

# Proposal for the future design code for seismic isolation of buildings in Colombia

Carlos Mario Piscal-Arévalo <sup>a</sup> & Francisco López-Almansa <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Programa de Ingeniería Civil, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. [cpiscal@unisalle.edu.co](mailto:cpiscal@unisalle.edu.co)

<sup>b</sup> Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. [francesc.lopez-almansa@upc.edu](mailto:francesc.lopez-almansa@upc.edu)

Received: May 19<sup>th</sup>, de 2018. Received in revised form: October 11<sup>th</sup>, 2018. Accepted: November 2<sup>nd</sup>, 2018

## Abstract

There are no local regulations in Colombia for the design of buildings with seismic (base) isolation; the limited number of base isolated buildings that exist in Colombia have been designed with some of the American documents endorsed by the Colombian seismic design code (NSR-10). However, using in Colombia foreign regulations without a detailed analysis of their suitability for the local conditions, might generate serious technical inconsistencies and economic overheads that prevent the expansion of seismic isolation, despite its great advantages. This work discusses the most recent two versions of the American regulation ASCE 7 (2010 and 2016), identifies disagreements with the NSR-10 regulation, and proposes criteria for analysis and design of buildings with seismic isolation in Colombia.

*Keywords:* seismic isolation; Colombia; USA; seismic design code; NSR-10; ASCE 7.

# Propuesta para la futura norma de aislamiento sísmico de edificaciones en Colombia

## Resumen

En Colombia no existe una normativa propia para el diseño de edificaciones con aislamiento sísmico de base; el limitado número de edificios aislados existentes en el país han sido diseñados según alguno de los documentos americanos que recomienda el reglamento NSR-10. Sin embargo, el uso de una normativa extranjera sin un análisis detallado de su aplicabilidad puede implicar serias inconsistencias técnicas y sobrecostos que impidan la expansión del aislamiento sísmico, a pesar de sus importantes ventajas. En este trabajo se estudian las versiones más recientes de la normativa americana ASCE 7 (2010 y 2016), se identifican las incoherencias entre estos documentos y el reglamento NSR-10, y se proponen criterios para análisis y diseño de edificios con aislamiento sísmico en Colombia.

*Palabras clave:* aislamiento sísmico; Colombia; USA; norma de diseño sismorresistente; NSR-10; ASCE 7.

## 1. Introducción

El aislamiento de base es un sistema de protección sísmica que consiste en desacoplar parcialmente en dirección horizontal la edificación de la cimentación. Se emplean para tal fin dispositivos de apoyo que poseen gran flexibilidad horizontal; estos elementos se denominan aisladores y pueden estar basados en materiales elastoméricos, en deslizamiento de elementos metálicos, o en combinaciones de ambos. Se pretende reducir las fuerzas y desplazamientos que el suelo transmite a la estructura durante el movimiento sísmico, para reducir los daños tanto en elementos estructurales como no estructurales y proporcionar así

un mejor nivel de desempeño con respecto a edificaciones con base fija.

A nivel mundial esta técnica es bastante empleada, siendo Japón el líder con más de 8000 edificaciones aisladas sísmicamente [1]. Su gran aceptación se debe, entre otras cosas, al excelente comportamiento estructural evidenciado ante sismos severos[2-5]

A medida que la técnica se ha ido desarrollando y se han evidenciado buenos resultados tales como una reducción en el nivel de daño en elementos estructurales y no estructurales, diversos países han concentrado sus esfuerzos en desarrollar normativas que rijan el análisis y diseño de este tipo de

edificaciones. Actualmente, entre algunas de las normas más importantes a nivel internacional se encuentran las de Japón, EUA, China, Europa, Italia, etc. En Latinoamérica, Chile y México cuentan con normativa para edificaciones aisladas y otros países como Perú, Ecuador y Colombia están trabajando en el tema.

Al no disponerse actualmente de una normativa propia para el país, el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10 [6]) recomienda seguir las indicaciones de documentos americanos como ASCE 7 [7] o FEMA 450 [8]. Por lo tanto, los edificios con aislamiento de base diseñados y construidos hasta el momento en Colombia (aproximadamente 30 [9]), han seguido los lineamientos de alguna de estas normas.

El uso en el país de una normativa extranjera sin un análisis previo de su aplicabilidad al contexto local, puede implicar serias inconsistencias técnicas y sobrecostos que frenen la expansión del aislamiento sísmico. Teniendo presente esta circunstancia, en este trabajo se analizan las diferencias conceptuales entre el diseño de edificaciones con base fija y base aislada, se identifican las inconsistencias entre las dos versiones más recientes de la normativa americana ASCE 7-10 [7] y ASCE 7-16 [10] y el reglamento NSR-10 [6], y se propone un conjunto de consideraciones para análisis y diseño de edificios con aislamiento sísmico en Colombia. Finalmente, mediante un ejemplo numérico, se muestra la aplicabilidad y coherencia de la estrategia propuesta.

## 2. Diferencias entre las consideraciones de diseño para edificaciones con base fija y aislamiento de base

El diseño de estructuras con aislamiento de base requiere tener en cuenta ciertas consideraciones que difieren de las habituales en edificaciones con base fija. A continuación se describen y analizan algunas de estas consideraciones.

### 2.1. Periodo fundamental y factor de amortiguamiento

El periodo fundamental de edificaciones de baja a mediana altura (20 pisos) con base fija es casi siempre inferior a 2 segundos y el amortiguamiento suele corresponder a un 5% del crítico. En edificaciones con aislamiento de base, el rango de periodos está aproximadamente entre 2 y 4 segundos y el factor de amortiguamiento puede tomar valores entre 5% y 50% del crítico (dependiendo del sistema de aislamiento seleccionado); la primera circunstancia se debe a la flexibilidad de los aisladores y la segunda a la oportunidad que brinda la concentración de deformaciones en el sistema de aislamiento.

### 2.2. Amenaza sísmica

La amenaza sísmica se representa habitualmente, tanto en edificios con aislamiento como con base fija, por espectros de diseño de pseudo-aceleración. Debido a que las edificaciones con base fija generalmente poseen periodos naturales inferiores a 3 segundos, estos espectros de diseño en ciertas ocasiones han sido construidos a partir de registros sísmicos de aceleración cuyas bajas frecuencias han sido filtradas. Sin embargo, en estructuras con aislamiento de

base, sus periodos oscilan entre 2 y 4 segundos, así que la definición de la amenaza para todo el posible rango de periodos en estudio, debe ser cuidadosamente definida y analizada para no omitir información relevante en el diseño de este tipo de estructuras.

### 2.3. Coeficiente de importancia

El coeficiente de importancia se elige en función de dos aspectos: el número de víctimas potenciales en caso de colapso de la estructura, y la relevancia de la edificación durante y después del evento sísmico [10,6]; obviamente, ninguna de estas dos cuestiones está relacionada con la existencia del aislamiento. El coeficiente de importancia afecta a la ordenada espectral y por tanto a las fuerzas sísmicas de diseño; sus valores oscilan entre 1 y 1.5, siendo este último valor considerado para edificaciones indispensables para la atención a la comunidad. En la normativa americana [7,10] y chilena [11] el coeficiente de importancia es igual a 1 en edificaciones con aislamiento de base; aparentemente este criterio se orienta a obtener un mismo nivel de desempeño para cualquier tipo de estructura que emplee esta técnica, y se apoya en reconocer que existe mayor certeza sobre el verdadero nivel de demanda impuesto sobre la estructura. Sin embargo, la normativa italiana [12] y europea [13] no comparten este punto de vista, permitiendo discriminar entre distintos niveles de importancia.

### 2.4. Desempeño sísmico

Los reglamentos de diseño sismo resistente de edificaciones con base fija exigen generalmente diferentes niveles de desempeño en función de la intensidad del sismo. En Colombia, las leyes por las cuales se adoptan dichos reglamentos (ley 400 de 1997 [14], modificada por la ley 1229 de 2008 [15], estipulan en su primer párrafo: “Una edificación diseñada siguiendo los requisitos consagrados en las normas que regulen las construcciones Sismo Resistentes, debe ser capaz de resistir, además de las fuerzas que impone su uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural, pero posiblemente con algún daño en elementos no estructurales y un temblor fuerte con daños a elementos estructurales y no estructurales pero sin colapso”. Estos criterios principalmente tienen como objetivo evitar tanto la pérdida de vidas humanas como el colapso global de las estructuras, por ende, generalmente el nivel de desempeño esperado en las edificaciones puede definirse como dual [16].

El Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10 [6]) estipula un sismo denominado de diseño, bajo el cual se espera un nivel de desempeño de seguridad a la vida (“Life Safety” LS [17]); el desempeño para un sismo mayor no se verifica explícitamente y, al igual que en otros reglamentos, se maneja implícitamente a través de la ductilidad, conseguida a través de un diseño estructural adecuado y un buen detallado de los elementos estructurales [11]. Es importante resaltar que el nivel de desempeño esperado (LS) implica una incursión importante de la edificación en el rango inelástico y por ende daños.

En NSR-10, el sismo de diseño, para edificaciones

convencionales (Grupo de uso I), tiene una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, es decir un periodo de retorno ( $T_R$ ) de 475 años. A medida que la importancia de la edificación se incrementa, el coeficiente de importancia ( $I$ ) es mayor a la unidad y por ende el diseño se hace más exigente. Ya que el coeficiente de importancia afecta a las ordenadas del espectro de diseño, su aumento puede interpretarse como un incremento en la aceleración del movimiento sísmico considerado y, por tanto, cuando la importancia de la edificación es mayor, el periodo de retorno del evento sísmico de diseño se incrementa. Se puede mencionar como ejemplo el coeficiente de importancia de 1.5 para edificaciones indispensables; éste equivale aproximadamente en Colombia a considerar un sismo de diseño con una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, es decir un periodo de retorno de 2475 años [10,18,19].

En conclusión, puede interpretarse que, de acuerdo a NSR-10 [6], el nivel de desempeño esperado para cualquier tipo de edificación con base fija es el mismo (LS); sin embargo, el periodo de retorno del sismo de diseño bajo el cual se espera dicho desempeño cambia, siendo más alto en edificaciones catalogadas como indispensables para la comunidad (durante o después de un evento sísmico) y en edificaciones con gran número de ocupantes. Esta visión puede tener otra interpretación equivalente: frente a un sismo con un periodo de retorno dado, a una edificación indispensable se le exige un mejor nivel de desempeño que a una edificación convencional.

La Tabla 1 muestra el nivel de desempeño exigido en edificaciones con base fija para grupos de uso I y IV. En éstos, el nivel de desempeño de seguridad a la vida (LS) se espera cumplir para un sismo moderado ( $T_R = 475$  años) y fuerte ( $T_R = 2475$  años), respectivamente. Ello implica que si se analizase el desempeño de las edificaciones únicamente para el sismo moderado ( $T_R = 475$  años), dicho desempeño sería mejor para las edificaciones del grupo de uso IV. Se resalta que, en todos los casos, bajo un sismo mayor al de diseño el nivel de desempeño de prevención de colapso (“*Collapse Prevention*” CP [17]) se pretende alcanzar indirectamente mediante los requisitos de ductilidad.

Es obvio que el aislamiento sísmico tiene como uno de sus principales objetivos mejorar el desempeño presentado por las edificaciones con base fija, y así lo entienden los códigos de diseño. Tal como se observa en la Tabla 2, el nivel de desempeño de una edificación aislada ( $a$ ) para el sismo moderado y fuerte es más exigente que para una de base fija ( $f$ ). Para un sismo moderado, por ejemplo, a la primera se le exige adicionalmente que no se presente daño significativo

Tabla 1. Desempeño sísmico esperado para edificaciones con base fija, grupos de uso I y IV.

Sismo	Nivel de desempeño			
	Operacional (FO)	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad a la vida (LS)	Prevención del colapso (CP)
Frecuente*	●	●	●	●
Moderado**	●	●	●	●
Fuerte***	●	●	●	●

Fuente: Adaptado de [6], [7], [20]

(\*)  $T_R = 72$  años; (\*\*)  $T_R = 475$  años; (\*\*\*)  $T_R = 2475$  años

Tabla 2. Desempeño sísmico esperado para edificaciones con base fija y edificaciones con aislamiento de base

Medida del desempeño	Sismo		
	Menor	Moderado	Fuerte
<b>Seguridad a la vida:</b> No se espera pérdida de vidas o serias lesiones	$f, a$	$f, a$	$f, a$
<b>Daño estructural:</b> No se espera daño estructural significativo	$f, a$	$f, a$	$a$
<b>Daño no estructural:</b> No se espera daño significativo a los elementos no estructurales ni al contenido	$f, a$	$a$	$a$

Fuente: Adaptado de [10]

en el contenido y en los elementos no estructurales; en general, para alcanzar estos requisitos el comportamiento de la estructura debe ser lo más cercano posible a un comportamiento elástico.

### 2.5. Coeficiente de capacidad de disipación de energía

En edificaciones con base fija, la generalmente importante incursión de las estructuras en el rango inelástico implica daño y por ende disipación de energía. De ahí que en NSR-10 [6] se estipulen valores del coeficiente de capacidad de disipación de energía ( $R$ ) que pueden llegar hasta 7. El nivel de desempeño más exigente para estructuras aisladas se expresa en los reglamentos de referencia a nivel internacional con factores significativamente más bajos que en estructuras con base fija. Esto es coherente con la exigencia de un mayor nivel de desempeño, ya que implica que las estructuras aisladas tengan una incursión menor en el rango inelástico y por ende menores daños.

ASCE 7 recomienda emplear como factor de ductilidad en estructuras aisladas:

$$2 \geq \frac{3}{8} R \geq 1 \tag{1}$$

En esta expresión  $R$  es el valor empleado para edificaciones convencionales.

ASCE 7-16, en la excepción del numeral 17.5.2, permite emplear valores de  $R$  mayores que 2; sin embargo, desde el punto de vista de los autores esto iría en contra del nivel de desempeño esperado en este tipo de edificaciones.

### 2.6. Irregularidades

Las irregularidades afectan considerablemente el diseño de edificaciones con base fija, sin embargo algunas de estas presentan menor relevancia en el comportamiento estructural de edificaciones con aislamiento de base, siendo posible suprimirlas en ciertos casos como en la presencia la irregularidad por torsión.

### 3. Inconsistencias entre ASCE 7 y NSR-10

En la actualidad el reglamento NSR-10 [6] en el numeral A.3.8 indica: “*Se permite en el país el empleo de estructuras*

aisladas sísmicamente en la base, siempre y cuando se cumplan en su totalidad los requisitos al respecto de uno de los documentos siguientes: (a) “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C., USA, 2004, (b) “Minimum Design Loads for Building and Other Structures”, ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006.”. Al ser el documento ASCE, una referencia relevante para el país en cuanto a requisitos para el diseño y construcción de edificaciones sismo resistentes se refiere, el capítulo 17 de este documento (*Seismic design requirements for seismically isolated structures*) ha sido analizado detenidamente para definir si es directamente aplicable para el diseño de edificaciones con aislamiento de base en Colombia o si requiere modificaciones debido a posibles inconsistencias que se puedan presentar entre dicho documento y el reglamento NSR-10 [6]. Es importante anotar que en el numeral A.3.8 de NSR-10 se menciona la versión 2005 del documento ASCE 7; sin embargo al día de hoy se cuentan con versiones más actualizadas, como la 2010 [7] y la 2016 [10], las cuales incorporan resultados de investigaciones recientes en el tema de interés y por tanto son las que han sido analizadas en este trabajo.

Se presentan a continuación algunas inconsistencias identificadas entre la aplicación del capítulo 17 de las versiones más recientes de ASCE 7 y el Reglamento NSR-10, en cuanto se refiere al diseño de edificaciones con aislamiento de base en Colombia.

### 3.1. Espectro de diseño

Es evidente que la amenaza es diferente en cada país, por lo cual, para el diseño de cualquier tipo de edificación en Colombia, se debe recurrir al espectro de diseño de NSR-10 o a los espectros de los decretos que rigen la microzonificación sísmica para ciertas ciudades. El espectro para Colombia difiere en ciertas consideraciones de los definidos en las dos versiones más recientes del documento ASCE 7. Los espectros americanos son denominados de riesgo uniforme, los parámetros de aceleración de los movimientos sísmicos de diseño están expresados bajo una probabilidad excedencia de 2% en 50 años ( $T_R = 2475$  años) y se ajustan a un 1% de probabilidad de tener un colapso estructural en 50 años; adicionalmente los movimientos sísmicos se cuantifican como ordenadas de un espectro de aceleraciones y no como movimientos del terreno en roca que luego se convierten en ordenadas espectrales tal como lo maneja actualmente NSR-10 [6]. El espectro de NSR-10 es de amenaza uniforme y los parámetros de aceleración de los movimientos sísmicos de diseño están expresados bajo una probabilidad excedencia de 10% en 50 años ( $T_R = 475$  años). Lo anterior no implica que haya una diferencia notable en el periodo de retorno del sismo de diseño empleado en el caso de EUA y Colombia, ya que el numeral 11.4.5 de ASCE 7-16 aclara que el espectro de diseño para Estados Unidos se obtiene dividiendo los parámetros de aceleración expresados

Tabla 3.

Ejemplos donde el periodo de 1 segundo corresponde a la zona de aceleraciones constantes

Ciudad	Zona	Periodo corto $T_c$ (s)
Cali	Piedemonte	1.05
	Abanico de Meléndez y Lili	1.20
	Llanura Aluvial	1.15
Bogotá	Lacustre 50	1.33
	Lacustre 200	1.87
	Lacustre Aluvial 300	1.60

Fuente: Propia

para un periodo de retorno de 2475 años por un factor de 1.5, lo que implicaría prácticamente considerar el sismo con un periodo de retorno de 475 años.

Otra cuestión relevante es que el espectro estipulado por ASCE define dos valores de aceleración espectral para periodos cortos ( $S_s$ ) y para periodos de un segundo ( $S_1$ ), que permiten estimar las aceleraciones de diseño en las zonas de aceleraciones y velocidades constantes, respectivamente. Esta definición requiere que el período de 1 s caiga dentro del intervalo de velocidades constantes. Sin embargo, esto no es coherente con algunos espectros estipulados en NSR-10 y en la microzonificación sísmica de ciudades como Cali y Bogotá; la Tabla 3 muestra ejemplos donde el periodo de 1 segundo corresponde a la zona de aceleraciones constantes. Por otra parte, para ASCE 7 los periodos característicos de las estructuras aisladas ( $2 \leq T_a \leq 4$ ) siempre corresponden a la zona de velocidades constantes, debido a los altos valores del periodo  $T_L$  para EUA, entre 4 y 16 segundos. Esto tampoco es coherente con Colombia ya que, por ejemplo, el espectro para ciudades como Villavicencio, Manizales y Pasto, posee para un suelo tipo B, un periodo  $T_L$  de 2.4 segundos, el cual puede ser superado por los periodos fundamentales de las estructuras aisladas; esto implica que para Colombia no siempre es correcto calcular la aceleración de diseño con las expresiones correspondientes a la zona de velocidades constantes, tal como lo estipula ASCE.

Tal como se ha discutido previamente, las diferencias anteriores afectan el diseño de estructuras con aislamiento de base en Colombia, ya que a partir de dichas consideraciones el documento ASCE ha desarrollado la formulación para la aplicación del método de Fuerza Horizontal Equivalente (FHE) en estructuras aisladas. Como hecho particular, la primera edificación con aislamiento sísmico en Colombia (Clínica Amiga de Comfandi) está ubicada en Cali, en la zona de Abanico de Meléndez y Lili, donde el periodo de 1 segundo no corresponde a la zona de velocidades constantes (Tabla 3), por lo cual en este caso se deberían haber reformulado las expresiones de FHE del capítulo 17 del documento ASCE 7. Es destacable que los cálculos obtenidos por el método FHE son necesarios para el ajuste con métodos más sofisticados.

### 3.2. Sismo de diseño

Como se menciona en el numeral 3.1, para edificaciones con base fija el periodo de retorno del espectro de diseño considerado en ASCE 7 y NSR-10 es 475 años. De acuerdo con ASCE 7-10 (17.5.4.1, 17.5.4.2), en estructuras aisladas este sismo debe emplearse para el diseño de la

superestructura, subestructura y sistema de aislamiento; sin embargo, se debe verificar la estabilidad del sistema de aislamiento cuando se encuentre sometido al sismo fuerte ( $MCE_R$ ,  $T_R = 2475$  años). ASCE 7-16 (17.5.4.1, 17.5.4.2) presenta un importante cambio con respecto a su versión anterior y estipula  $MCE_R$  como sismo de diseño para la superestructura, la subestructura y el sistema de aislamiento. A pesar de que este cambio viene acompañado de nuevas consideraciones en cuanto a la inclusión de los límites superiores e inferiores de las propiedades del sistema de aislamiento para el cálculo de las fuerzas de diseño, es evidente que se deben esperar fuerzas de diseño mayores. ASCE 7-16 muestra los resultados de un estudio realizado con el fin de comparar los valores de cortante de diseño en función del peso de la estructura, obtenidos para un rango de parámetros de diseño de los sistemas de aislamiento; se concluye, a partir de los resultados de la Tabla C.17.5-1 [10], que para el 60% de los casos estudiados empleando los límites superiores (de las propiedades de los aisladores) la relación entre el cortante de diseño y el peso de la edificación para ASCE 7-16 es mayor que para su versión anterior, en porcentajes que oscilan entre 1 y 40%; sin embargo, el 40% restante de los casos muestra una reducción en la relación mencionada, de hasta un 15% aproximadamente.

Es indiscutible que el sistema de aislamiento debe verificarse frente al máximo sismo posible ( $MCE_R$ ), debido a que: (a) una falla de éste implicaría el colapso de la estructura principal (superestructura), (b) dada la aun escasa experiencia existente en esta tecnología, hay un cierto nivel de desconfianza que sólo puede ser vencido de forma paulatina, (c) en general, el sobredimensionamiento de la capa de aislamiento es más sencillo y económico que el de la sub y la superestructura, y (d) hasta la fecha no se han descrito niveles de desempeño (es decir, IO, LS y CP) para los sistemas de aislamiento. En cuanto a la superestructura y subestructura las dos versiones de ASCE 7 difieren en el periodo de retorno para el sismo de diseño considerado; sin embargo, concuerdan en que el nivel de desempeño esperado para cualquier edificación aislada es el mismo y es mayor al de una edificación con base fija, por lo que, si el desempeño sísmico esperado en una edificación con base fija es de seguridad a la vida, en edificaciones aisladas correspondería a ocupación inmediata.

Fijando el nivel de desempeño se puede analizar qué sucedería en edificaciones aisladas al trabajar con uno u otro periodo de retorno.

**Caso 1:  $T_R = 475$  años.** Esta exigencia puede ser correcta para edificaciones con uso normal, pero insuficiente en edificaciones con grupo de uso IV. Si se analiza una edificación indispensable (Grupo de uso IV) aislada, se concluye que se esperaría para ella un nivel de desempeño de ocupación inmediata bajo un sismo con  $T_R = 475$  años. Si se observa la Tabla 1, este nivel de desempeño ya lo cumple la edificación con base fija, por lo cual el aislamiento concebido bajo este sismo no estaría representando ningún beneficio adicional para este tipo de edificaciones. ASCE 7-10 afirma que a pesar de que se usa este periodo de retorno, la norma tiene incorporados factores de seguridad adicionales que pueden cubrir estas discrepancias, sin embargo, la filosofía empleada no es clara.

**Caso 2:  $T_R = 2475$  años.** Puede ser correcto en

edificaciones esenciales para la comunidad, pero generar sobrecostos en el resto de edificaciones. Si se analiza una edificación de uso normal (Grupo de uso I) aislada, se concluye que se esperaría para ella un nivel de desempeño de ocupación inmediata bajo un sismo con  $T_R = 2475$  años. Esto no permite aprovechar el aislamiento de base en este tipo de edificaciones para aumentar gradualmente su nivel de desempeño, sino obliga a llevarlas a un nivel de desempeño no coherente con su funcionalidad.

### 3.3. Coeficiente de importancia

Es correcto afirmar que cualquier edificación con aislamiento de base debe tener el mismo desempeño, lo que no es correcto es afirmar que toda edificación aislada debe tener este nivel de desempeño para un mismo sismo. Un factor de importancia igual a 1 implica tomar un solo sismo de diseño para este tipo de edificaciones, bien sea con un periodo de retorno de 475 años o 2475 años.

### 3.4. Coeficiente de reducción de respuesta por amortiguamiento

Este coeficiente depende de las características de los sismos de la región, tales como contenido frecuencial, duración, distancia epicentral, etc. Actualmente se está empleando en Colombia un coeficiente de reducción que fue estimado de acuerdo a las características de los sismos de EUA; esta inconsistencia puede afectar significativamente a los cálculos que empleen dicho factor. En otras palabras, es necesario desarrollar coeficientes de reducción de respuesta por amortiguamiento específicos para Colombia.

### 3.5. Límites de deriva

La deriva permite controlar el nivel de daño de las edificaciones, NSR-10 en su numeral A.6.4 estipula los límites de deriva para edificaciones con base fija mostrados en la Tabla 4.

ASCE 7-10 y ASCE 7-16 estipulan (Tabla 5) unos límites de deriva que varían en función de la categoría de riesgo (equivalente al grupo de uso en NSR-10). Esta distinción proviene de reconocer que el nivel de desempeño para estructuras esenciales y con un gran número de ocupantes debe ser mayor que para edificaciones de uso normal (frente a un mismo sismo).

La Tabla 6 muestra gráficamente como la deriva estaría relacionada con el nivel de desempeño esperado en edificaciones con base fija.

Tabla 4.  
Límite de derivas para el sismo de diseño NSR-10

Estructuras de:	Deriva máxima (%)
Concreto reforzado, acero, madera, y mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.2	1.0
Mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.3	0.5

Fuente: [6]

Tabla 5.  
Límite de derivas para el sismo de diseño ASCE 7

Estructuras	Categoría de riesgo (Grupo de uso)		
	I y II	III	IV
Estructuras, diferentes de muros de cortante de mampostería, de 4 pisos o menos, con particiones y otros elementos no estructurales que se diseñan para resistir las derivas indicadas	0.025 $h_{SX}$	0.020 $h_{SX}$	0.015 $h_{SX}$
Estructuras con muros de cortante de mampostería en voladizo vertical	0.010 $h_{SX}$	0.010 $h_{SX}$	0.010 $h_{SX}$
Otras estructuras con muros de cortante de mampostería	0.007 $h_{SX}$	0.007 $h_{SX}$	0.007 $h_{SX}$
Todas las demás estructuras	0.020 $h_{SX}$	0.015 $h_{SX}$	0.010 $h_{SX}$

Fuente: [10]

Tabla 6.  
Límite de derivas para el sismo de diseño ASCE 7

Sismo	Nivel de desempeño			
	Operacional (FO)	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad a la vida (LS)	Prevención del colapso (CP)
Frecuente*	0.01	0.01	0.02	0.02
Moderado**	0.01	0.01	0.02	0.02
Fuerte***	0.01	0.01	0.02	0.02

Fuente: Propia. (\*)  $T_R = 72$  años; (\*\*)  $T_R = 475$  años; (\*\*\*)  $T_R = 2475$  años

Tabla 7.  
Límite de derivas para el sismo de umbral de daño NSR-10

Estructuras de:	Deriva máxima (%)
Concreto reforzado, acero, madera, y mampostería que cumplen los requisitos de A.12.5.3.1	0.4
Mampostería que cumplen los requisitos de A.12.5.3.2	0.2

Fuente: [6]

Comparando la Tabla 4 y la Tabla 5 se puede concluir que para edificaciones con base fija la deriva de 1% en NSR-10 puede ser bastante exigente en el caso de edificaciones con grupo de uso I.

ASCE 7 propone una deriva de 1.5% para edificaciones aisladas. Si el nivel de desempeño y el nivel de daño esperados son respectivamente mayor y menor para una edificación aislada en comparación a una de base fija, la deriva máxima permitida para Colombia en edificaciones aisladas no debería ser mayor al 1%; de hecho, debería estar definida por valores más cercanos a los límites para el sismo de umbral de daño descritos (Tabla 7).

Por otra parte, el numeral A.6.2 de NSR-10 estipula que los desplazamientos horizontales (a partir de los cuales se obtienen las derivas) deben ser calculados por medio de fuerzas horizontales estimadas con un coeficiente de importancia igual a la unidad, independientemente del grupo de uso de la edificación. Esto implica que los límites de la Tabla 4 corresponden a un sismo con periodo de retorno de 475 años. Por otra parte, dichas fuerzas no se reducen por el coeficiente de capacidad de disipación de energía (es decir, se toma  $R = 1$ ). ASCE 7-10 y ASCE 7-16 emplean las mismas consideraciones para el cálculo

de los desplazamientos horizontales, con algunas diferencias en las expresiones empleadas (ecuación (2)) y en los límites de derivas discutidos anteriormente.

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I} \tag{2}$$

$C_d$  es un coeficiente de amplificación de deflexiones (cuyos valores son muy parecidos a los de  $R$ ),  $I$  es el coeficiente de importancia y  $\delta_{xe}$  es la deflexión horizontal obtenida por medio de un análisis elástico con fuerzas horizontales divididas entre  $R$  y multiplicadas por  $I$  [18]. Siendo  $C_d$  igual al coeficiente de disipación de energía empleado ( $R$ ), en el caso de edificaciones aisladas [10], el cálculo y los límites de derivas para NSR-10 y ASCE 7 son coherentes; sin embargo, hay un aspecto que puede generar confusión en el caso Colombiano y es el hecho de emplear en estructuras aisladas para el diseño de la superestructura y subestructura un sismo de diseño con periodo de retorno igual a 2475 años, esto implicaría calcular las derivas para dicho sismo, bajo el cual los límites establecidos en la Tabla 4 no son aplicables.

#### 4. Propuesta para la futura Norma Colombiana de edificaciones con aislamiento de base

Para una adecuada aplicación de esta técnica en el país, se hace necesario que tanto los aspectos técnicos como los económicos sean debidamente analizados, considerados y acoplados a las condiciones locales. La propuesta aquí planteada los tiene en cuenta, los desarrolla y discute en los siguientes apartados.

##### 4.1. Desempeño sísmico

Es evidente que el aislamiento de base no se debe concebir como una técnica para reducir costos frente a edificaciones convencionales, sino como una técnica que debido a sus bondades permite reducir las fuerzas sísmicas de diseño y además llevar a las edificaciones a un mejor nivel de desempeño. La Tabla 8 y la Tabla 9 muestran la visión de los autores de este artículo frente al desempeño exigible a edificaciones aisladas con diferentes grupos de uso. Como comparación, se ha incluido en dichas tablas el desempeño esperado por los reglamentos para edificaciones con base fija. Es destacable que estas Tablas afectan sólo a la sub y a la superestructura, no siendo aplicables a la capa de aislamiento.

En el caso de una edificación aislada que posea un grupo de uso intermedio, el desempeño exigible sería como el que muestra la Tabla 10.

Tabla 8.  
Desempeño para edificaciones aisladas y de base fija con grupo de uso I

Sismo	Nivel de desempeño			
	Operacional (FO)	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad a la vida (LS)	Prevención del colapso (CP)
Frecuente*	●	●	●	●
Moderado**	●	●	●	●
Fuerte***	●	●	●	●

Fuente: Propia. (\*)  $T_R = 72$  años; (\*\*)  $T_R = 475$  años; (\*\*\*)  $T_R = 2475$  años

Tabla 9. Desempeño para edificaciones aisladas y de base fija con grupo de uso IV

Sismo	Nivel de desempeño			
	Operacional (FO)	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad a la vida (LS)	Prevención del colapso (CP)
Frecuente*				Desempeño no adecuado
Moderado**				Desempeño no adecuado
Fuerte***				Desempeño no adecuado

Edificación aislada (línea diagonal hacia abajo desde FO a CP)  
Edificación con base fija (línea diagonal hacia abajo desde FO a LS)

Fuente: Propia. (\*)  $T_R = 72$  años; (\*\*)  $T_R = 475$  años; (\*\*\*)  $T_R = 2475$  años

Tabla 10. Desempeño para edificaciones aisladas y de base fija con grupo de uso intermedio

Sismo	Nivel de desempeño			
	Operacional (FO)	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad a la vida (LS)	Prevención del colapso (CP)
Frecuente*				Desempeño no adecuado
Moderado**				Desempeño no adecuado
Fuerte***				Desempeño no adecuado

Edificación aislada (línea diagonal hacia abajo desde FO a CP)  
Edificación con base fija (línea diagonal hacia abajo desde FO a LS)

Fuente: Propia. (\*)  $T_R = 72$  años; (\*\*)  $T_R = 475$  años; (\*\*\*)  $T_R = 2475$  años

En resumen, la propuesta consiste en aumentar en un nivel el desempeño que tendría la edificación si fuese de base fija. Es decir, para un sismo específico, en cada una de las tablas anteriores el nivel de desempeño de la estructura aislada se desplaza una casilla hacia la izquierda.

#### 4.2. Sismo de diseño

Uno de los temas más trascendentales y que posiblemente más repercusión tenga en la aplicación del aislamiento sísmico en el país es la selección del sismo de diseño para la subestructura, la capa de aislamiento y la superestructura. La propuesta de los autores para la sub y la superestructura es, de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 8, la Tabla 9 y la Tabla 10, considerar el mismo sismo que se emplea en edificaciones con base fija, discriminándolo, pues, en función del grupo de uso. Esta solución respeta la filosofía del aislamiento sísmico “*un único desempeño para cualquier estructura aislada*”, pero puntualiza frente a qué sismo se espera dicho comportamiento. De lo contrario, si se fijase el nivel de desempeño como IO y se emplease  $T_R = 2475$  años (Sismo Fuerte), se podría estar penalizando económicamente el aislamiento de base de edificaciones con grupos de uso I y II, y sesgando así esta técnica para edificaciones indispensables (grupos de uso III y IV). Si se emplease  $T_R = 475$  años (Sismo moderado), no se obtendría ningún beneficio en el desempeño de edificaciones indispensables, tal como muestra la Tabla 1. En cuanto a la capa de aislamiento, se aconseja seleccionar un periodo de retorno de 2475 años en cualquier situación.

#### 4.3. Coeficiente de importancia

Con base en todo lo anteriormente discutido, se propone para la futura norma colombiana de edificaciones con aislamiento de base, mantener el mismo coeficiente de importancia que para edificaciones con base fija. Esta

estrategia permite considerar sismos de diseño diferentes para cada grupo de uso y tener una mayor claridad en el cálculo de las derivas.

#### 4.4. Coeficiente de reducción de respuesta por amortiguamiento

El Reglamento NSR-10 presenta espectros de diseño calculados para amortiguamientos del 5% respecto al crítico. La incorporación de nuevas tecnologías de control estructural tales como el aislamiento sísmico y la disipación de energía, entre otras, requieren de espectros o expresiones que permitan considerar diferentes niveles de amortiguamiento. En la tesis Doctoral titulada “*New design considerations for seismic isolated buildings in Colombia*” [21] se proponen dichos factores para edificaciones con aislamiento de base, calculados a partir de las características locales de la amenaza sísmica en Colombia.

#### 4.5. Expresiones para el método FHE

Se menciona en el numeral 3.1 que la suposición de ASCE 7 de que en el espectro de diseño la zona de velocidades constantes siempre corresponde a periodos de 1 segundo no es válida para Colombia. Esta circunstancia es relevante debido a que las fórmulas de ASCE para FHE parten de esta suposición, no siendo, pues, aplicables a Colombia. El cálculo del desplazamiento del sistema de aislamiento (el cual permite posteriormente calcular las fuerzas sísmicas de diseño en la superestructura) parte de la siguiente relación entre pseudo-aceleración y desplazamiento:

$$S_d = \frac{S_a}{\omega^2} \tag{3}$$

En esta expresión  $S_d$  y  $S_a$  corresponden al espectro de desplazamiento y al espectro de pseudoaceleración respectivamente; la frecuencia angular  $\omega$  se relaciona con el periodo  $T$  de la edificación aislada mediante:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{4}$$

Reemplazando  $\omega$  en  $S_d$  y dividiendo por el coeficiente de reducción de respuesta por amortiguamiento  $B$  se obtiene:

$$S_d = \frac{g S_a T^2}{4\pi^2 B} \tag{5}$$

Esta expresión requiere que  $S_a$  esté expresada en  $g$  (aceleración de la gravedad). La ecuación (5) es aplicable a Colombia para cualquier caso.

Tal como se discute previamente, en ASCE 7 la aceleración  $S_a$  se toma como  $S_{D1} / T$ , en donde  $S_{D1}$  es la aceleración espectral para un periodo de 1 segundo. En estas condiciones, la ecuación (5) puede reescribirse como:

$$S_d = \frac{g S_{D1} T}{4\pi^2 B} \tag{6}$$

La ecuación (6) se encuentra incorporada en el capítulo 17 de los documentos ASCE 7. Debe subrayarse que, tal como se ha discutido previamente, su aplicación directa a Colombia no es siempre válida y puede generar inconsistencias en ciertos casos, debidas a las diferencias en terminología aplicada entre las normas.

#### 4.6. Detallado de elementos estructurales

ASCE 7 considera que una estructura aislada debe tener el mismo nivel de detallado estructural que una de base fija; éste depende de la categoría de diseño, relacionada con la amenaza sísmica y la importancia. Esta estrategia no es coherente con la filosofía del aislamiento de base, ya que: a) en estructuras aisladas se requiere un mejor nivel de desempeño; es decir, frente al sismo de diseño se espera un comportamiento muy cercano al elástico y frente a sismos mayores se presume una incursión moderada en el rango inelástico. Obviamente, para alcanzar estos niveles de desempeño no se requiere el mismo nivel de ductilidad que en estructuras con base fija, sino uno menor. b) En ciertos casos se diseñarían edificaciones con aislamiento de base que posean coeficientes de disipación de energía cercanos a la unidad (Rango elástico), pero con un nivel de detallado estructural que implique un alto comportamiento inelástico, resultando en sobrecostos para las edificaciones aisladas.

La propuesta es reducir en un grado el nivel de ductilidad en estructuras aisladas frente a las de base fija. Por ejemplo, una estructura fija con nivel de detallado especial (DES), puede ser diseñada como aislada bajo un nivel de detallado moderado (DMO). Por otra parte, también se propone que como mínimo cualquier estructura aislada debe tener un grado de disipación mínimo (DMI). Es destacable que esta propuesta está en la línea de lo prescrito en la normativa Chilena más reciente [11].

#### 4.7. Límites de deriva

Las derivas acordes a un nivel de desempeño estructural de IO oscilan entre 0.5% y 0.8% de la altura de entrepiso [20,22,23]. En consecuencia, para alcanzar este objetivo se propone 0.5% para estructuras con grupo de uso I y 0.2% para estructuras de grupo de uso IV, estos límites se cumplirían para un sismo de diseño moderado y con la misma metodología empleada para el cálculo de derivas en edificaciones con base fija ( $R=1$ , Sismo de diseño)

La Tabla 11 muestra gráficamente como la deriva estaría relacionada con el nivel de desempeño esperado en edificaciones con aislamiento de base.

Tabla 11  
Desempeño para edificaciones aisladas con grupo de uso I y IV

Sismo	Nivel de desempeño			
	Operacional (FO)	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad a la vida (LS)	Prevención del colapso (CP)
Frecuente*	0.02	0.05	0.015	0.015
Moderado**	0.02	0.05	0.015	0.015
Fuerte***	0.02	0.05	0.015	0.015

Fuente: Propia. (\*)  $T_R = 72$  años; (\*\*)  $T_R = 475$  años; (\*\*\*)  $T_R = 2475$  años

Tabla 12.  
% de variación de las propiedades de los aisladores

Propiedad	Rigidez equivalente	Amortiguamiento equivalente
Fabricación	$\pm 10$	$\pm 10$
Edad	+10	+10
Var. temp. ambiental $20^\circ \pm 20^\circ$	+14 -9	+5 -9
<b>Total</b>	<b>+34</b> <b>-19</b>	<b>-15</b> <b>+1</b>

Fuente: [24]

Tabla 13.  
Variación de propiedades efectivas para el sistema de aislamiento

Propiedad	Mínima	Nominal	Máxima
Rigidez $k$ (kN/m)	1314	1546	2071
Amortiguamiento (%)	20.2	20	17
Periodo ( $T$ )	2.93	2.70	2.33

Fuente: Propia

### 5. Ejemplo numérico

Para ilustrar todo lo anteriormente discutido en este trabajo, se pone como ejemplo una edificación de pórticos estructurales con 4 pisos, cimentada en un suelo tipo B y con un peso sísmico de 2800 kN. La estructura está ubicada en Bucaramanga; por ser una zona de amenaza sísmica alta, el nivel de detallado es especial (DES). Se consideran dos opciones: estructura con base fija y aislada en su base; en ambas se calcula el cortante de diseño por FHE. En la estructura de base fija se utiliza NSR-10 y en la aislada se aplican ASCE7-10, ASCE 7-16 y la propuesta aquí planteada. Se supone, simplifcadamente, que el peso sísmico es igual para la estructura aislada y de base fija. Se considera un sistema de aislamiento formado por aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRBs) tipo X0.3R [24], cuya variación de propiedades debida a la temperatura ambiental, la edad y la fabricación se describen en la Tabla 12.

De acuerdo a la Tabla 12 y considerando la dependencia de un parámetro respecto al otro, las propiedades empleadas para el diseño de la estructura aislada se muestran en la Tabla 13. El periodo ( $T$ ) y el amortiguamiento nominal de la estructura con aislamiento sísmico se seleccionaron para un sismo con  $TR = 475$  años.

Se consideran los dos usos extremos para la edificación, es decir grupos de uso I y IV. Los resultados obtenidos para cada uso analizado, junto a los parámetros empleados para su cálculo, se muestran en la Tabla 14 y la Tabla 15 respectivamente. En el caso de ASCE 7-16 y de la propuesta aquí planteada, se reportan los máximos obtenidos del uso de los límites superiores e inferiores de las propiedades. Para considerar el cambio de las propiedades efectivas debido a los mayores desplazamientos obtenidos bajo el sismo con  $T_R = 2475$  años, se redujo la rigidez efectiva en un 10%.

En las tablas anteriores,  $D_{sa}$  es el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento (corresponde a  $D_M$  en los documentos ASCE 7),  $V_s$  es el cortante elástico (para  $R = 1$ ) y  $V_{s,DISEÑO}$  es el cortante de diseño ( $V_s / R$ ).

Tabla 14.  
Parámetros de diseño obtenidos en edificaciones de grupo de uso I

Parámetro	Base fija	Estructura aislada		
		ASCE 7-10	ASCE 7-16	Propuesta
$R$	7	2	2	2
$I$	1	1	1	1
$D_{sa}$ (m)	-	0.155	0.218	0.123
$V_s$ (kN)	1750	321	345	247
$V_{s,DISEÑO}$ (kN)	250	160	172	124

Fuente: Propia

Tabla 15.  
Parámetros de diseño obtenidos en edificaciones de grupo de uso IV

Parámetro	Base fija	Estructura aislada		
		ASCE 7-10	ASCE 7-16	Propuesta
$R$	7	2	2	2
$I$	1.5	1	1	1.5
$D_{sa}$ (m)	-	0.155	0.218	0.191
$V_s$ (kN)	2626	321	345	333
$V_{s,DISEÑO}$ (kN)	375	160	172	166

Fuente: Propia

Se evidencia que en la estructura aislada hay una reducción considerable del cortante elástico, cerca de un 85% respecto al de la edificación con base fija; sin embargo el cortante de diseño presenta una reducción mucho menor. Esto quiere decir que la principal ventaja del aislamiento sísmico es lograr una reducción considerable de las fuerzas elásticas ( $V_s$ ) que experimentaría la estructura, con lo cual se pueden emplear fuerzas de diseño muy cercanas a éstas, que implican un comportamiento estructural más cercano al elástico que al inelástico. Lo anterior se traduce en menos daños y un mejor nivel de desempeño.

En la Tabla 14 y la Tabla 15 se observa que el cortante de diseño obtenido con ASCE 7-16 es mayor que el obtenido con ASCE 7-10 en aproximadamente un 7%, lo cual es coherente con lo mencionado en el numeral 3.2. Para el grupo de uso I, la propuesta aquí planteada obtiene un cortante de diseño inferior a las dos versiones de ASCE 7, debido al sismo de diseño considerado ( $T_R = 475$  años) y a la aplicación de la ecuación (5) en lugar de la ecuación (6). Para el grupo de uso IV, la propuesta aquí planteada obtiene un cortante de diseño mayor que el de ASCE 7-10, debido al sismo considerado ( $T_R = 2475$  años), pero menor que el de ASCE 7-16, debido a la aplicación de la ecuación (5) en lugar de la ecuación (6).

Los cortantes de diseño obtenidos con la propuesta aquí planteada confirman que la aplicación directa de los documentos ASCE 7 pueden causar sobrecostos en ciertos casos, como en estructuras del grupo de uso I, donde con el cortante de diseño de la propuesta es posible brindar un nivel de desempeño suficiente a este tipo de edificaciones. En el caso de estructuras del grupo de uso IV, la aplicación de ASCE 7-10 resultaría en fuerzas de diseño inferiores a las que se deberían considerar para edificaciones de este tipo.

## 6. Conclusiones

La aplicación directa de la normativa americana ASCE en el diseño de edificaciones con aislamiento sísmico en

Colombia genera una serie de inconsistencias con el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10. Esta incompatibilidad puede generar sobrecostos y, en cierto tipo de edificaciones, conducir a parámetros de diseño inferiores a los requeridos.

La propuesta presentada en este trabajo para edificios con aislamiento de base en Colombia armoniza con los requisitos de NSR-10, establece una metodología clara de análisis y puede promover de una mejor manera en el país esta importante técnica constructiva. Sin embargo

Este trabajo pone de manifiesto la necesidad de estudiar las condiciones locales para poder generar una norma de aislamiento sísmico adaptada totalmente a las condiciones económicas y técnicas de Colombia. De ahí que se resalte el hecho de requerir estudios adicionales que complementen la propuesta aquí presentada, en temas como: el factor  $R$ , el nivel de detallamiento estructural, el comportamiento de los elementos no estructurales, el posible impacto del sistema de aislamiento, entre otros. Vale la pena resaltar que investigaciones en estos temas se están llevando a cabo en la Universidad de La Salle en Bogotá-Colombia.

## Agradecimientos

Este trabajo ha recibido apoyo financiero del gobierno español, proyectos BIA2014-60093-R y CGL2015-6591. La estancia de C. M. Piscal A. en Barcelona ha sido financiada por Colciencias, convocatoria 617.

## Referencias

- [1] Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M. and Salvatori, A., Recent development and application of seismic isolation and energy dissipation and conditions for their correct use. In: Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, Springer, pp. 449–488, 2014.
- [2] EERI, Earthquake engineering research institute. The Mw 6.6 Earthquake of April 20, 2013 in Lushan, China. Special Earthquake Report, 2013.
- [3] Almazán, J., Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del Maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile. Revista Sul-americana de Engenharia Estructural, 7(2-3), pp. 4-28, 2012.
- [4] Nagarajaiah, S. and Sun, X., Seismic performance of base isolated buildings in the 1994 Northridge earthquake. Proceedings of the 11th WCEE. 1996. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9445(2000)126:10(1177)
- [5] EERI, Earthquake engineering research institute. Performance of Engineered Structures in the Mw 9.0 Tohoku, Japan, Earthquake of March 11, 2011. Special Earthquake Report, 2012.
- [6] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, 2010.
- [7] ASCE 7-10, American Society of Civil Engineers, Minimum design loads for buildings and other structures, 7, 7–10, 2010.
- [8] Council, B.S.S., The 2003 NEHRP recommended provisions for new buildings and other structures, Part 1: Provisions (FEMA 450). 2003.
- [9] Mason, W., Seismic isolation – the gold standard of seismic protection. STRUCTURE magazine, 2015.
- [10] ASCE 7-16, American Society of Civil Engineers Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, 7, 7–16, 2016.
- [11] NCh 2745, Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica. Instituto Nacional de Normalización, 2013.
- [12] NTC, Norme Tecnica per le Costruzioni. Ministero de lle Infrastrutture, 2018.

- [13] EN-1998-2, Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance. European committee for standarization, 2004.
- [14] Congreso de Colombia, Ley 400. 1997.
- [15] Congreso de Colombia, Ley 1229. 2008.
- [16] Tsompanakis, Y., Earthquake return period and its incorporation into seismic actions. *Encycl. Earthq. Eng.*, pp. 1–35, 2015. DOI: 10.1007/978-3-642-36197-5\_116-1
- [17] Council, B.S.S., Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Rep. FEMA-356 Wash. DC, 2000.
- [18] AIS, Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones, AIS 180-13. 2013.
- [19] Bisch, P. et al., Eurocode 8: Seismic design of buildings worked examples. 2012.
- [20] S.V., 2000 Committee, Performance-based seismic engineering. *Struct. Eng. Assoc. Calif. Sacram. Calif.*, 1995.
- [21] Piscal, C., New design considerations for seismic isolated buildings in Colombia. Universidad Politécnica de Cataluña, 2018.
- [22] Aslani, H. and Miranda, E., Probabilistic earthquake loss estimation and loss disaggregation in buildings. PhD Thesis, Stanford University Stanford, CA, 2005.
- [23] Ghojarah, A., On drift limits associated with different damage levels. In: Performance-based seismic design concepts and implementation. *Proceedings of the International Workshop*, 28, pp. 321–332, Bled, Slovenia, 2004.
- [24] Bridgestone Corporation, Seismic isolation product line-up. *Construction Materials Sales & Marketing Department*, 2013.

**C.M. Piscal-Arévalo**, es Ing. Civil de la Universidad del Cauca, Colombia. MSc. en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras de la Universidad de los Andes, Colombia. Dr. en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona-España. Actualmente se desempeña como docente investigador de la Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia.

ORCID: 0000-0003-1271-3406

**F. López-Almansa**, es Dr. Ing. Civil. Profesor del Departamento de Tecnología de la Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Ha publicado más de 200 trabajos de investigación en revistas científicas y congresos científicos, ha dirigido proyectos de investigación (nacionales e internacionales) financiados con fondos públicos y privados, siendo coordinador aproximadamente de la mitad de éstos.

ORCID: 0000-0002-7359-110X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes  
Especialización en Estructuras  
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas  
de Transporte  
Maestría en Ingeniería – Geotecnia  
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: [asisacic\\_med@unal.edu.co](mailto:asisacic_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 425 5172