futura de eventos en el largo plazo. La disminución corresponde no solo a las pérdidas físicas directas, sino a las pérdidas en los contenidos de los componentes afectados, a las pérdidas por interrupción del funcionamiento, a los impactos indirectos tales como los efectos sobre las personas (heridos y muertos) y a las asociada a la disminución o interrupción de la funcionalidad y relacionadas a efectos sociales indirectos, en general muy difíciles de cuantificar y pocas veces tenidos en cuenta.

El anterior planteamiento lleva a la posibilidad de realizar evaluaciones beneficio costo para diferentes alternativas de reforzamiento y/o rehabilitación, con el propósito de contar con criterios claros que permitan definir la opción óptima de la intervención y proponer una priorización dentro de una serie de alternativas de intervención, todas técnicamente viables en un ambiente de disponibilidad de recursos limitada. En esta relación, el beneficio corresponde a los ahorros en las pérdidas esperadas futuras (incluyendo pérdidas directas, indirectas, por interrupción de actividades, sociales, ambientales, funcionales y en general todas las pérdidas asociadas a la afectación del componente), mientras que el costo corresponden al valor de cada una de las diferentes alternativas de obras de intervención.

La evaluación de las pérdidas esperadas futuras se basa en la recurrencia de eventos de diferentes intensidades. Ante la incertidumbre asociada con la ocurrencia de eventos futuros se recurre a la simulación de procesos que obedecen las relaciones de recurrencia histórica o a la evaluación de un modelo probabilista, igualmente calibrado con la ocurrencia histórica de eventos. Así, para cada simulación de eventos se traen las eventuales pérdidas futuras a valor presente para efectos de comparación (en el mismo tiempo, presente) de dichas pérdidas, con la inversión inicial consecuencia de la intervención planteada.

En el marco de la evaluación probabilista, es necesario determinar la distribución de probabilidad de las relaciones beneficio-costo. En ese caso se utiliza el valor presente neto de los ahorros en pérdidas esperadas futuras (considerando tanto el estado intervenido como el no intervenido) valor que se compara con el costo de la misma intervención (rehabilitación de la estructura) dadas las condiciones actuales. El método es igualmente aplicable en una situación de diseño en la cual se deseen evaluar diferentes alternativas de nivel de diseño.

El objetivo de la simulación que se presenta más adelante consiste en evaluar el riesgo potencial de varias edificaciones públicas de Costa Rica ante futuros eventos sísmicos, expresado en términos de pérdidas económicas anuales esperadas (PAE) con el fin de adelantar un ejercicio beneficio–costo, en el cual pueda observarse el proceso de



simulación de pérdidas esperadas futuras y su reducción debida a una alternativa de intervención para mejorar desempeño de las edificaciones. Este análisis se realiza en términos probabilistas, visto desde el punto de vista del modelo de recurrencia de eventos con base en sismos ocurridos en el pasado.

Los análisis presentados son de tipo ilustrativo, de la metodología y capacidades de las herramientas CAPRA. En general se basa en información tomada de otros análisis similares tratando de adaptar la información a las condiciones locales. La metodología propuesta debe servir como base para actualizar, depurar y refinar la información del modelo por parte de grupos de trabajo local con participación de funcionarios públicos, quienes deben conformar grupos de investigación con especialistas en la materia.

## 2 Metodología de análisis

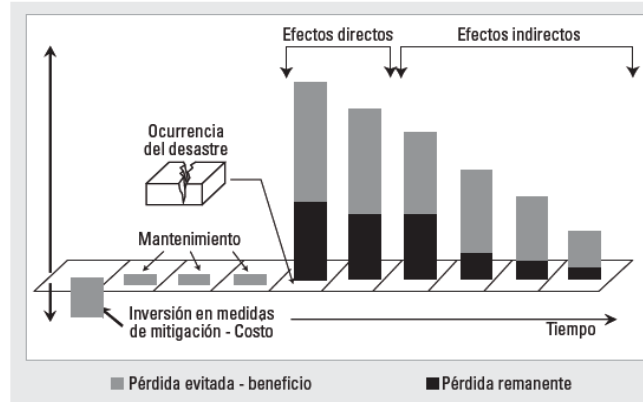
---

Los análisis de riesgo con base en relaciones beneficio-costos tiene dos grandes ventajas:

- Ofrece información directa que permite calificar diferentes alternativas de mitigación y reducción de riesgos, debido a que en cada caso puede evaluarse el impacto socioeconómico de cada una de las alternativas.
- Representa un criterio técnico y claro para establecer una priorización de intervención en diferentes componentes, o para definir las obras de intervención a realizar, siempre en términos de maximizar la relación beneficio-costos. Esto permite una programación racional de inversiones en mitigación y reducción de riesgos.

En estos tipos de análisis, los beneficios están relacionados con los ahorros futuros que se puedan lograr en términos de pérdidas directas, pérdidas en los contenidos y pérdidas indirectas esperadas, la eventual disminución en los efectos sociales directos y por la pérdida de funcionalidad que se puedan llegar a producir y los posibles ahorros en mantenimiento futuro. Para ello, es necesario contar con un estimativo relativamente confiable de las inversiones requeridas para cada una de las alternativas de mitigación, incluyendo los costos directos, indirectos, administrativos, financieros y los eventuales costos de mantenimiento en el lapso de tiempo seleccionado para el análisis, que normalmente es un periodo de varios años. Debe también establecerse una relación confiable entre las posibles intervenciones a realizar con la eventual disminución de la vulnerabilidad o de la amenaza que se logra. Los beneficios económicos que se generarían en el futuro deben traerse a valor presente para una adecuada comparación económica mediante una tasa de descuento apropiada.

La Figura 2-1 presenta el esquema de un análisis típico beneficio-costos, en el cual, para una adecuada comparación, es necesario traer los costos y beneficios futuros generados con la implantación de una medida estructural y cotejarlos con la inversión inicial requerida.



**Figura 2-1** Análisis de valor presente neto de costos, beneficios e inversión inicial en medidas estructurales de mitigación

La relación beneficio-costo,  $Q$ , se define como la relación entre el ahorro en pérdidas por la ejecución de programas de intervención estructural y el costo inicial de la intervención proyectada. De esta manera la relación beneficio-costo se plantea de la siguiente manera:

$$Q = \frac{L_U - L_R}{R} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde  $L_U$  es el valor presente de las pérdidas futuras en el estado no intervenido,  $L_R$  corresponde al valor presente de las pérdidas futuras en el estado rehabilitado, las cuales corresponden a variables aleatorias con distribución de probabilidad conocida y por lo tanto pueden ser calculadas.  $R$  corresponde al costo o valor de inversión por la ejecución del programa de intervención.

Los valores  $L_U$  y  $L_R$  pueden ser calculados de la siguiente manera:

$$L = \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i e^{-\gamma t_i} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde  $\beta_i$  corresponde al valor de la pérdida debida a un evento  $i$  en un tiempo  $t_i$  y  $\gamma$  corresponde a la tasa de descuento. De acuerdo con (Ordaz; 2009) se obtiene el cálculo de los dos momentos estadísticos de la variable aleatoria,  $L$ , como sigue:

$$E(L) = \frac{E(\beta_A)}{\gamma} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\text{VAR}(L) = \frac{\text{VAR}(\beta_A)}{2\gamma} \quad (\text{Ec. 4})$$

De acuerdo con (Ordaz; 2009) el valor presente neto de las pérdidas futuras puede ser representado mediante una distribución Gamma con parámetros dados como sigue:

$$p(L) = \frac{L^{r-1} \exp(-\lambda L) \lambda^r}{\Gamma(r)} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$E(L) = \frac{r}{\lambda} = \varepsilon \quad (\text{Ec. 6})$$

$$C(L) = \frac{1}{\sqrt{r}} = C \quad (\text{Ec. 7})$$

Con lo anterior el interés surge en evaluar el valor esperado de la relación beneficio-costo,  $E(Q)$ , la probabilidad que dicha relación sea positiva,  $Pr(Q > 1)$ .

$$E(Q) = \frac{E(L_U) - E(L_R)}{R} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde  $E(L_U)$  y  $E(L_R)$  son el valor esperado del valor presente neto de pérdidas futuras para el estado actual y estado rehabilitado respectivamente.

La probabilidad de obtener una relación beneficio-costo positiva puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$Pr(L_U - L_R > R) = 1 - \int_0^{\infty} Gac(R + y; r_U, \lambda_U) p_R(y) dy \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde  $Gac(x; r, \lambda)$  es la función Gamma acumulativa, dada por:

$$Gac(x; r, \lambda) = \int_0^x \frac{y^{r-1} \exp(-\lambda y) \lambda^r}{\Gamma(r)} dy \quad (\text{Ec. 10})$$

### 3 Resultados del análisis

La evaluación de la relación beneficio-costos se fundamenta en los resultados de análisis de riesgo obtenidos para las edificaciones públicas descritas en el informe ERN-CAPRA-T2-7 (Riesgo Sísmico en Edificaciones Públicas de Costa Rica, ERN 2009). Para una completa comprensión de los resultados que aquí se presentan, se deberá consultar en detalle los resultados indicados.

En el presente análisis solo se consideran las disminuciones en pérdidas directas de las construcciones. No se han considerado en este análisis las eventuales en pérdidas relacionadas con los contenidos de las construcciones, con el lucro cesante, con los efectos y pérdidas indirectas tales como afectación humana, suspensión del servicio, afectación indirecta a usuarios, etc.

#### 3.1 Reducción de vulnerabilidad y modelo de costos

De acuerdo con lo planteado anteriormente, la medida de intervención adaptada a cada una de las clasificaciones de tipo estructural y usos disponibles definirá en términos generales la disminución de la vulnerabilidad de cada componente y por tanto los posibles ahorros futuros ante la ocurrencia de eventos. Para efectos del presente estudio, las edificaciones incluidas en el portafolio de análisis se han clasificado en 3 tipos estructurales básicos, que representan el nivel de vulnerabilidad actual típico de las construcciones. Para poder parametrizar el análisis, se supone que cada uno de estos tipos constructivos representativos se somete a una intervención para llevarlos a niveles de sismo resistencia comparables a los de la normativa sísmica vigente (si no hay una norma en el país, comparar con la norma de diseño sismo resistente internacional aceptada). La Tabla 3-1 resume los tipos constructivos considerados y describe el sistema que representan antes y después de la intervención.

*Tabla 3-1  
Tipos constructivos representados e intervenciones propuestas.*

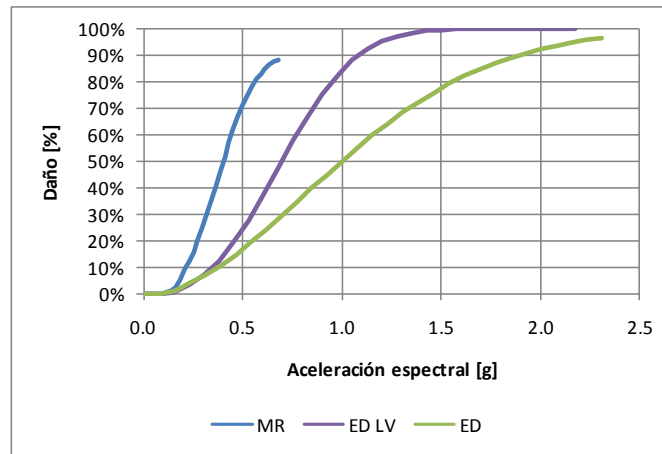
No.	Tipo constructivo original	Tipo constructivo modificado	Nivel de intervención referido
1	Mampostería simple. Edificaciones de 1 y 2 pisos con diafragma rígido pero sin elementos de confinamiento.	Mampostería confinada. Requiere intervenciones en la cimentación, construcción de elementos de confinamiento en concreto reforzado, anclaje y vigas de amarre a nivel de cubierta	Intermedio, a pesar de la complejidad no son intervenciones muy costosas
2	Edificios de pórticos de concreto sin riostras, mediana altura	Edificios de pórticos de concreto con muros de concreto a cortante de mediana altura	Alto, intervenciones costosas por abarcar la totalidad de la estructura en toda su altura
3	Bodegas industriales de pórticos aislados de luces de longitud media y cubierta ligera	Sin modificación	No aplica

Para valorar los costos de los anteriores niveles de intervención, se recurre a la experiencia en proyectos de intervención similares (ver ejemplo referencia , Proyecto de Bogotá). Para los tipos constructivos seleccionados las obras de reforzamiento tienen costos en los rangos indicados en la Tabla 3-2. La Tabla 3-2 indica igualmente el valor estimado por metro cuadrado y propone un porcentaje global de costo de intervención como porcentaje del valor expuesto.

**Tabla 3-2**  
*Estimación del costo de reforzamiento*

No.	Tipo constructivo	Rango de valores por metro cuadrado construido	Rango de valores de intervención estructural	Rango de valores de intervención estructural
		US\$ / m <sup>2</sup>	US\$ / m <sup>2</sup>	%
1	Mampostería simple	300	120	40
2	Pórticos de concreto	520	200	50

La Figura 3-1 presente las funciones de vulnerabilidad representativa para los tipos constructivos utilizados, en las cuales se indican las curvas respectivas antes y después de la intervención. Igualmente cada una de las figuras indica el costo de intervención estimado como porcentaje del valor expuesto de construcción.



**Figura 3-1**  
*Funciones de vulnerabilidad para diferentes tipologías*

### 3.2 Resultados portafolio total

De los resultados obtenidos en el análisis de riesgo para el portafolio total de edificaciones públicas se obtuvo las curvas de PML y excedencia de pérdidas para los estados actuales y rehabilitados como se presenta en la Figura 3-2.

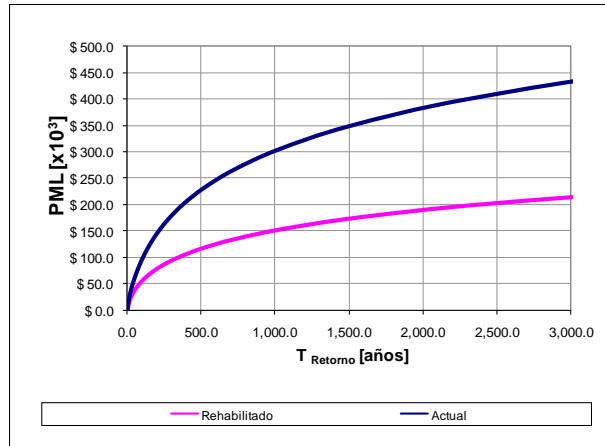


Figura 3-2 Curva PML para los estados actual y rehabilitado

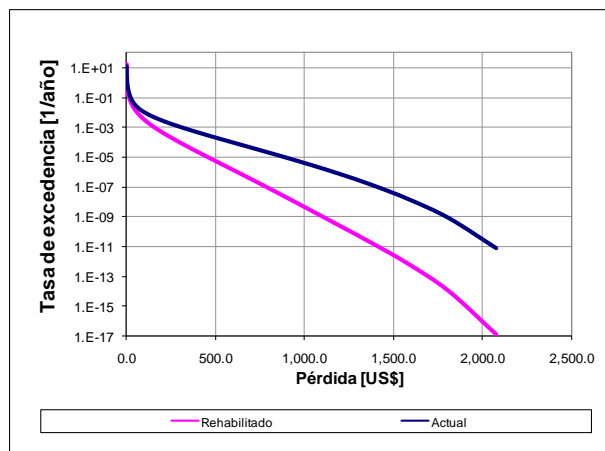


Figura 3-3 Curva de excedencia de pérdidas para los estados actual y rehabilitado

### 3.3 Resultado del análisis beneficio-costos

De la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener tanto el valor esperado,  $E(\beta_A)$ , como la varianza,  $VAR(\beta_A)$ , de la pérdida anual, estos dos últimos, esenciales para el cálculo de los dos momentos estadísticos del valor presente neto de pérdidas futuras,  $E(L)$  y  $VAR(L)$ .

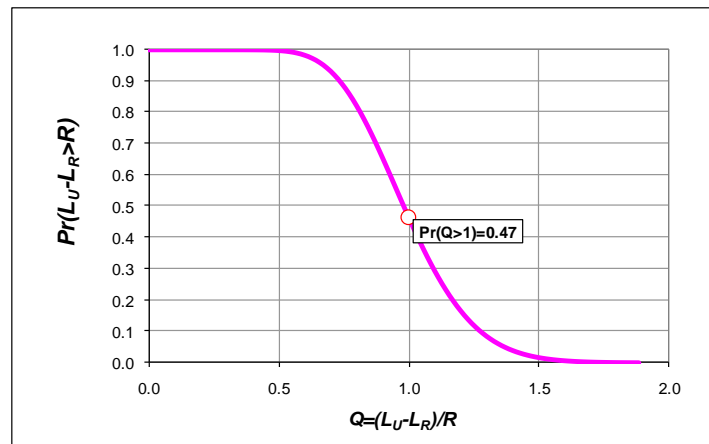
Una vez obtenidos los momentos estadísticos de  $L$ , es posible calcular los factores de forma,  $\theta$ , y escala,  $\lambda$ , de la función Gamma para estimar la probabilidad de obtener una buena relación beneficio-costos. Los momentos estadísticos y factores de forma descritos

anteriormente para el caso del grupo de edificaciones de escuelas y colegios se presentan en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3**  
*Momentos estadísticos, factores de forma y resultados de análisis*

Valor		Actual	Rehab
Pér. Anual Media	[US\$]	15	14
(Pér. Anual Media) <sup>2</sup>	[US\$] <sup>2</sup>	658	414
E(L)	[US\$]	491	464
VAR(L)	[US\$] <sup>2</sup>	10,960	6,900
σ(L)	[US\$]	105	83
scale r		22	15
shape θ		21.98	31.25
E(Q)	[US\$]	0.05	
Pr(Q)	[%]	100.0%	
Pr(Q>1)	[%]	47%	
Tasa de descuento	[%]	3.0%	

Del análisis realizado para el grupo se obtiene un valor esperado de la relación beneficio-costado,  $E(Q)$ , es 0.48 con una probabilidad del 99%, mientras que la probabilidad que la relación sea superior a la unidad es del 47%. En la Figura 3-4 se presenta la función de probabilidad para la relación beneficio-costado del grupo de edificaciones ante la alternativa de rehabilitación planteada.



**Figura 3-4** Función de probabilidad para la relación beneficio-costado



### 3.4 Resultados por provincia

De igual forma que para la totalidad del portafolio de edificaciones públicas, en los resultados obtenidos en el análisis de riesgo se obtuvieron las curvas de PML y excedencia de pérdidas para los estados actuales y rehabilitados de las edificaciones ubicadas en cada una de las provincias.

Como se describió anteriormente, de las curvas de excedencia de pérdida es posible calcular los momentos estadísticos y factores de forma descritos en la Tabla 3-4 a Tabla 3-7 por provincia.

*Tabla 3-4 Momentos estadísticos, factores de forma y resultados de análisis para San José*

Valor		San jose	
		Actual	Rehab
Pér. Anual Media	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	4.8	2.5
(Pér. Anual Media) <sup>2</sup>	[US\$x10 <sup>6</sup> ] <sup>2</sup>	144.9	38.0
E(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	161.2	84.1
VAR(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ] <sup>2</sup>	2415.1	633.1
σ(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	49.1	25.2
scale r		15.0	7.5
shape θ		10.8	11.2
E(Q)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	0.33	
Pr(Q)	[%]	98.0%	
Pr(Q>1)	[%]	8%	

Del análisis realizado para la provincia de San José se obtiene un valor esperado de la relación beneficio-costo,  $E(Q)$ , de 0.33 con una probabilidad del 98%, mientras que la probabilidad que la relación sea positiva es del 8%.

*Tabla 3-5 Momentos estadísticos, factores de forma y resultados de análisis para Alajuela y Cartago*

Valor		Alajuela		Cartago	
		Actual	Rehab	Actual	Rehabilitado
Pér. Anual Media	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	1.6	0.8	1.1	0.5
(Pér. Anual Media) <sup>2</sup>	[US\$x10 <sup>6</sup> ] <sup>2</sup>	8.3	3.3	3.3	1.6
E(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	54.8	27.4	36.5	17.7
VAR(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ] <sup>2</sup>	137.6	55.3	54.5	26.6
σ(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	11.7	7.4	7.4	5.2
scale r		2.5	2.0	1.5	1.5
shape θ		21.8	13.6	24.4	11.8
E(Q)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	0.66		0.71	
Pr(Q)	[%]	99.8%		99.8%	
Pr(Q>1)	[%]	88%		93%	

Del análisis realizado para las provincias de Alajuela y Cartago se obtienen un valores esperados de la relación beneficio-costo,  $E(Q)$ , de 0.66 y 0.71 respectivamente, con una

probabilidad del 99.8%, mientras que la probabilidad que la relación sea positiva es del 88% y 93% respectivamente.

*Tabla 3-6 Momentos estadísticos, factores de forma y resultados de análisis para Heredia y Guanacaste*

Valor		Heredia		Guanacaste	
		Actual	Rehab	Actual	Rehab
Pér. Anual Media	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	0.8	0.4	2.0	1.1
(Pér. Anual Media) <sup>2</sup>	[US\$x10 <sup>6</sup> ] <sup>2</sup>	2.0	0.9	17.5	3.7
E(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	27.0	12.7	66.4	35.1
VAR(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ] <sup>2</sup>	33.0	14.4	292.0	61.9
σ(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	5.7	3.8	17.1	7.9
scale r		1.2	1.1	4.4	1.8
shape θ		22.0	11.2	15.1	19.9
E(Q)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	0.78		0.48	
Pr(Q)	[%]	99.6%		99.5%	
Pr(Q>1)	[%]	95%		49%	

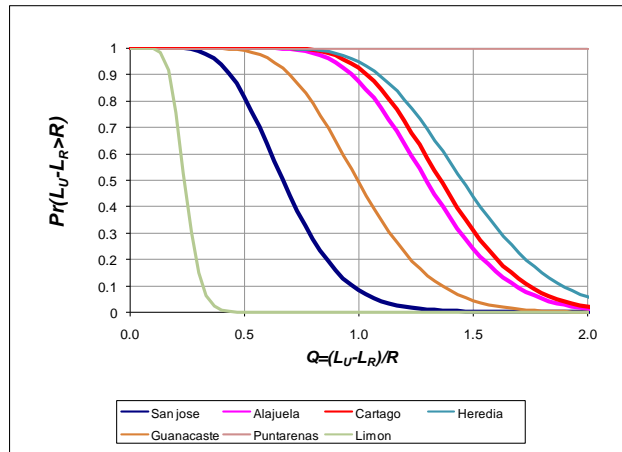
Del análisis realizado para las provincias de Heredia y Guanacaste se obtienen un valores esperados de la relación beneficio-costos,  $E(Q)$ , de 0.78 y 0.48 respectivamente, con una probabilidad del 99%, mientras que la probabilidad que la relación sea positiva es del 95% y 49% respectivamente.

*Tabla 3-7 Momentos estadísticos, factores de forma y resultados de análisis para Puntarenas y Limón*

Valor		Puntarenas		Limon	
		Actual	Rehab	Actual	Rehab
Pér. Anual Media	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	1.8	1.0	0.7	0.3
(Pér. Anual Media) <sup>2</sup>	[US\$x10 <sup>6</sup> ] <sup>2</sup>	5.1	2.3	1.9	0.8
E(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	60.7	33.1	24.5	10.5
VAR(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ] <sup>2</sup>	84.8	38.4	31.4	12.7
σ(L)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	9.2	6.2	5.6	3.6
scale r		1.4	1.2	1.3	1.2
shape θ		43.5	28.4	19.1	8.8
E(Q)	[US\$x10 <sup>6</sup> ]	0.82		0.14	
Pr(Q)	[%]	100.0%		105.8%	
Pr(Q>1)	[%]	100%		0%	

Del análisis realizado para las provincias de Puntarenas y Limón se obtienen un valores esperados de la relación beneficio-costos,  $E(Q)$ , de 0.82 y 0.14 respectivamente, con una probabilidad del 100% y 105.8% respectivamente, mientras que la probabilidad que la relación sea positiva es del 100% y 0% respectivamente.

En la Figura 3-5 se presentan las funciones de probabilidad para la relación beneficio-costos por provincia ante el escenario de rehabilitación planteado.



**Figura 3-5 Funciones de probabilidad para la relación beneficio-costos para las diferencias provincias**

De la figura anterior se observa las bajas probabilidades de obtener una relación beneficio-costos favorable para las provincias de Limón, San José y Guanacaste, pues las probabilidades de obtener una relación superior a la unidad son inferiores al 80% en los tres casos. Situación opuesta al de las provincias de Alajuela, Cartago, Heredia y Puntarenas.

---

## 4 Conclusiones y recomendaciones

---

El análisis mediante relaciones beneficio-costos exige la definición de una serie de elementos complementarios, incluyendo el análisis integral de beneficios y el análisis de relaciones costo de rehabilitación contra disminución en la vulnerabilidad.

Para un análisis integral de los eventuales beneficios que se obtienen con una intervención o rehabilitación estructural deben considerarse las siguientes pérdidas esperadas, el cual debe incluir todos los componentes proyectados en el tiempo:

- a) Directas:
  - Estructura
  - Acabados
  - Contenidos
  - Humanas
- b) Indirectas:
  - Lucro cesante o interrupción del funcionamiento
  - Costos de mantenimiento
  - Efectos sociales indirectos
  - Efectos ambientales
  - Costos de oportunidad y desarrollo

Sin embargo debe considerar que no todas las pérdidas o impactos se miden en términos económicos. Por ejemplo la pérdida de vidas humanas o los impactos sociales indirectos, tales como los asociados a una eventual interrupción en los servicios de un hospital, no son fácilmente cuantificables en estos términos, por lo cual no serían en general aditivos a los demás, sino complementarios.

Otro aspecto relevante para el análisis beneficio-costos consiste en establecer funciones adecuadas entre los costos de una eventual rehabilitación y la disminución en la vulnerabilidad representada por la reducción en pérdidas esperadas para la situación. Dicha relación se plantea normalmente a nivel de un estado determinado como por ejemplo cual sería el costo de llevar a una estructura, vulnerable, hasta un nivel de seguridad compatible con la normativa vigente y definir así el nivel asociado al caso rehabilitado, el que corresponde al nivel de seguridad de la normativa.

En la mayoría de las situaciones la relación entre costo de rehabilitación y reducción de vulnerabilidad depende de cada una de las edificaciones a intervenir, por lo cual, no resulta fácil plantear modelos generalizados sobre esta relación. Se recomienda en general consultar especialistas en la materia para lograr una relación balanceada y ajustada a la realidad.

Se pueden plantear modelos indicativos que permitan realizar análisis preliminares basados por ejemplo en el costo por metro cuadrado requerido para disminuir porcentualmente la vulnerabilidad.

Según esta relación se podría realizar varios análisis para diferentes niveles de seguridad (opciones de rehabilitación) para obtener finalmente relaciones entre el costo de inversión inicial y la relación beneficio-costo correspondiente.

La evaluación de la distribución de probabilidad de la relación beneficio-costos es una buena herramienta para toma de decisiones, mediante el análisis de los beneficios netos de medidas de mitigación de riesgo, tanto para obras de rehabilitación estructural, priorización de inversiones en rehabilitación, toma de decisiones alrededor de renovación de activos, como para planteamientos en códigos de construcción y reforzamiento. Debido a la naturaleza estocástica de los fenómenos naturales, sismo en el presente análisis, el valor presente neto de pérdidas es una cantidad con un alto nivel de incertidumbre. Por lo tanto, las decisiones no deben ser establecidas solamente con base en valores esperados, por ello, es necesario el uso de metodologías que permitan determinar la probabilidad de tener relaciones beneficio-costos positivas y seleccionar la alternativa con máxima probabilidad.

## 5 Referencias

---

- Evaluación de Riesgos Naturales ERN – América Latina. Riesgo sísmico en edificaciones públicas de Costa Rica. Informe ERN-CAPRA-T2-7. <http://www.ecapra.org>. 2009.
- Ordaz, M., Yamin, L. E., Cardona, O. D., & Mora, M. G., Probabilistic benefit cost ratios for seismic retrofitting of buildings, Bogotá, 2009.