



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN PROBABILISTA DE DAÑOS Y PÉRDIDAS ECONÓMICAS EN  
EDIFICACIONES EXPUESTAS A VIENTOS HURACANADOS EN MÉXICO: UN  
CASO DE ESTUDIO.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:  
ING. GERARDO LAZCANO SÁNCHEZ**

**TUTOR ACADÉMICO:  
DR. DAVID DE LEÓN ESCOBEDO**

**2017**



## **AGRADECIMIENTOS**

A **DIOS** por darme la fuerza y por estar conmigo todos los días de mi vida.

A mis **PADRES** por estar conmigo a lo largo del camino de la vida.

A mi tutor académico **Dr. David de León Escobedo** por el tiempo, paciencia y conocimiento brindados para la culminación de este proyecto.

A mis **Sinodales** por su conocimiento y valiosos comentarios realizados para la correcta culminación del proyecto.

Al **CONACYT** por el apoyo económico otorgado para la realización de los estudios de Posgrado.

Al **COMECYT** por el apoyo económico otorgado para la culminación de este proyecto.

## **RESUMEN**

El trabajo presenta una metodología probabilista para evaluar los daños y pérdidas económicas en edificaciones expuestas a peligro eólico fuerte, como en el caso de huracanes. Esta metodología desarrolla curvas de fragilidad de daños en la edificación así como en su contenido, estos daños se deben a la pérdida de los elementos no estructurales y a la pérdida parcial o total de su contenido por infiltración de agua. La presión ejercida por el viento en las fachadas y ventanas así como la resistencia de los elementos de sujeción se caracteriza de manera probabilista. La precipitación que se asocia con los efectos del viento huracanado, y la subsecuente infiltración de agua, contribuye a la pérdida económica del contenido de la edificación. La metodología se aplica a un hotel recientemente dañado por el Huracán Odile en Baja California Sur, México.

## **ABSTRACT**

The present work introduces a probabilistic methodology for the damage and loss assessment of buildings under strong wind hazard. The methodology develops fragility curves for the damages on the building and contents, due to the loss of nonstructural elements and partial or total loss of contents because of water infiltration. The wind induced pressure on facades and windows is probabilistically characterized and their resistances as well. Rainfall associated with hurricane, and the subsequent water infiltration, contributes to the loss of contents. The formulation is applied to a hotel building recently damaged by the hurricane Odile in Baja California Sur, Mexico.

## INTRODUCCIÓN

México ha resultado considerablemente afectado por el impacto de huracanes a lo largo de décadas, tanto en las costas del Océano Pacífico como en las costas del Océano Atlántico, afectaciones que se han traducido en cuantiosas pérdidas económicas. Debido a lo anterior se decidió analizar una edificación ubicada en una zona propensa a la acción de vientos huracanados como lo es la zona de Los Cabos, Baja California Sur.

Generalmente, las pérdidas económicas se componen por aquellas que se relacionan directamente con el daño de los elementos de la estructura, las que se relacionan con las pérdidas de los contenidos de la edificación afectados y aquellas que tienen que ver con la pérdida de ingresos económicos durante el tiempo en el que se llevan a cabo las reparaciones.

Aun cuando para construcciones relativamente altas, las afectaciones producidas por la acción del viento en el sistema estructural no son considerables debido en parte a un apropiado nivel de rigidez de la edificación, gran cantidad del daño se produce en los elementos de fachada que la componen. Debido a lo anterior, el presente estudio analiza el nivel de vulnerabilidad de los elementos de fachada para distintos escenarios de viento, lo cual posteriormente se ve traducido en una valoración de las pérdidas económicas originadas por dicha vulnerabilidad. La metodología utilizada es una adaptación de una originalmente propuesta en los Estados Unidos de América para determinar el nivel de daño de viviendas localizadas en zonas propensas a la presencia de huracanes.

Originalmente el planteamiento de la investigación se centraba en la determinación de la conexión; entre una soldada, una atornillada y una mixta, con el menor costo esperado del ciclo de vida de la edificación, sin embargo de acuerdo con los resultados preliminares obtenidos de análisis estructurales dinámicos para las cargas eólicas, se vislumbró que los elementos estructurales principales de la edificación cumplían con los estados límites de falla para los cuales fueron diseñados, por lo cual se decidió atender únicamente los daños en la fachada de la edificación y que, en realidad, generaban cuantiosas pérdidas económicas, dando como resultado un nuevo enfoque en la investigación. Y para esto, se estableció como nuevo objetivo generar curvas de

fragilidad de la construcción que consideraran la vulnerabilidad de los elementos presentes en la fachada de la edificación para tres estados de daño establecidos.

El presente trabajo se compone de dos partes; en la primera se muestra los ajustes que se hicieron al protocolo original de la investigación de acuerdo con el nuevo planteamiento de la investigación, en la segunda se muestra el artículo resultado de la investigación de la acción de viento huracanado en las edificaciones relativamente altas, y en el anexo se muestra el protocolo originalmente aprobado para el desarrollo del trabajo.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	ii
<b>ABSTRACT</b>	ii
<b>INTRODUCCIÓN</b>	iii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	2
<b>LISTA DE TABLAS</b>	3
<b>TABLA DE SÍMBOLOS Y NOMENCLATURAS</b>	4
<b>PARTE 1. PROTOCOLO DE TESIS</b>	
<b>1.1 HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN</b>	<b>6</b>
1.1.1 Hipótesis	6
1.1.2 Objetivo General	6
1.1.3 Objetivos Específicos	6
<b>PARTE 2. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN</b>	
<b>ACUSE DE RECIBO</b>	<b>8</b>
<b>Introducción</b>	<b>10</b>
<b>Metodología</b>	<b>12</b>
Estados de daño y estimación de pérdidas económicas	12
<b>Modelo estructural</b>	<b>17</b>
<b>Curvas de fragilidad para escenarios de daño</b>	<b>20</b>
<b>Curvas de pérdidas económicas</b>	<b>21</b>
<b>Discusión</b>	<b>23</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>24</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>25</b>
<b>Referencias</b>	<b>25</b>
<b>ANEXO</b>	

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Diagrama de flujo para el cálculo de las curvas de fragilidad y pérdidas económicas.	13
<b>Figura 2:</b> Probabilidad de ocurrencia de riesgo eólico en Los Cabos, Baja California Sur, México.	14
<b>Figura 3:</b> Modelo de precipitación asociada con los huracanes en México para Baja California Sur.	17
<b>Figura 4:</b> Planta y elevación de la edificación en estudio.	18
<b>Figura 5:</b> Fachada principal de la edificación, barlovento.	19
<b>Figura 6:</b> Paneles de fachada dañados en un hotel en Los Cabos, BCS, México (Chávez, et al., 2015).	19
<b>Figura 7:</b> Curvas de fragilidad para los estados de daño en la edificación.	21
<b>Figura 8:</b> Pérdidas económicas para un hotel dañado por el viento en México.	23

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Presiones del viento (en $kg/m^2$ ) para distintos escenarios de intensidad $V_R$ en la edificación por nivel.	15
<b>Tabla 2:</b> Definición de los estados de daño para la edificación en estudio (Pennington Vann & McDonald, 1978)	16

## TABLA DE SÍMBOLOS Y NOMENCLATURAS

USD	United States Dollar
kph	Kilómetros por hora
$V_D$	Velocidad de diseño
$q_z$	Presión dinámica base del viento
$F_V( )$	Distribución acumulada de probabilidad
CFE	Comisión Federal de Electricidad
$V_R$	Velocidad regional
$P_D(DS)$	Probabilidad del estado de daño
$\bar{x}$	Valor medio de datos
$s$	Desviación estándar
$n$	Tamaño de muestra
$\alpha$	Nivel de significancia
BCS	Baja California Sur
$P_D$	Probabilidad de falla
$\beta$	Índice de confiabilidad
$L_T$	Costo total de pérdidas
$k$	Clases de muestra
PDF	Probability Density Function

## **PARTE 1. PROTOCOLO DE TESIS**

## **1.1 HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN**

### **1.1.1 Hipótesis**

Las medidas de mitigación implementadas para reducir la vulnerabilidad de la fachada de la edificación, empleando el modelo de confiabilidad-velocidad del viento propuesto, reducen las pérdidas económicas por la acción del viento a menos del 50% de las pérdidas originales.

### **1.1.2 Objetivo General**

Aplicar una metodología probabilista para estimar el nivel de daño y las pérdidas económicas potenciales debido al impacto de cargas eólicas originadas por la acción de huracanes para un hotel diseñado con las prácticas establecidas por los manuales de construcción vigentes en México y generar recomendaciones de mitigación de pérdidas.

### **1.1.3 Objetivos Específicos**

- a) Proponer una edificación típica a base de marcos resistentes a momento como modelo de estudio.
- b) Obtener la vulnerabilidad de los elementos no estructurales de la edificación expuestos a la acción del viento para distintos escenarios de carga eólica.
- c) Desarrollar un modelo simplificado de precipitación asociada con eventos huracanados.
- d) Calcular el costo esperado en el ciclo de vida de la edificación para distintos escenarios de viento.
- e) Recomendar las medidas de mitigación que generan una reducción de los costos de las pérdidas económicas generadas por la acción del viento.

## **PARTE 2. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN**



Toluca, México, 2 de febrero de 2017

**ING. GERARDO LAZCANO SÁNCHEZ**  
**DR. DAVID DE LEÓN ESCOBEDO**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
**P R E S E N T E**

Acuso recibo de su artículo “**Evaluación probabilista de daños y pérdidas económicas en edificaciones expuestas a vientos huracanados en México: un caso de estudio**”, registrado en esta Dirección Editorial en el expediente **CES/13/17**. Su trabajo será turnado al Comité Editorial para su revisión, tan pronto tengamos alguna respuesta la haremos de su conocimiento.

Al someter su trabajo a CIENCIA ergo-sum damos por entendido que no ha sido publicado y no será sometido a otra publicación antes de saber la decisión del Comité Editorial de nuestra revista.

En cumplimiento de la norma **ISO 9001-2008** le informamos que puede consultar el “Proceso de edición de revistas” que seguirá su colaboración desde este momento en el siguiente enlace:

[http://ergosum.uaemex.mx/PROCEDIMIENTO\\_REVISTAS.pdf](http://ergosum.uaemex.mx/PROCEDIMIENTO_REVISTAS.pdf)

Les agradezco su confianza en la revista y hago propicia la ocasión para enviarles un cordial saludo.

  
**A T E N T A M E N T E**  
**PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO**  
**“2017, AÑO DEL CENTENARIO DE LA PROMULGACIÓN DE LA CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS**  
**UNIDOS MEXICANOS”**  
**DR. EDUARDO LORÍA DÍAZ**  
EDITOR

c.c.p. expediente.

# **Evaluación probabilista de daños y pérdidas económicas en edificaciones expuestas a vientos huracanados en México: un caso de estudio.**

## ***Probabilistic assessment of damage and economic losses on buildings under hurricane winds in Mexico: a case of study.***

Ing. Gerardo Lazcano Sánchez<sup>1</sup>

Dr. David de León Escobedo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, Ciudad Universitaria, Toluca, 50130 Estado de México, México.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, Ciudad Universitaria, Toluca, 50130 Estado de México, México.

\*Corresponding author. E-mail: lazcanogerardo@hotmail.com

### **Resumen:**

Se presenta una metodología probabilista para evaluar los daños y pérdidas económicas en edificaciones expuestas a peligro eólico fuerte, como en el caso de huracanes. Esta metodología desarrolla curvas de fragilidad de daños en la edificación así como en su contenido. La presión ejercida por el viento en las fachadas y ventanas así como la resistencia de los elementos de sujeción se caracteriza de manera probabilista. La precipitación que se asocia con los efectos del viento huracanado, y la subsecuente infiltración de agua, contribuye a la pérdida económica del contenido de la edificación. La metodología se aplica a un hotel recientemente dañado por el Huracán Odile en Baja California Sur, México.

**Palabras clave:** peligro eólico, curvas de fragilidad, pérdidas económicas.

### **Abstract:**

The present work introduces a probabilistic methodology for the damage and loss assessment of buildings under strong wind hazard. The methodology develops fragility curves for the damages on the building and contents, due to the loss of nonstructural elements and partial or total loss of contents because of water infiltration. The wind induced pressure on facades and windows is probabilistically characterized and their resistances as well. Rainfall associated with hurricane,

and the subsequent water infiltration, contributes to the loss of contents. The formulation is applied to a hotel building recently damaged by the hurricane Odile in Baja California Sur, Mexico.

**Key words:** wind hazard, fragility curves, loss assessment.

## Introducción

México ha experimentado el impacto de huracanes que han provocado daños no sólo a las instalaciones construidas sino también a su contenido (CENAPRED-CEPAL, 2006).

Varias investigaciones (Vickery, et al., 2003; Vickery, et al., 2006, Crandell, J. H., et al., 1993) han propuesto metodologías para evaluar el daño originado por el viento de huracanes en casas. Las casas-habitación tienden a perder sus cubiertas, fachadas, ventanas y puertas una vez que el huracán ha azotado la zona de afectación.

Las pérdidas económicas debido a huracanes han alcanzado cifras muy altas, por ejemplo: Andrew en 1992 originó pérdidas económicas en la infraestructura del orden de 25.3 billones USD; Wilma en 2005, 16.8 billones USD; Katrina en 2005, 108 billones USD, entre otros (National Hurricane Center, 2015). Recientemente en México, el huracán Odile produjo daños de gran magnitud en la infraestructura de Baja California Sur y pérdidas económicas en hoteles que vieron interrumpidos sus servicios durante al menos seis meses, y las pérdidas económicas debido a su presencia se estimó en 24 mil millones de pesos (Chávez, et al., 2015).

Aunque los hoteles tienen en general un adecuado diseño estructural, los elementos no estructurales algunas veces son inadecuadamente conectados a la estructura principal. Además, una vez que las fachadas fallan, mucho de su contenido es total o parcialmente dañado debido a la infiltración de agua. Por lo tanto, como ocurre muchas veces cuando las pérdidas no estructurales exceden las estructurales, debería de ponerse mayor atención a los detalles de ingeniería que sujetan los componentes no estructurales al sistema estructural de la edificación. También, debido a los prolongados tiempos de reparación de fachadas y acabados, y al reemplazo de contenido de la edificación, las pérdidas económicas debidas a la interrupción de las actividades comerciales durante las reparaciones deberían ser consideradas como factores del balance costo-beneficio para el establecimiento de medidas de mitigación de daños.

En este artículo, se utiliza una metodología probabilista para estimar el nivel de daño y las pérdidas potenciales debidas al impacto de un huracán para un hotel diseñado con las prácticas establecidas por los manuales de construcción vigentes en México (CFE, 2008). Esta metodología sigue un procedimiento (Vickery, et al., 2006) previamente presentado en los Estados Unidos de

América y presenta curvas de fragilidad (Filliben, Gurley, Pinelli, & Simiu, 2002) obtenidas de considerar las cargas actuantes y la resistencia de los elementos de sujeción como variables aleatorias y calculando la probabilidad de que la capacidad exceda la resistencia del modelo analizado. La presión actuante involucra la presión del viento en fachadas, paredes, ventanas (Lima, 2015), puertas y otros componentes no estructurales y el cálculo de la probabilidad de falla para tres escenarios de daño: ligero, moderado y severo. Las presiones actuantes medias se obtienen calculando las fuerzas inducidas por el viento en la edificación analizada en función de la curva de riesgo eólico para la ciudad de Los Cabos, Baja California Sur (CFE, 2008). Las fuerzas resistentes medias se obtienen en términos de la resistencia de anclaje de los elementos y del arreglo de los tornillos comúnmente utilizados para sujetar los componentes de fachada al sistema estructural principal. El coeficiente de variación de la presión resistente se toma de la literatura (Vickery, et al., 2006).

La ingeniería basada en la evaluación del desempeño de las edificaciones está teniendo un crecimiento importante para el diseño de edificaciones (Ellingwood, Rosowsky, Li, & Kim, 2004), y en especial en este estudio se pone énfasis a la vulnerabilidad de los aspectos no estructurales como los elementos de fachadas, ya que aun cuando la estructura cumple con los estados límite de falla para los cuales ha sido diseñada, una gran pérdida económica se origina por la falla y daño de los elementos de la fachada que podrían ser incluidos en los estados límite de servicio (Gobierno del D.F., 2004), al verse afectados considerablemente los ocupantes del inmueble y en general la funcionalidad de este tipo de edificaciones.

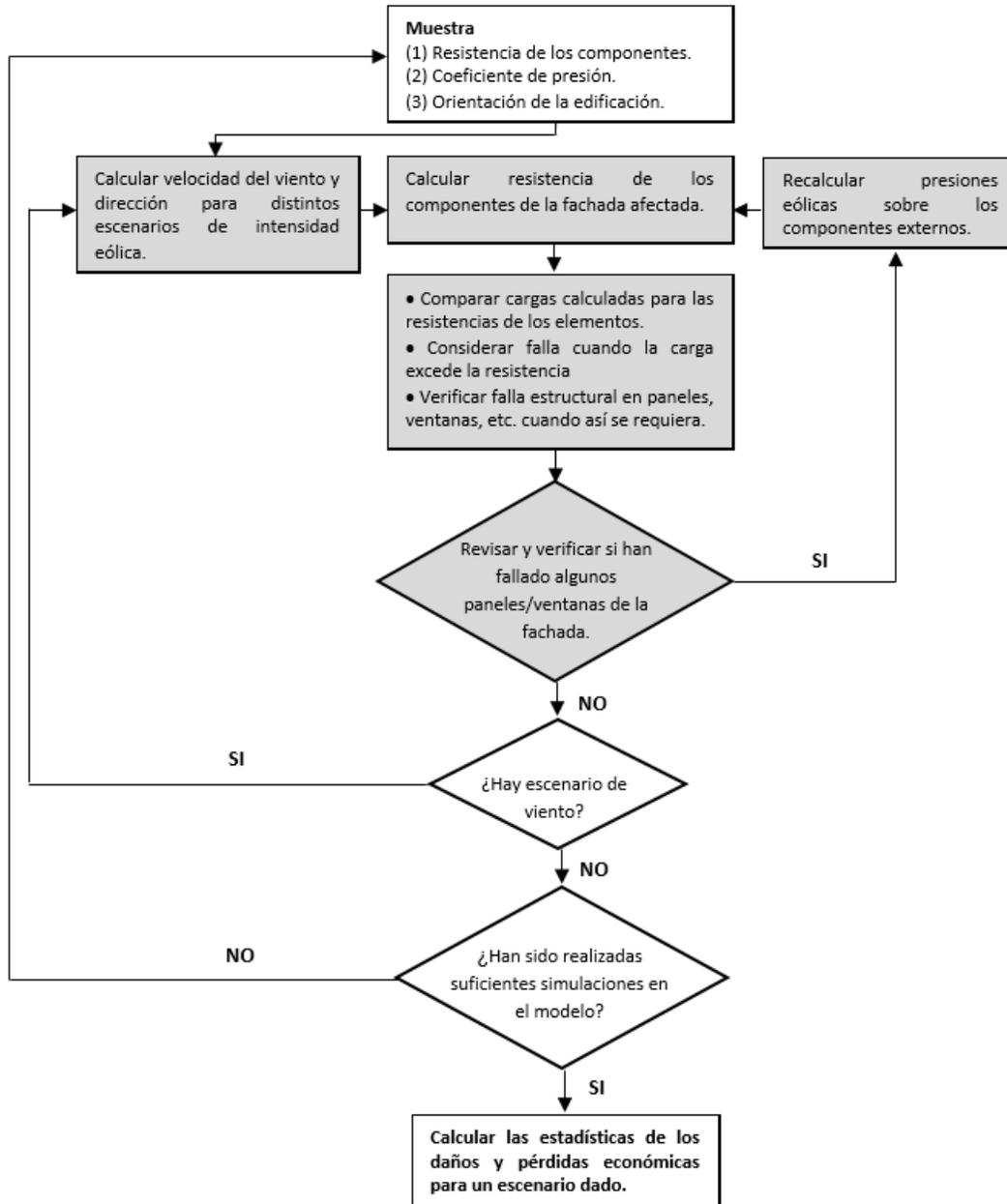
Se desarrolla también un modelo simplificado de lluvias relacionadas con eventos huracanados para evaluar la entrada de agua en la edificación y estimar el daño de los contenidos: cortinas, alfombras, dispositivos electrónicos, ropa, etc. los cuales son, más tarde, agregados al costo de los daños de la edificación. Esta distribución probabilista de lluvias sigue patrones locales, lo cual representa una adaptación de los criterios internacionales a condiciones reales del sitio en México. Finalmente, se presentan las curvas de pérdidas económicas para ambos casos: para las condiciones actuales de construcción y una con las medidas de mitigación sugeridas (que incluyen mejoras en el sistema de anclaje para los elementos de las fachadas de los paneles y ventanas) para cuantificar la reducción del daño.

## **Metodología**

La metodología se basa en la consideración de varios escenarios para la velocidad del viento (50, 100, 150, 200, 250, 300 y 350 *km/h*), se consideran estos escenarios de viento porque estas magnitudes pueden ser asociadas con los valores característicos de los huracanes tipo 1, 2, 3, 4, 5 de la escala Saffir-Simpson (Jiménez E., Matías R., Fuentes M., & Prieto G., 2014); el cálculo de las cargas inducidas por viento (Simiu & Scanlan., 1996) y presiones (fuerzas en la edificación equivalentes en ventanas y componentes de fachadas), resistencia en los componentes críticos (fachada y ventanas), probabilidades de falla para tres escenarios de daño y la estimación de pérdidas económicas que pudiera sufrir la edificación.

### **Estados de daño y estimación de pérdidas económicas**

Los estados de daño se definen para tres probables situaciones: el primero cuando menos del 12.5% de los elementos de la fachada resultan afectados, la falla ocurre cuando se excede la resistencia del panel por fractura o la de los tornillos del anclaje de la ventana o del elemento de la fachada (menor), el segundo cuando han fallado entre el 12.5% y 50% de los elementos de la fachada (moderado), y otro cuando han fallado más del 50% de los elementos de la fachada (severo). Estos estados de daño se establecen siguiendo el procedimiento usado por Vann y McDonald (Pennington Vann & McDonald, 1978), en el cual los estados de daño se definen en función del daño físico experimentado por la edificación. El diagrama de flujo de la Fig. 1 muestra la secuencia de los cálculos requeridos para la estimación de los daños/pérdidas relacionados con los efectos de vientos huracanados en edificaciones, propuesta por Vickery et al (Vickery, Skerlij, Lin, Twisdale Jr., Young, & Lavelle, 2006), para calcular la vulnerabilidad de la edificación en estudio.



**Figura 1:** Diagrama de flujo para el cálculo de las curvas de fragilidad y pérdidas económicas.

Las fuerzas inducidas por viento en la edificación, y las áreas tributarias para los componentes de fachadas son calculadas de acuerdo con los métodos convencionales de diseño (CFE, 2008). Primero, la velocidad de viento de diseño  $V_D$  se calcula como:

$$V_D = F_T F_{Tz} V_R \quad (1)$$

donde  $F_T$  es el factor que depende de la topografía local, adimensional;  $F_{r_z}$  es el factor de exposición para la velocidad media, y  $V_R$  la velocidad regional de ráfaga de viento sobre la estructura, en  $km/h$ . La presión dinámica base del viento  $q_z$  se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.0048GV_D^2 \text{ (en } kg/m^2\text{)} \quad (2)$$

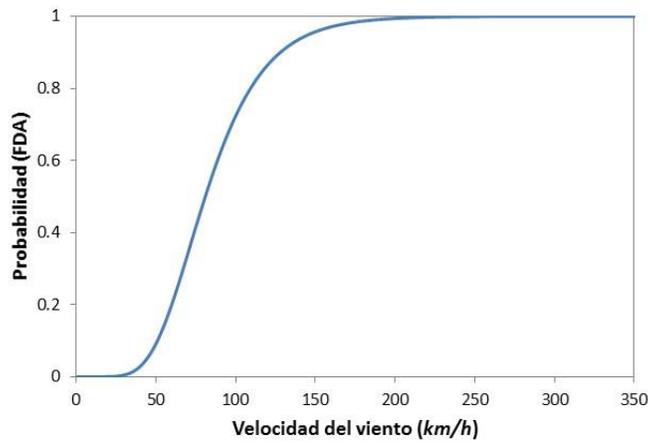
donde  $V_D$  es la velocidad básica de diseño, en  $km/h$  (ec. 1);  $G$  el factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional, y aproximadamente igual a 1.0.

Finalmente, la presión del viento  $p_z$  usa la presión dinámica base del viento (ec. 2) y el coeficiente de presión  $C_p$ :

$$p_z = C_p q_z \quad (3)$$

La probabilidad de ocurrencia de viento para las condiciones ambientales de Los Cabos, Baja California Sur, se obtuvo de acuerdo con las recomendaciones de datos históricos (CFE, 2008) y la correspondiente curva de la función Gumbel o extrema tipo I (Ang & Tang, 1984) con los parámetros  $a = 0.04$  y  $u = 71.79$  como se muestra en la Fig. 2 y ecuación 4. Los valores  $a$  y  $u$  se obtuvieron de las magnitudes de viento establecidas por los mapas de Isotacas del Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE (CFE, 2008), para dos periodos de retorno dados.

$$F_V(v) = \exp\{-e^{-a(v-u)}\} \quad (4)$$



**Figura 2:** Probabilidad de ocurrencia de riesgo eólico en Los Cabos, Baja California Sur, México.

La tabla 1 muestra las presiones de viento resultantes en la edificación a diferentes alturas, en m, para los distintos escenarios de viento considerados, para las condiciones de suelo correspondientes a este tipo de lugares (CFE, 2008).

**Tabla 1:** Presiones del viento (en  $kg/m^2$ ) para distintos escenarios de intensidad  $V_R$  en la edificación por nivel.

Nivel	z, m	$V_R$ , (m/s)						
		13.88	27.77	41.66	55.55	69.44	83.33	97.22
1	2	15.46	61.83	139.11	247.32	386.43	556.46	757.40
2	5.5	15.46	61.83	139.11	247.32	386.43	556.46	757.40
3	8.5	15.46	61.83	139.11	247.32	386.43	556.46	757.40
4	11.5	15.89	63.56	143.02	254.25	397.27	572.07	778.65
5	14.5	16.64	66.55	149.74	266.20	415.93	598.94	815.23
6	17.5	17.27	69.07	155.42	276.29	431.71	621.66	846.15
7	20.5	17.82	71.27	160.36	285.09	445.45	641.45	873.08
8	23.5	18.31	73.23	164.76	292.90	457.66	659.03	897.01
9	26.5	18.75	74.99	168.72	299.95	468.68	674.89	918.61
10	29.5	19.15	76.60	172.34	306.39	478.74	689.38	938.32

Una vez que los elementos de fachada comienzan a presentar falla, la precipitación provoca infiltración de agua al interior del hotel y, como resultado, los contenidos sufren daños parciales o totales.

Los escenarios de daño se definen en función de la cantidad de elementos de la fachada destruidos por la fuerza de viento.

**Tabla 2:** Definición de los estados de daño para la edificación en estudio (Pennington Vann & McDonald, 1978)

Estado de daño	Descripción	Elementos de fachada dañado
1	Menor	< 12.5 %
2	Moderado	> 12.5 % y ≤50%
3	Severo	>50%

Las probabilidades de daño  $P_D(DS)$  para los estados de daño descritos anteriormente, condicionales a las velocidades de viento  $v$ , se calculan como:

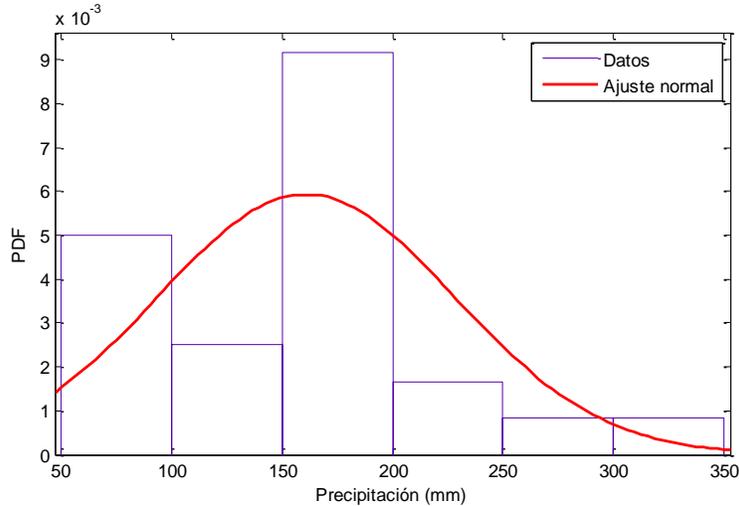
$$P_D(DS) = P_D(DS|v) = \max(P_1, P_2, P_3) \quad (5)$$

Donde  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  son las probabilidades de falla para cada modo de daño:  $P_1$  para la falla del panel por fractura debido a la presión del viento,  $P_2$  para la falla en los tornillos que conectan los paneles con la subestructura de anclaje (la fuerza de viento excede la capacidad de arranque de los tornillos) y  $P_3$  para la falla del anclaje de las ventanas (la fuerza del viento excede la capacidad de arranque de los tornillos de anclaje).

En México se cuenta con datos locales de las intensidades de la precipitación generada por el viento durante un huracán (Breña-Naranjo, Pedrozo-Acuña, Pozos-Estrada, Jiménez-López, & López-López, 2015). El modelo de precipitación máxima diaria para los huracanes ocurridos en la zona de Baja California Sur se muestra en la Fig. 3 (Servicio Meteorológico Nacional), donde el histograma obtenido de los eventos (2001-2014), se ajusta a una distribución Normal ( $\bar{x} = 160.8 \text{ mm}$ ,  $s = 67.2 \text{ mm}$ ) y para establecer el número de intervalos se consideró el método de Sturges (Sturges, 1926); este modelo de precipitación se usa para considerar que, además del daño en la edificación, alguno o todos los contenidos de la edificación son también afectados debido a la infiltración de agua ya que una cantidad significativa de precipitación acompaña al viento del huracán.

Es importante mencionar que no existe correlación alguna entre las variables del viento y la precipitación que se presentan por la acción del huracán en la zona de estudio.

La probabilidad de tener precipitación mayor a  $200 \text{ mm}$  en un periodo dado, se tomó como parámetro para evaluar las pérdidas económicas esperadas ya que con esta precipitación se tiene la mayor cantidad de daños en los contenidos de la edificación (Fig. 3).



**Figura 3:** Modelo de precipitación asociada con los huracanes en México para Baja California Sur.

Una cantidad proporcional de utensilios, mobiliario y artículos de cuarto se consideran para ser dañados una vez que el agua logra entrar a las habitaciones del hotel a través de los elementos de la fachada dañados. El costo de fachadas, acabados, cortinas, mobiliario, alfombras, aparatos electrodomésticos, puertas y ventanas son incluidos para obtener el nivel de daño.

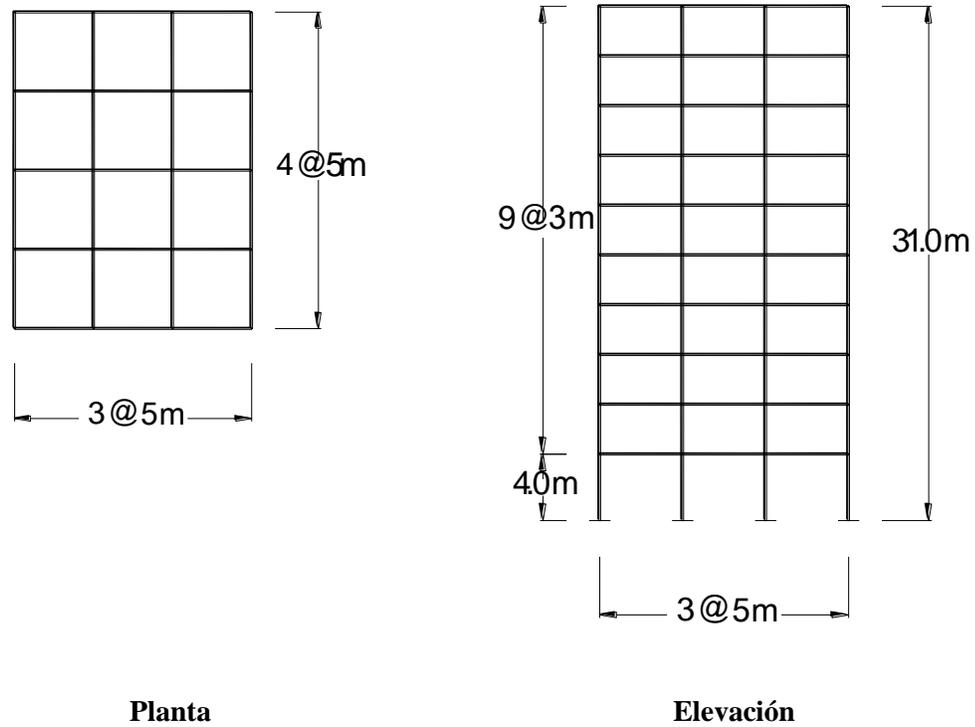
### Modelo estructural

El modelo estructural propuesto trata de representar las estructuras comúnmente utilizadas para este tipo de edificaciones, tanto por su altura como por cuestiones estructurales. Además de que su altura permite que sea susceptible a la acción del viento y exista variación significativa de la presión que el viento genera.

El edificio analizado está compuesto por una estructura principal de acero de 10 niveles, se localiza en la Ciudad de los Cabos en Baja California Sur. Las plantas del primero al décimo nivel tienen forma rectangular de 15 m de ancho (tres crujías en esta dirección) por 20 m de largo (cuatro crujías en esta dirección), con alturas de entrepiso constantes e iguales a 3.0 m del nivel 2 al 10 mientras que la primera planta tiene una altura de entrepiso de 4.0 m. Todas las plantas son simétricas con igual distribución de columnas, travesaños y muros.

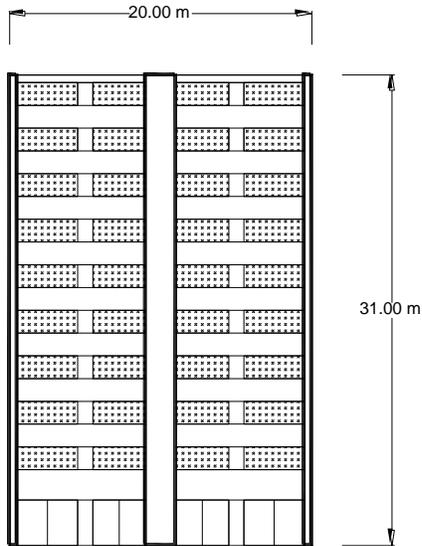
La estructuración está compuesta a base de un sistema de pisos de losacero apoyados sobre marcos de acero estructural. La fachada principal está resuelta a base de paneles de cemento

apoyados en una estructura formada por canales de acero sujeta a las traveses y columna de la estructura. La Fig. 4 muestra la geometría del edificio en planta y elevación del modelo en estudio.



**Figura 4:** Planta y elevación de la edificación en estudio.

La fachada principal de la edificación se muestra en la Fig. 5. El número de habitaciones afectadas por la entrada de agua es de 4 por nivel, y el tamaño de las ventanas y componentes de fachadas es 2.8 m x 2.0 m y 2.0 m x 1.0 m, respectivamente.



**Figura 5:** Fachada principal de la edificación, barlovento.

Se ha considerado a la cara a barlovento como la de análisis debido a que esta situación se hace presente al considerar el coeficiente de presión, el cual puede tomar valores negativos o positivos de acuerdo a la dirección de la fuerza del viento (Simiu & Scanlan., 1996).



**Figura 6:** Paneles de fachada dañados en un hotel en Los Cabos, BCS, México (Chávez, et al., 2015).

La resistencia a la fractura para una carga distribuida en los paneles es  $244 \text{ kg/m}^2$  (www.usg.com.mx) y la capacidad al arranque de los tornillos de calibre 20 es  $101.97 \text{ kg}$  (www.gpgypsum.com). Como la resistencia del vidrio no es relevante (Izumi, 2009,

www.amevec.com.mx, ASTM, 2005, ASTM, 2006, Kiesling & Tanner, 2005) los daños típicos inducidos por el viento en México (www.amevec.com.mx) son debidos a un anclaje inadecuado para los paneles de las fachadas y ventanas ya que los tornillos utilizados son demasiado pequeños, con longitudes de anclaje cortos, como se puede apreciar en un hotel construido en Los Cabos, BCS, México (Chávez, et al., 2015). La separación de tornillos de 0.3 m se tomó como distancia de instalación para este hotel de acuerdo con las prácticas de construcción típicas como se observa en la Fig. 6, y con lo especificado por los manuales de instalación del fabricante (www.usg.com.mx).

La presión de falla en los sujetadores de los paneles se traduce como el producto del área tributaria correspondiente a cada tornillo por la carga que genera el viento para cada escenario de velocidad.

### Curvas de fragilidad para escenarios de daño

Dado el modelo y asumiendo que las fuerzas actuantes y la fuerzas resistentes presentan una distribución tipo lognormal (Ang & Tang, 1984), la probabilidad de daño es evaluada usando la siguiente expresión para el índice de confiabilidad (Rosenblueth, 1986).

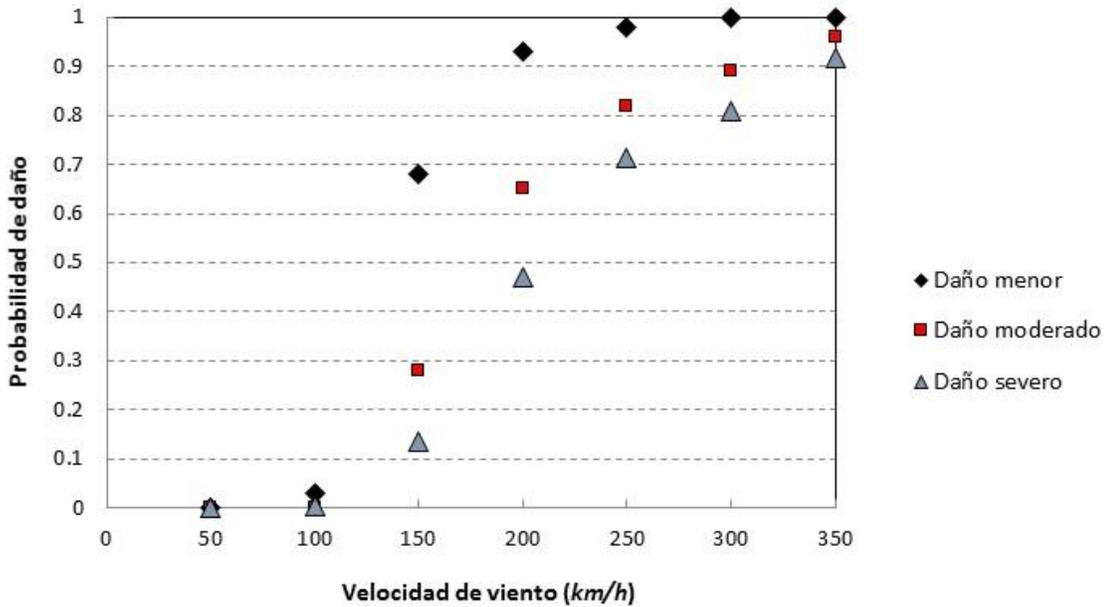
$$\beta = \frac{(\ln r_m - \ln c_m)}{\sqrt{\zeta_r^2 + \zeta_c^2}} \quad (6)$$

donde  $r_m$  y  $c_m$  son la media de la resistencia y de la fuerza actuante y  $\zeta_r$  y  $\zeta_c$  son las medidas de dispersión de la carga actuante y la resistencia, respectivamente. Las medias de la capacidad de los tornillos se obtienen de la información reportada por los fabricantes (www.usg.com.mx, www.gpgypsum.com), mientras que las presiones actuantes se obtienen utilizando los valores en la Tabla 1. Las medidas de dispersión se toman como 0.1 para las capacidades (panel o tornillos) y 0.3 para la presión actuante (Vickery, Lin, Skerlij, Twisdale Jr., & Huang, 2006) para los diferentes escenarios de viento. La probabilidad de falla se evalúa como una función del índice de confiabilidad, expresada como:

$$P_D = \phi(-\beta) \quad (7)$$

donde  $\phi(.)$ =valor de la función de distribución acumulada estándar normal.

Se calcula la probabilidad de falla para cada modo de daño potencial y se elige el máximo valor para el correspondiente estado de daño y el escenario de la velocidad de viento. Los resultados se muestran en la Fig. 7.



**Figura 7:** Curvas de fragilidad para los estados de daño en la edificación.

### Curvas de pérdidas económicas

Una vez obtenidas las probabilidades de falla y los costos de las consecuencias de daño (reparación de fachadas, puertas y ventanas, la pérdida de los contenidos y la interrupción de las actividades comerciales), las curvas de pérdidas económicas pueden ser trazadas.

Se ha tomado un costo de construcción de la fachada como el 11% del costo total de la edificación mientras que el costo de las ventanas y puertas es de aproximadamente el 2% (Gutiérrez Pérez, 1970). De acuerdo con los costos típicos de construcción para un hotel en México ([www.neodata.mx](http://www.neodata.mx)), el costo de construcción de una edificación de 10 pisos es aproximadamente de 4 millones USD. Por lo tanto, el costo de fachadas es de 0.44 y el de las ventanas y puertas de 0.08 millones USD, respectivamente.

El costo de cortinas, alfombra, camas y aparatos electrodomésticos en el interior de un habitación del hotel se estima con un costo de 4,000 USD por cuarto afectado de acuerdo con un análisis de costos de insumos ([www.neodata.mx](http://www.neodata.mx)) y, si el número de habitaciones afectadas es de 40, el costo total de los contenidos dañados es de 0.16 millones USD.

También, la interrupción de las actividades comerciales es un componente importante de las pérdidas económicas para el costo del hotel en estudio, y se obtiene como resultado de las pérdidas de ingresos durante el periodo de reparación de la edificación.

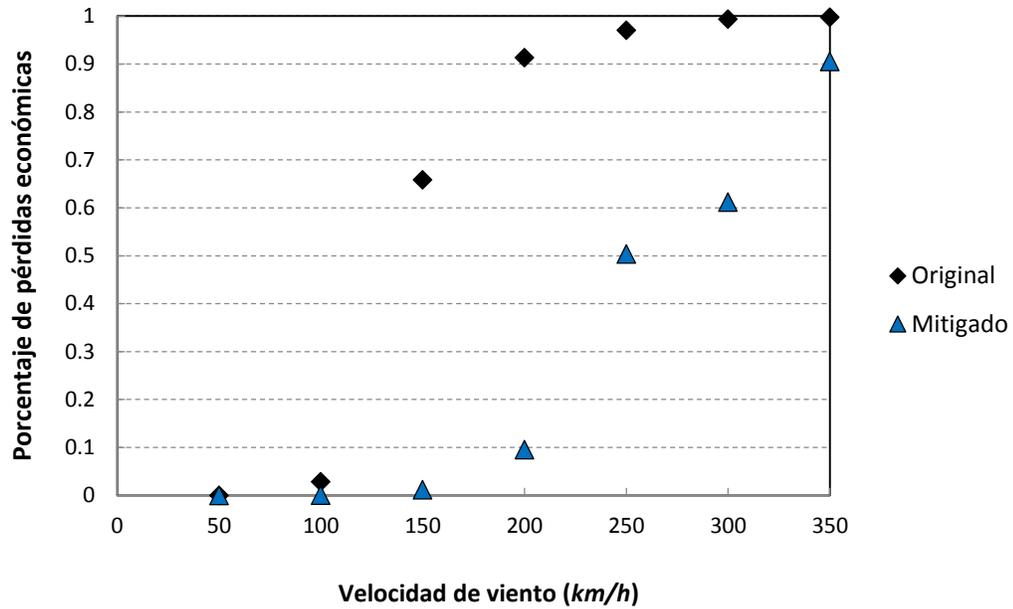
Estas pérdidas de ingresos se estiman multiplicando el número de habitaciones afectadas (120) por el costo promedio de alojamiento por cuarto (200 USD por día) y por el número de días necesarios para las reparaciones del hotel. Esto representa 4.3 millones USD y el costo total de pérdidas  $L_T$  es, por lo tanto, de aproximadamente 5 millones USD.

El porcentaje de pérdidas se calcula como:

$$L_p = \frac{[P_1(FC + BIC) + P_2(CC) + P_3(WC)]}{L_T} \quad (8)$$

Donde  $FC$  es el costo de fachadas;  $BIC$  el costo generado por la interrupción de los servicios del hotel;  $CC$  el costo de los contenidos y  $WC$  el costo de las ventanas.

Se obtiene una gráfica con dos curvas de pérdidas económicas esperadas, una con las medidas de mitigación implementadas considerando en la práctica proporcionar mayor resistencia al panel de la fachada ( $420 \text{ kg/m}^2$ ) y mejor anclaje (es decir, se utilizan tornillos calibre 14,  $0.2 \text{ m}$  de separación, capacidad de arranque =  $213.12 \text{ kg}$ ) para sujetar los componentes de fachadas y ventanas; y otra con las prácticas comunes de construcción. Se observa en la Fig. 8 que las pérdidas económicas se pueden reducir significativamente aplicando las medidas de mitigación propuestas.



**Figura 8:** Pérdidas económicas para un hotel dañado por el viento en México.

## Discusión

Las estimaciones de daños y pérdidas presentadas en este trabajo corresponden a una edificación específica, la cual se describió anteriormente, diseñada con las prácticas y condiciones de México que intenta representar, en general, las edificaciones de hotel típicas expuestas a riesgo eólico severo.

Los modos de daño considerados usan prácticas deficientes de construcción tales como un deficiente anclaje de los componentes de las fachadas y de las ventanas para fines de realizar una comparación entre el caso de la práctica actual y el caso en que se incorporan mejores prácticas de construcción.

De los tres modos de daño considerados en este estudio (falla del panel, arranque de los tornillos del panel y falla en el anclaje de las ventanas), el modo dominante fue el de la falla de los tornillos ya sea en el panel de la fachada o de las ventanas. Una vez que el huracán golpea el área, la probabilidad de tener infiltraciones de agua en las habitaciones del hotel se evalúa a través del modelo de precipitación de un modelo normalmente distribuido (Fig. 3) y este evento impacta la pérdida de los contenidos del hotel.

La práctica de mejorar las condiciones de anclaje para ambos: paneles de fachadas y ventanas no es costosa y tiene beneficios significativos, la baja relación costo-beneficio de tales medidas debería ser un factor motivador para introducir dichas mejoras.

El procedimiento incluye la incertidumbre en las condiciones de la velocidad del viento, y las presiones resultantes, y las resistencias de los paneles de las fachadas y las ventanas.

Además, se consideran explícitamente las pérdidas correspondientes al daño de los contenidos y la interrupción de las actividades comerciales.

Los resultados tienen aplicación al tipo de peligro eólico correspondiente a la zona de Los Cabos, BCS; otras condiciones en México, u otros países, deberían ser considerados mediante estudios específicos.

## **Conclusiones**

El modelo estima el nivel de daño y pérdidas potenciales de un hotel expuesto al impacto de vientos huracanados considerando la entrada de agua en las habitaciones del hotel y la interrupción de las actividades comerciales durante el periodo de reconstrucción.

Las curvas de fragilidad y curvas potenciales de daño han sido desarrolladas para varios escenarios típicos de velocidades de viento huracanados, en un sitio de México, con el fin de evaluar los niveles esperados de daños y pérdidas económicas, y puede servir de modelo para casos futuros en zonas con riesgos eólicos altos y para construcciones similares a la que se ilustra en este trabajo.

De acuerdo con las curvas de fragilidad de la construcción se puede vislumbrar que comienza a reflejarse una variación considerable para los estados de daño a partir de una velocidad de viento 150 kph, tal y como se muestra en la Fig. 7.

Se muestra que las pérdidas económicas pueden ser del orden superior a los 5 millones USD para el caso específico considerado en Los Cabos, Baja California Sur, México. Siendo el componente de costo más significativo el correspondiente al periodo de interrupción de las actividades comerciales que, para el caso considerado, fue de seis meses y cuyo valor aproximado corresponde al 86% del costo total de pérdidas económicas.

Las medidas de mitigación recomendadas pueden reducir sustancialmente la magnitud de las pérdidas económicas siendo la inversión de mitigación de muy baja magnitud, comparado con la gran disminución de daños.

La contribución de esta investigación radica en usar una distribución de probabilidad para lluvia que acompaña las ráfagas de viento durante un huracán y en introducir el costo de la interrupción del servicio, así como el costo de inundación y la modificación de distribución de presiones luego que han sufrido daños los elementos de la fachada, en un metodología que ha sido propuesta por investigadores para el análisis de la vulnerabilidad de casas-habitación en los Estados Unidos de

América (HAZUS). Asimismo, la adaptación de la metodología a un edificio alto (10 niveles) dado que la metodología HAZUS fue originalmente desarrollada para casas-habitación.

## **Recomendaciones**

Es conveniente continuar en el tema estudiando otros tipos de estructuras, sujetas a diferentes intensidades de riegos eólicos y otros usos de las edificaciones, para generalizar las recomendaciones y actualizar las disposiciones de reglamentos, este tipo de estructuras podrían ser fachadas de estadios deportivos, anuncios espectaculares, etc.

Se recomienda analizar las otras caras de la edificación; sotavento o las laterales, para determinar el nivel de vulnerabilidad respecto al caso analizado.

Es importante incluir, para otros estudios, los daños económicos que sufre la edificación debido a los elementos que son arrastrados por el viento y que impactan contra la fachada de la edificación.

Un trabajo a futuro es revisar la existencia de correlación entre la presión del viento en la edificación y la precipitación generada por la acción del huracán.

Es conveniente realizar un modelo más detallado de la entrada de agua en las habitaciones del hotel considerando además la dirección del viento.

## **Referencias**

[1] Ang, A.H-S. & Tang, W. H. (2007), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, 2nd. Ed, Vol. I – Emphasis on civil and environmental engineering*. New York: John Wiley and Sons.

[2] ASTM Designation E 1996-09 (2009). Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Windborne Debris in Hurricanes. Pennsylvania, USA.

[3] ASTM Designation: E 1886-05, (2005). Standard Test Method for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Missile(s) and Exposed to Cyclic Pressure Differentials. Pennsylvania, USA.

- [4] Breña-Naranjo J., Pedrozo A. A., Pozos E. O., Jiménez L. S. y López L. M., (2015) The contribution of tropical cyclons to rainfall in Mexico, *Physics and Chemistry of the Earth*, article in press, Elsevier.
- [5] CENAPRED-CEPAL. (2006). *Características e impacto socioeconómico de los huracanes Stan y Wilma en la República Mexicana en el 2005*. México, D.F.
- [6] CFE (2008). Manual de diseño de obras civiles - Diseño por viento. México, D.F.
- [7] Chávez M., García N., Jaimes M. A., López A., Muriá D., Nava S., Peña F., Pérez J. J., [8] Pozos A., Reinoso E. y Sánchez J. (2015). El huracán Odile y sus efectos en la infraestructura del sur de la península de Baja California, SID (696) Serie Investigación y desarrollo, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- [9] Crandell, J. H., et al. (1993). Assessment of damage to single-family homes caused by Hurricanes Andrew and Iniki, Contract HC-5911, NAHB Research Center, Upper Marlboro, Md., for U.S. Dept. of Housing and Urban Development Office of Policy Development and Research.
- [10] Ellingwood, B. R., Rosowsky, D. V., Li, Y., & Kim, J. H. (2004). Fragility Assessment of Light-Frame Wood Construction Subjected to Wind and Earthquake Hazards. *Journal of Structural Engineering*, 1921-1930.
- [11] Filliben, J. J., Gurley, K., Pinelli, J.-P., & Simiu, E. (2002). Fragility curves, damage matrices, and wind induced loss estimation. *Third International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation* (pp. 119-126). Sintra, Portugal: National Institute of Standards and Technology.
- [12] Gobierno del DF (2004). NTC, Normas de Viento, México, D.F.
- [13] Gutiérrez Pérez, M. (1970). Análisis Estadístico de costos de edificios. *Ingeniería Civil*.
- [14] <http://neodata.mx/page/param-tricos>.
- [15] <http://www.amevec.com.mx>, Asociación Mexicana de ventanas y cerramientos, Boletín Vidrio templado, Dic., 2015
- [16] <http://www.gpgypsum.com>, Tablamiento marca DUROCK®, Dic, 2015.
- [17] <http://www.usg.com.mx>, Línea de tornillos para sistema DUROCK®, Dic., 2015.
- [18] Iizumi E. and Kopp G. (2009) Full-scale tests of glass plate under fluctuating wind loads, *11<sup>th</sup> Americas Conference on Wind Engineering*, San Juan de Puerto Rico.
- [19] Jiménez Espinoza, M., Matías Ramírez, L. G., Fuentes Mariles, O. A., y Prieto González, R. (2014). *CICLONES TROPICALES*. México, D.F.: CENAPRED MEXICO.

- [20] Kiesling, E. W. and Tanner, L. (2005). INVESTIGATION OF WIND PROJECTILE RESISTANCE OF EMMEDUE M2 PANELS. Test Report. Wind Science and Engineering Texas Tech University, USA.
- [21] Lima I. (2015) Estimación del daño en ventanas de edificios debido a vientos intensos, *XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, México.
- [22] *National Hurricane Center*. (2015, 11 21). Retrieved 11 21, 2015, from <http://www.nhc.noaa.gov/outreach/history/#galveston>
- [23] Pennington Vann, W., & McDonald, J. R. (1978). *An Engineering Analysis: Mobile Homes in Windstorms*. Lubbock, Texas.: Institute for Disaster Research, Texas Tech University.
- [24] Rosenblueth E. (1986). Optimum reliabilities and optimum design, *Structural Safety*, 3, 69-83.
- [25] Servicio Meteorológico Nacional. (n.d.). *Comisión Nacional de Agua*. Retrieved 2015, de <http://smn.cna.gob.mx>
- [26] Simiu, E., & Scanlan, R.H., (1996). *Wind Effects on Buildings and Structures Fundamentals and Applications to Design, third ed.* Wiley-Interscience, 688pp.
- [27] Sturges, H. A. (1926). The choice of a Class Interval, *J. Am. Statist. Assoc.*, vol. 21, págs. 65-66.
- [28] Vickery, P. J., Lin, J. X., Skerlj, P. F., Twisdale, L. A., & Huang, K. (2003). HAZUS-MH hurricane model methodology. I: Hurricane hazard, terrain and wind load modeling. *Nat. Hazards Rev.*, 7(2), 82-93.
- [29] Vickery, P. J., Skerlj, P. F., Lin, J. X., Twisdale, L. A., Young, M. A., & Lavelle, F. M. (2006). HAZUS-MH hurricane preview model methodology. II: Damage and loss estimation. *Nat. Hazards Rev.*, 7(2), 94-103.

## **ANEXO**

**Universidad Autónoma del Estado de México**  
**Facultad de Ingeniería**

**Coordinación de Estudios Avanzados**

**Protocolo de Tesis de Maestría**

**I. Datos Generales.**

<b>Programa de estudio</b>	<b>Maestría en Ciencias de la Ingeniería</b>
<b>Tesista</b>	<b>Gerardo Lazcano Sánchez</b>
<b>Tutor Académico</b>	Ph.D. David de León Escobedo
<b>No. De revisión<sup>1</sup></b>	1 <sup>a</sup> <input type="checkbox"/> 2 <sup>a</sup> <input checked="" type="checkbox"/> 3 <sup>a</sup> <input type="checkbox"/>

1 a verificar por el coordinador del programa

**II. Título y resumen.**

<b>Título</b>
Evaluación Probabilista de la Seguridad Estructural de Conexiones en Edificios de Acero expuestos a Riesgo Eólico.

<b>Resumen</b>
<p>Se presenta una herramienta de decisión basada en riesgo para seleccionar el tipo de conexiones en una estructura de acero a base de marcos resistentes a momentos sujeta a fuerzas eólicas considerando los costos del ciclo de vida como un criterio de decisión. La formulación propuesta puede ser empleada por diseñadores para seleccionar la configuración de los tipos de conexiones óptimas y servir como base de actualización de los códigos y normas de construcción vigentes. Para la edificación particular considerada, se analiza el tipo de conexión más conveniente entre una conexión soldada, una atornillada o una combinación de ambas, desde el punto de vista de efectividad de costos y desempeño estructural.</p> <p>La selección se basa en una comparación cuantitativa de los costos de consecuencia de las fallas y daños potenciales de la edificación y de los beneficios involucrados en la probabilidad de sobrevivencia de la construcción. Este enfoque es particularmente útil para las construcciones de acero con gran cantidad de conexiones o con un alto valor de consecuencias de daño en ellas, tomando como referencia balances específicos de pérdidas-beneficios, que permitan obtener el mejor diseño de acuerdo con su comportamiento estructural ante la acción de cargas eólicas de magnitud significativa.</p>

**III. Objetivos.**

<b>Objetivo General</b>
Aplicar una metodología de diseño basada en confiabilidad estructural y en los costos esperados en un edificio de acero para seleccionar el tipo de conexiones con mejor desempeño estructural y el mejor beneficio ante fuerzas eólicas que generen un menor costo en el ciclo de vida de la edificación.

<b>Objetivos Específicos</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Proponer configuraciones de conexiones para las uniones viga-columna de la edificación.</li><li>• Obtener la respuesta estructural de las conexiones en estudio ante cargas laterales originadas por la acción del viento.</li><li>• Generar el modelo del elemento finito de las conexiones para conocer los diferentes niveles de esfuerzos y rigidez desarrolladas en las mismas.</li><li>• Calcular el costo esperado en el ciclo de vida de la edificación para las distintas alternativas de conexiones propuestas.</li></ul>

- Recomendar la configuración más adecuada para la estructura y cargas consideradas.

#### IV. Planteamiento.

##### Introducción

En la estructuración para edificaciones de acero, los marcos de acero resistentes a momento han sido populares en muchas regiones sujetas a cargas laterales por varias razones. Primero, los marcos momento han sido vistos como sistemas altamente dúctiles. Segundo, los marcos momento son comúnmente empleados debido a su versatilidad arquitectónica ya que no hay elementos de arriostramiento presentes que interfieran con huecos en las paredes, proporcionando una flexibilidad máxima para la utilización del espacio [1].

Un marco de acero resistente a momento está compuesto por tres elementos básicos: vigas, columnas y las zonas de panel entre viga-columna. La zona panel es la porción de la columna contenida dentro de la región de la junta en la intersección de la viga-columna [1].

La conexión viga-columna que transforma momentos y fuerzas cortantes es un componente vital de las estructuras de acero altas ya que las propiedades de la conexión tienen un impacto significativo en la capacidad de resistencia última, rigidez y estabilidad de toda la estructura [2].

Usualmente el estado límite de falla se enfatiza en las recomendaciones de diseño [3] pero, dada la magnitud y extensión de los daños producidos por algunas sollicitaciones (sismos o huracanes), y el tiempo que permanece la estructura fuera de servicio durante las reparaciones, el estado límite de servicio debería también ser tomado en consideración [4].

La confiabilidad estructural y el costo del ciclo de vida sirven como herramientas de medición de la relevancia costo/beneficio de varias conexiones de acero alternativas y para balancear la relación entre la seguridad requerida y los costos que surgen a consecuencia de los daños originados.

##### Antecedentes y/o justificación

Un breve repaso de la bibliografía técnica de la ingeniería de las últimas décadas permite percatarse de que abundan las referencias a las fallas estructurales causadas por la acción del viento [5]. Tal vez las más relevantes han sido las fallas de puentes, como la del Tay Bridge en Escocia en 1879 (que causó la muerte de 75 personas), y la de Tacoma Narrows Bridge (Tacoma Washington), en 1940. Ha habido también algunas fallas desastrosas en edificios debidas al viento durante el mismo periodo, como la del Union Carbide Building en Toronto, en 1958 [6].

Estas fallas estructurales y algunas otras ocurridas, en décadas recientes, en las edificaciones por la acción de las fuerzas de eventos naturales tales como, sismos, huracanes y tormentas, han suscitado nuevas interrogantes sobre el comportamiento estructural de las edificaciones que han resultado afectadas. Diversos eventos de la naturaleza han hecho evidente el comportamiento frágil de conexiones de acero en marcos diseñados para resistir fuerza lateral.

Entre las diversas sollicitaciones a las que puede estar sujeta una estructura se encuentra el viento [7]. El viento es un movimiento horizontal de masas de aire debido a diferencias de presión en las distintas zonas de la atmósfera y a la rotación terrestre [8]. Las magnitudes de las cargas de viento varían con la localidad geográfica, las alturas sobre el nivel del terreno, los tipos de terreno que rodean a los edificios, incluyendo otras estructuras y algunos otros factores. Por lo general se supone que las presiones del viento se aplican uniformemente a las superficies de barlovento de los edificios y que pueden proceder de cualquier dirección.

Estas hipótesis no son muy precisas ya que las presiones suelen no ser uniformes sobre grandes áreas. Por ejemplo, cerca de las esquinas de los edificios probablemente son mayores que en cualquier otra zona.

Una falla frecuente se debe a que después de diseñar cuidadosamente los miembros de la estructura, se seleccionan, sin tanto cuidado, conexiones que pueden no ser lo suficientemente rígidas y resistentes [6]. Los ingenieros que realizan a veces el trabajo de seleccionar las conexiones no tienen la experiencia o sensibilidad de procurar un balance entre rigidez y resistencia, quizás no tienen un conocimiento suficiente de las dificultades que surgen en el diseño de las conexiones. Tal vez el error que se comete con más frecuencia es despreciar algunas de las fuerzas que actúan en éstas, por ejemplo, los momentos torsionantes.

#### **Definición del problema**

En México, a pesar de que se ha avanzado en la investigación sobre la selección del tipo de conexión apropiada en una edificación, el tema es todavía un problema por resolver. Un interés especial se ha dado al comportamiento frágil de conexiones de acero, especialmente después de la gran cantidad de daños en conexiones experimentados debido a fuerzas laterales originadas por el sismo de Northridge ocurrido en California en 1994. El Proyecto SAC [9], desarrollado en los Estados Unidos bajo la coordinación de la FEMA (*Federal Emergency Management Agency*), proporciona ideas que mejoran el entendimiento del comportamiento de conexiones soldadas, sin embargo, aún falta mucho por comprender e investigar.

Una vez establecido lo anterior se hace la siguiente pregunta, la cual será el eje rector de la investigación: ¿Qué tipo de conexiones presentan un mejor desempeño estructural ante riesgo eólico, tomando en consideración la relación costo/beneficio de la edificación en estudio?

#### **Hipótesis**

Las técnicas de confiabilidad muestran que las conexiones de acero mixtas presentan un mejor desempeño estructural que las conexiones soldadas y las conexiones atornilladas, obteniéndose así una mejor relación costo/beneficio.

#### **Alcances y limitaciones**

Los alcances y las limitaciones de la investigación se definen a continuación:

- Realizar el análisis estructural de un edificio regular típico de acero estructurado a base de marcos resistentes a momentos que tiene 31 metros de altura localizado en la Isla de Cozumel, en Quintana Roo.
- Analizar conexiones a base de tornillos, soldadura y mixtas para las uniones viga-columna ya que puede utilizarse para edificios altos en los que la resistencia al viento se desarrolla proporcionando continuidad entre los miembros de la estructura del edificio.
- Las condiciones ambientales y topográficas para la determinación de la acción del viento, corresponderán a la zona de la Isla de Cozumel, Quintana Roo.
- No serán analizadas conexiones flexibles para las uniones vigas-columna.

#### **Metodología**

Se propone un análisis probabilista para evaluar el riesgo eólico sobre una edificación típica de acero con conexiones soldadas, atornilladas o mixtas. Para el riesgo eólico, se toma el caso crítico de la Isla de Cozumel en el Estado de Quintana Roo para determinar las demandas de fuerza en la misma edificación para distintos escenarios de velocidad máxima de viento. Con ello y con las probabilidades de ocurrencia de las velocidades máximas de viento, se calculan las probabilidades de falla de la estructura en términos de los niveles de daño y se comparan con los rangos aceptables obtenidos como una función del nivel de consecuencias de falla o de daño.

Para modelar las velocidades máximas de viento, se usa la distribución extrema tipo I [10] para vientos en Cozumel para simular las fuerzas en la construcción.

Las técnicas de Monte Carlo se utilizan para generar una serie de respuestas máximas ante velocidades máximas del viento y, con estas estadísticas y el modelo estructural de la conexión, se obtienen estadísticas de las máximas respuestas generadas de manera aleatoria. Los histogramas de momentos máximos y de fuerzas cortantes máximas se calculan con estas estadísticas y, utilizando la función apropiada de estado límite para el tipo de conexión dada, se generan las probabilidades de daño y falla para distintos escenarios. Estas probabilidades se introducen en las relaciones del ciclo de vida y costo-beneficio para varios tipos de conexiones y el tipo óptimo de conexión se obtiene comparando los diferentes costos esperados del ciclo de vida. El mínimo del costo esperado del ciclo de vida corresponde al tipo de conexión óptima. Los costos de daño incluyen los costos de reparación y las pérdidas por las fatalidades y lesiones potenciales, daños e interrupción de las actividades comerciales. Los resultados pueden también ser útiles, después de extender la aplicación a varios tipos de edificios y varios niveles de exposición eólica, para actualizar las especificaciones de diseño de estructuras de acero en las zonas sujetas ante riesgo eólico en México.

## V. Plan de trabajo.

### Temática propuesta

#### **Introducción.**

#### **Antecedentes.**

Describir el estado actual de las normas y especificaciones vigentes en materia de diseño de conexiones y dar una breve resumen de las fallas que se han originado por la acción del viento, así mismo los estudios que se han realizado referentes al comportamiento de las conexiones en edificios de acero.

#### **Capítulo 1. Formulación de los criterios de decisión.**

Objetivo capítulo 1. Presentar el criterio de decisión utilizado para seleccionar el tipo de conexión con un mejor desempeño estructural.

#### **Capítulo 2. Aplicación a una edificación de acero en México.**

Objetivo capítulo 2. Aplicación de la metodología a la edificación bajo estudio, y análisis de conexiones basadas en desempeño y confiabilidad estructural así como el análisis de costos.

#### **Resultados.**

#### **Conclusiones.**

#### **Recomendaciones.**

#### **Referencias.**

#### **Apéndices.**

### Referencias

- [1] Bruneau, M., Uang, C.-M., and Whittaker, A. (1998). *Ductil Design of Steel Structures*. The McGraw-Hill Companies.
- [2] Nannan, Z., and Lai, W. (2010). Nonlinear Finite Element Computation on Semi-rigid Connection and Steel Frame. *Third International Conference on Information and Computing*.
- [3] Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2008). *MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES Diseño por viento*.
- [4] De León, D., Reyes, A., and Yu, C. (2013). Probabilistic assessment of connections for steel buildings on seismic zones. *Journal of Constructional Steel Research*.
- [5] Simiu, E., and H. Scanlan, R. (1978). *Wind effects on structures: An introduction to wind engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- [6] K. Nelson, J. J., and C. McCormac, J. (2006). *Análisis de Estructuras*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- [7] Holmes, J. D. (2003). *Wind Loading of Structures*. Spon Press.
- [8] Meli Piralla, R. (2006). *Diseño Estructural*. Mexico: Limusa.
- [9] SAC project (1994): <http://quiver.eerc.berkeley.edu:8080/library/index.html>
- [10] R. Benjamin, J., and Cornell, C. A. *Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil*. McGraw-Hill.

**Cronograma en meses**

<b>Actividad</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>	<b>M10</b>	<b>M11</b>	<b>M12</b>
1. Revisión bibliográfica de fallas en conexiones de acero.	■	■										
2. Determinación de cargas de diseño en la edificación.		■	■									
3. Modelación de la estructura y conexiones en estudio.			■	■	■	■						
4. Determinación de la respuesta estructural del edificio ante cargas eólicas.						■	■					
5. Análisis de las conexiones por medio del MEF.							■	■	■			
6. Obtención de resultados.									■	■		
7. Generación de recomendaciones de diseño estructural de conexiones de acero.											■	■
8. Elaboración del informe de la investigación.			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

**Nombre y firma del tesista**

**Nombre y firma del Tutor Académico**

Gerardo Lazcano Sánchez

Ph.D. David de León Escobedo