

Evaluación de efectos colaterales por sismo en Bogotá, Colombia.

Díaz-Parra Fernando, Torres-Acosta Andrei, Beltrán-Galvis Adriana
Ordoñez-Yamjure Iván & Rodríguez-Romero Gerardo
Fondo de prevención y atención de emergencias FOPAE, Bogotá, Colombia



ABSTRACT

This article presents the conceptual and methodological framework which has been implemented in order to evaluate earthquake damage in an urban context using the "Damage Evaluation for Risk Analysis System - SEDAR". The proposed methodology permits to assess: seismic vulnerability, initial damage associated with strong motion and secondary damage associated with collateral effects (liquefaction and landslides). Collateral effects are evaluated by establishing liquefaction and landslide potential (Liquefaction Potential Index and Critical Acceleration, respectively). Secondary damage is evaluated using a proposed methodology which integrates both initial damage results and the damage states due to collateral effects. Results for a given seismic hazard scenario in Bogota city are presented in order to illustrate the impact of collateral effects when establishing earthquake damage scenarios in an urban context.

RESUMEN

Este artículo presenta el enfoque conceptual y metodológico que ha sido implementado en el Sistema de Evaluación de Daños para el Análisis de Riesgo - SEDAR para evaluar los daños y afectaciones por sismo en un contexto urbano. Esta propuesta metodológica evalúa: vulnerabilidad sísmica, daños iniciales asociados al movimiento sísmico y daños secundarios asociados a los efectos colaterales (licuación y deslizamiento). Los efectos colaterales son evaluados por métodos que permiten determinar el potencial de licuación y deslizamiento del terreno a partir del índice de Potencial de Licuación y de la Aceleración Crítica, respectivamente. Los daños secundarios son evaluados mediante un método propuesto que integra el daño inicial con los estados de daño asociados a los efectos colaterales. Se presentan los resultados para un escenario de amenaza sísmica en la ciudad de Bogotá para mostrar la importancia de incluir la evaluación de efectos colaterales en los procesos de evaluación de escenarios de daño por terremoto.

1 INTRODUCCIÓN

La Coordinación de Investigación y Desarrollo del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE de la ciudad de Bogotá, tiene a cargo adelantar diferentes actividades para la Gestión Integral del Riesgo. Específicamente, en la componente "Identificación del Riesgo" se realizan estudios técnicos para mejorar el conocimiento sobre amenazas naturales y antrópicas no intencionales. Bajo este esquema de trabajo se desarrolla el estudio de actualización y sistematización de escenarios de daño por sismo para Bogotá cuyo principal resultado es el aplicativo SEDAR (Sistema de Evaluación de Daños para Análisis de Riesgo) el cual constituye una herramienta versátil que permite evaluar espacialmente los daños probables en edificaciones y líneas vitales y las consiguientes afectaciones a la población considerando diferentes escenarios de amenaza sísmica.

El objetivo de SEDAR es proporcionar una evaluación integral y práctica de los daños por sismo considerando tanto los daños directos causados por el movimiento inicial como aquellos daños originados por las fallas inducidas en el terreno o efectos colaterales (licuación y deslizamiento).

El proceso de evaluación mediante el aplicativo SEDAR se realiza con base en un inventario de elementos expuestos (bases de datos) y algoritmos que permiten evaluar la vulnerabilidad sísmica, los daños probables, las afectaciones a la población y pérdidas

económicas. Estos algoritmos han sido adoptados de metodologías existentes o desarrollados por los autores. Los resultados obtenidos pueden ser integrados en aplicaciones SIG para ser analizados y representados.

El presente artículo se enfoca en la metodología que se usó para la evaluación espacial de la susceptibilidad de terreno a efectos colaterales inducidos por sismo y de los daños probables causados por estos en edificaciones, líneas vitales y población en el área urbana de la ciudad de Bogotá.

2 SISTEMA DE EVALUACIÓN DE DAÑOS PARA ANÁLISIS DE RIESGO - SEDAR

La ocurrencia de un evento sísmico desencadena una serie de acontecimientos o eventos que se ilustran de manera esquemática en la Figura 1. Cuando las ondas sísmicas llegan a un centro poblado los elementos expuestos experimentan o responden de una manera particular, si se supera la capacidad (resistencia) de los elementos expuestos se ocasionan daños iniciales, estos daños iniciales pueden ocasionar daños secundarios que se pueden llegar a propagar y producir más daños, esta secuencia de acontecimientos se resumen en la Figura 2.

La cadena de acontecimientos ilustra los daños y afectaciones directas por la ocurrencia de un sismo, además hay afectaciones indirectas a la sociedad, economía y el desarrollo de la ciudad y el país que son igualmente importantes. Bajo este enfoque el alcance de

las evaluaciones que realiza el estudio se concentran en la cuantificación de los daños iniciales y daños secundarios.

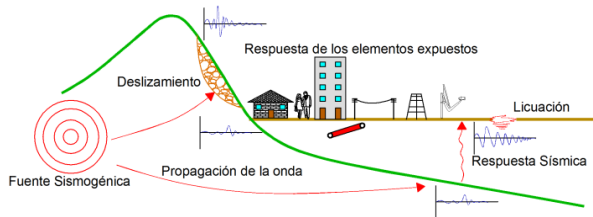


Figura 1. Definición del problema (FOPAE, 2009)

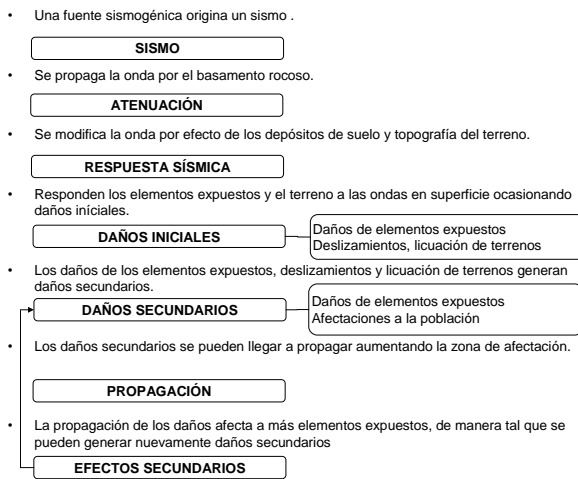


Figura 2. Cadena de acontecimientos (FOPAE, 2009)

De acuerdo con el enfoque conceptual del problema y tras la revisión de varios metodologías de evaluación de daños por sismo (Lantada, 2007; Oliveira et al., 2006; Cardona, 2001; Carreño, 2005) se desarrolló una metodología general para evaluar los daños y afectaciones que incluye efectos colaterales que se puede observar en la Figura 3.

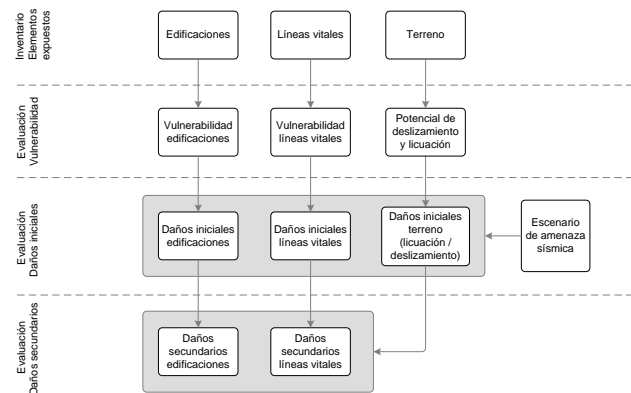


Figura 3. Metodología de evaluación de vulnerabilidad y daños por sismo incluyendo efectos colaterales

La metodología desarrollada dividió el problema en cuatro etapas, la primera corresponde al inventario de elementos expuestos, la segunda a la valoración de su vulnerabilidad, la tercera es propiamente la cuantificación de los daños iniciales y la cuarta etapa es la evaluación de daños secundarios. Para cada etapa se tiene en cuenta tres grandes categorías de elementos, edificaciones, líneas vitales y el terreno, considerado como elemento expuesto a sufrir daños como licuación y deslizamiento. Adicionalmente en la etapa de evaluación de daños iniciales se requiere de la definición del escenario de amenaza para el cual se están realizando las evaluaciones.

El flujo de información, evaluaciones y resultados es de la siguiente manera: se identifican y localizan los elementos expuestos, edificaciones, líneas vitales y zonas del terreno potencialmente licuables o susceptibles a deslizamientos; los tipos de elementos que cuenten con métodos de evaluación de vulnerabilidad se evalúan; luego con base en los resultados de vulnerabilidad o directamente a partir de las características del elemento y tomando los niveles de intensidad sísmica del escenario considerado se estiman los daños iniciales de las edificaciones, líneas vitales y del terreno; los resultados de los daños iniciales de las edificaciones y de las líneas vitales se ajustan de acuerdo con los daños del terreno evaluados para obtener los daños secundarios.

La evaluación de la vulnerabilidad, daños y afectaciones de los elementos expuestos se realiza mediante métodos reconocidos que fueron adaptados e implementados en la aplicación. En la Tabla 1 se resumen los métodos implementados en el sistema.

Tabla 1. Métodos de evaluación de vulnerabilidad, daño y afectaciones implementados.

Autor	Elemento	Resultado
Benedetti & Petrini (1984)	Edificaciones	Índice de Vulnerabilidad
Japan Waterworks Association (1998)	Tubería	Factor de vulnerabilidad
Benedetti & Petrini (1984)	Edificaciones	Índice de daño
Miranda (1999)	Edificaciones	Índice de daño
Kubo & Katayama (1975)	Tubería	Tasa de roturas
Jica (2002)	Cableado	Porcentaje de daño
ALA (2001)	Tanques	Estado de daño
Risk Management Solutions Inc (1997)	Puentes	Estado de daño
RADIUS (1999)	Vías	Porcentaje de daño
FEMA (2003)		
Iwasaki (1978)	Terreno	Estado de daño licuación
Jibson (1998)	Terreno	Estado de daño deslizamiento
FOPAE (2010b)	Edificaciones Líneas vitales	Daños por efectos colaterales
Corbun y Spence (1992)	Población	Heridos, víctimas

A la fecha SEDAR cuenta con mas de 12 métodos implementados, y gracias al diseño conceptual y al modelos de datos implementado es posible incorporar nuevos métodos de evaluación e información de elementos expuestos al sistema, de manera tal que se puede mantenerse actualizada la aplicación y con posibilidades de crecimiento.

3 EVALUACIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN Y DEL ESTADO DE DAÑO

Para evaluar el potencial de licuación se combinaron dos métodos, el "Procedimiento Simplificado" (Seed & Idriss, 1971) que calcula el factor de seguridad ante licuación (FS_L) y el "Índice de Potencial de Licuación (LPI)" (Iwasaki et al., 1978) que permite establecer el comportamiento de una columna de suelo ante licuación y por consiguiente, el daño probable en superficie.

Los anteriores métodos son aplicables de manera puntual y dado que se requiere aplicarlos espacialmente, se realizaron análisis geo-estadísticos con el fin de zonificar la resistencia cíclica de los terrenos ante licuación. Finalmente, se evalúa para cada zona el Índice de Potencial de Licuación y el Estado de Daño asociado para cada escenario de amenaza sísmica modelado. A continuación se resume los métodos implementados.

3.1 Evaluación del factor de seguridad ante licuación

Esta evaluación se realiza mediante el procedimiento simplificado desarrollado por Seed e Idriss (1964) donde el factor de seguridad de licuación FS_L se define como el cociente entre la resistencia cíclica del suelo (CRR) y los esfuerzos cíclicos generados por el sismo (CSR).

El CRR se evalúa con base en los resultados del ensayo de penetración estándar SPT de la siguiente forma:

$$CRR = \frac{10^{2.54}}{M_w^{2.56}} \cdot CRR_{7.5} \quad [1]$$

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{(34 - (N_1)_{60CS})} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{(10 * (N_1)_{60CS})} - \frac{1}{200} \quad [2]$$

Donde M_w es la Magnitud de momento del sismo y $(N_1)_{60CS}$ es el número de golpes normalizado y corregido por el porcentaje de finos, este se obtiene mediante:

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta * (N_1)_{60} \quad [3]$$

$$(N_1)_{60} = N_m * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \quad [4]$$

Los valores de alfa y beta dependen del contenido de finos presente en el material (ver Tabla 2). $(N_1)_{60}$ es el número de golpes normalizado mediante la siguiente ecuación de acuerdo con los factores resumidos en la Tabla 3 para el caso colombiano y empleados en los análisis.

Tabla 2. Factores de corrección por contenido de finos.

Contenido de finos (%)	α	β
<=5	0	1
5 a 35	$e^{1.76 - (90/FC^2)}$	$0.99 + \frac{FC^{1.5}}{1000}$
>= 35	5	1.2

Tabla 3. Factores de corrección del resultado de SPT.

Factor	Descripción	Valor
C_N	Factor para normalizar el esfuerzo efectivo a una presión atmosférica (Pa)	$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5}$
C_E	Factor de corrección de energía aplicada por el martillo en la prueba	0.83
C_B	Factor de corrección debido al diámetro de la perforación	1
C_R	Factor de corrección por la longitud de la cuerda	0.75
C_S	Factor de corrección por el tipo de muestreador.	1

El CSR depende de la intensidad sísmica y del estado de esfuerzo, el cual se obtiene mediante:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_{vo}} = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} * r_d \quad [5]$$

Donde a_{max} es la aceleración pico en superficie en gravedades, g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2), σ_{vo} es el esfuerzo total vertical inicial a la profundidad en consideración en KPa, σ'_{vo} es el esfuerzo efectivo vertical inicial a la profundidad en consideración en KPa y r_d es el coeficiente de reducción del esfuerzo que se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\begin{aligned} z \leq 9.15 &\rightarrow r_d = 1.0 - 0.00765z \\ 9.15 < z \leq 23 &\rightarrow r_d = 1.174 - 0.0267z \end{aligned} \quad [6]$$

3.2 Evaluación del Índice de Potencial de Licuación y del estado de daño asociado

Este método fue desarrollado por Iwasaki et al. (1978) para capas de suelo entre 0 y 20m de profundidad evalúa el Índice de Potencial de Licuación (LPI) mediante la siguiente ecuación.

$$LPI = \sum_{i=1}^n G_i W_i H_i \quad [7]$$

Donde G_i es la intensidad de la licuación expresada como $G_i=1-FS_L$, donde FS_L es el factor de seguridad de licuación, W_i es una función de ponderación expresada como $W_i=10-0.5z$, donde z es la profundidad media del estrato analizado en metros y H_i es el espesor del estrato considerado en metros, donde i es el número de la capa y n el número total de capas.

A partir de los valores de LPI, Iwasaki et al. (1978), proponen una relación con el estado de daño por licuación del terreno, en la Tabla 4 se incluyen la relación entre el LPI, el potencial de falla por licuación y el estado de daño por licuación empleados en los análisis.

Tabla 4. Estados de daño por licuación a partir de LPI.

LPI	Estado de daño por licuación EDL
LPI=0	0 (sin daño)
0<LPI<5	1 (ligero)
5≤LPI≤15	2 (fuerte)
LPI>15	3 (colapso)

3.3 Evaluación espacial del estado de daño

De manera esquemática este procedimiento completo se ilustra en la Figura 4.

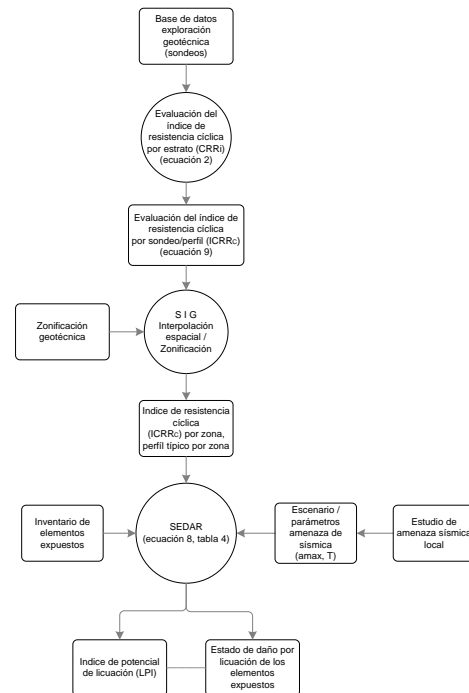


Figura 4. Metodología de zonificación del potencial de licuación y evaluación de estados de daño por sismo.

Para los perfiles de suelo disponibles en la base de datos geotécnica localizados en las zonas geotécnicas aluviales, de llanura aluvial y cauces activos, se calcula el índice de resistencia cíclica del terreno I_{CRR} mediante la siguiente ecuación:

$$I_{CRR} = \sum_{i=1}^n CRR_i W_i H_i \quad [8]$$

Donde CRR_i es el valor del CRR calculado para las capas de arenas licuables, W_i es una función de ponderación de la profundidad expresada como $W_i=10-0.5z$, H_i es el espesor de la capa considerada, z es la profundidad del suelo, e i es el número de la capa.

Luego se procede a realizar análisis geo-estadísticos para determinar espacialmente zonas de similar resistencia cíclica y sus correspondientes perfiles típicos. El paso final se realiza con el aplicativo SEDAR, en el cual se implementó el método del índice de potencial de licuación para evaluar los estados de daño inducidos por sismo a cada zona con potencial licuación y escenario de amenaza sísmica considerado.

Esta metodología propuesta se aplicó a las zonas susceptibles a licuación de la ciudad de Bogotá, con base en la información disponible de los estudios geotécnicos y de respuesta sísmica. De esta manera a las zonas seleccionadas como potencialmente licuable de la zonificación geotécnica de Bogotá (FOPAE, 2010a) Aluvial, Cauces, Llanura A y Llanura B fueron subdivididas en 15 zonas de acuerdo con los resultados de la interpolación del I_{CRR} , de estas zonas las que

presentan mayor susceptibilidad ante licuación se encuentran en las cercanías del río Tunjuelo.

4 EVALUACIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL DE DESLIZAMIENTO Y DEL ESTADO DE DAÑO

El análisis de estabilidad sísmica de un talud debe considerar los esfuerzos dinámicos inducidos y sus efectos sobre la resistencia y el comportamiento esfuerzo-deformación del material. En general existen dos tipos de análisis: por estabilidad inercial y por estabilidad por debilitamiento del material. Dentro de los métodos de análisis de estabilidad inercial se encuentran los métodos pseudo-estáticos, método de bloque del deslizante (Newmark, 1965), análisis de Makdisi-Seed y análisis de esfuerzo-deformación.

Para el presente análisis se optó por usar una metodología basada en el método de bloque deslizante (Newmark, 1965) ya que ésta permite establecer las deformaciones de un talud dado un umbral de aceleración correspondiente a un determinado escenario de amenaza sísmica. Dichas deformaciones pueden posteriormente asociarse a estados de daño del terreno.

La evaluación del potencial de deslizamiento del terreno y de los daños asociados a un escenario de amenaza sísmica mediante la metodología propuesta se realiza en dos fases: La primera consiste en establecer el potencial de deslizamiento de las áreas de ladera mediante una evaluación espacial de la aceleración crítica de las zonas de ladera. En la segunda etapa se evalúan los desplazamientos permanentes del terreno en función de la intensidad sísmica del escenario de amenaza considerado y el estado de daño del terreno y de los elementos expuestos.

4.1 Evaluación del potencial de deslizamiento

El método de análisis de estabilidad inercial por bloque deslizante (Newmark, 1965) ha sido empleado por varios autores para realizar estudios de estabilidad y susceptibilidad de deslizamiento a escala regional (Wilson & Keefer, 1983; Wicczorek et al., 1985; Wilson & Keefer, 1985; Jibson, 2000). El método establece una analogía entre el deslizamiento (un volumen de material que se desliza sobre una superficie de falla) y un bloque rígido que se desliza sobre una superficie inclinada. Para este bloque es posible determinar una aceleración crítica, que es aquella aceleración que induce una fuerza mayor a las fuerzas resistentes iniciándose así el movimiento y produciendo un desplazamiento del bloque.

Newmark demostró que la aceleración crítica del volumen de material que se desliza sobre una superficie de falla es función del factor de seguridad estático y de la pendiente de dicha superficie, así:

$$a_c = (FS - 1) * g * \text{sen}\beta \quad [9]$$

Donde a_c es la aceleración crítica en gales, g es la aceleración de la gravedad (980 gales), FS es el factor de

seguridad estático y β es el ángulo que forma la superficie de falla. El factor de seguridad estático FS se puede evaluar a partir del modelo de equilibrio límite de una pendiente infinita compuesta por un material cuya resistencia se describe en términos de cohesión y fricción (Jibson, 2000), así:

$$FS = \frac{c}{\gamma * e - \text{sen}\beta} + \frac{\tan(\phi)}{\tan(\beta)} - \frac{m * 10 * \tan(\phi)}{\gamma * \tan(\beta)} \quad [10]$$

Donde c es la cohesión efectiva del material en KPa, γ es el peso unitario del material en KN/m^3 , e es el espesor del material sobre la superficie de falla en metros, ϕ es el ángulo de fricción interna efectivo del material en grados, β es el ángulo que forma la superficie de falla en grados (el cual se asume se aproxima al ángulo de la superficie del terreno) y m es la proporción en altura de la lámina de agua respecto al material sobre la superficie de falla.

4.2 Evaluación de la deformación permanente del terreno y del estado de daño asociado

Una vez conocida la aceleración crítica y con un registro de las aceleraciones generadas por un movimiento sísmico, es posible determinar la velocidad y el desplazamiento del terreno integrando, aquellos rangos del registro en los que se excede la aceleración crítica. Para facilitar el uso de esta metodología a escala regional algunos autores han desarrollado expresiones empíricas que permiten obviar el proceso de integración y estimar el desplazamiento en función de un parámetro de intensidad sísmica y de la aceleración crítica (Jibson, 1993; Jibson, 2000). Para el presente caso se usa la siguiente expresión (Yegian et al., 1991):

$$D = \left(N_{eq} * T^2 \right) * 10^{0.2 - 10.1 * \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right) + 16.4 * \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^2 - 11.5 * \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^3} \quad [11]$$

Donde a_{max} corresponde a la aceleración pico del terreno en gales, a_c es la aceleración crítica del terreno en gales, N_{eq} es el número de ciclos equivalente del sismo y T es el periodo dominante de la señal sísmica en segundos.

Aunque el desplazamiento evaluado de esta forma puede no corresponder necesariamente con el desplazamiento real del terreno, éste es un índice que permite caracterizar y comparar el comportamiento del terreno durante un movimiento sísmico (Jibson, 2000). En el contexto de la evaluación de los daños causados por los deslizamientos inducidos por sismo se hace uso de la relación entre desplazamiento y daño esperado que se presenta en la Tabla 5 (Wilson & Keefer, 1985).

Tabla 5. Estados de daño por deslizamiento a partir de D .

D (cm)	Estado de daño por deslizamiento EDD
D=0	0 (sin daño)
0<D≤5	1 (ligero)
5<D≤10	2 (fuerte)
D≥10	3 (colapso)

4.3 Evaluación espacial del estado de daño

Se describe a continuación el procedimiento de evaluación espacial del potencial de deslizamiento y del estado de daño asociado (ver Figura 5).

a) A partir del mapa geológico y de la información geotécnica disponible se definen los parámetros geotécnicos de las unidades geológicas (c , γ , e , ϕ), b) con el modelo digital del terreno se determina el mapa de pendientes (β), c) se asume una condición parcialmente saturada ($m=0.50$) uniforme para el material sobre la superficie de falla, d) se representan espacialmente los parámetros anteriores en formato ráster y se evalúa el factor de seguridad estático cada píxel del ráster, e) se validan los resultados obtenidos mediante dos criterios: la evaluación de la probabilidad de presencia/ausencia espacial entre el mapa de factor de seguridad estático como variable de predicción y el mapa de inventario de deslizamientos como variable de validación (Bonham-Carter, 1996; van Westen, 1993) y la estabilidad estática del modelo (i.e. no pueden existir zonas inestables antes de iniciar el movimiento sísmico (Jibson, 2000)). Observando los resultados de la validación se modifican (dentro de un rango razonable) los valores de los parámetros geomecánicos hasta satisfacer los dos criterios enunciados, f) Se evalúa la aceleración crítica a partir del mapa de factor de seguridad estático, g) Mediante SEDAR, dado el mapa de aceleración crítica y un escenario de amenaza caracterizado espacialmente por la aceleración pico del terreno se evalúa el desplazamiento permanente del terreno y el estado de daño asociado. Durante este análisis se asumió que aceleraciones menores a 40 gal, no producen deformación del terreno, lo anterior de acuerdo con las observaciones efectuadas en la ciudad durante eventos sísmicos anteriores (FOPAE, 2008), h) Mediante SEDAR se obtiene el estado de daño por deslizamiento de los elementos expuestos para el escenario de amenaza sísmica considerado.

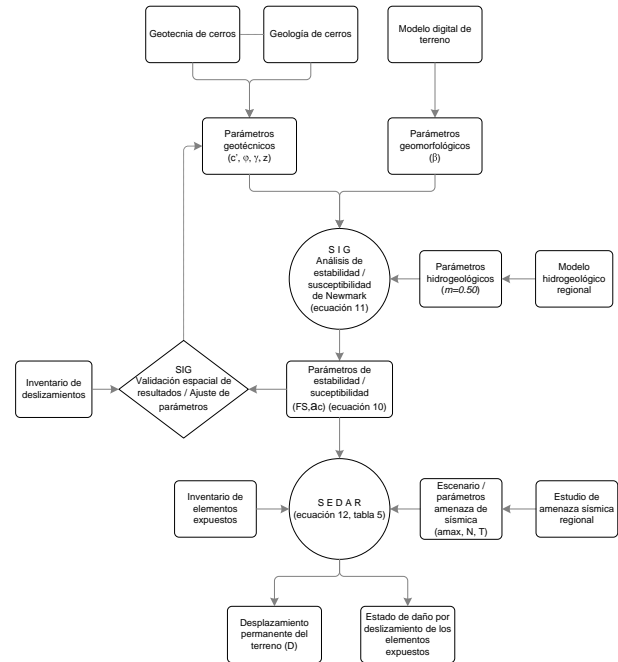


Figura 5. Metodología de evaluación del potencial de deslizamiento y del estado de daño asociado inducido por sismo.

El anterior procedimiento se aplicó a las zonas de ladera de la ciudad de Bogotá, en el proceso de evaluación se utilizó la siguiente información: a) Mapa geológico de Bogotá escala 1:10.000 (Ingeominas, 1999), b) Modelo digital del terreno (5m x 5m) año 2009, c) Bases de datos y estudios geotécnicos sobre propiedades geomecánicas de las unidades geológicas, d) Inventario de fenómenos de remoción en masa, y e) Zonificación de respuesta sísmica de Bogotá (FOPAE, 2010a).

Toda esta información fue discretizada espacialmente en formato ráster con una resolución espacial de 5m x 5m con la finalidad de realizar la evaluación espacial de la susceptibilidad de deslizamiento en cada uno de estos elementos discretos en términos de aceleración crítica de acuerdo con lo descrito en los literales a) a f) del numeral 4.3 usando un sistema de información geográfica.

Una vez realizada la evaluación espacial de la aceleración crítica y dado un escenario de amenaza sísmica se usa SEDAR para evaluar los desplazamientos permanentes del terreno de acuerdo con lo indicado en el numeral g) a h) del numeral 4.3 y establecer el estado de daño de los elementos expuestos.

Los resultados obtenidos para la ciudad de Bogotá indican que los sectores del sur oriente, especialmente en las zonas con depósitos de ladera, rocas arcillosas y cauces antiguos o activos tienen los menores valores de aceleración crítica.

La evaluación del daño secundario causado por los efectos colaterales implica seleccionar una función que integre los diferentes resultados de daño y definir las variables dependientes e independientes (Cinicioglu, 2007). Existen varias funciones y metodologías de integración (métodos heurísticos, probabilísticas, empíricos, etc.) (King, 1997).

En este caso SEDAR hace uso de la serie de funciones que se describen a continuación, donde se asume que los fenómenos causantes de los daños son independientes entre sí (i.e. el estado de daño debido al movimiento sísmico es independiente del estado de daño debido a los efectos colaterales), pero que existe dependencia entre los dos efectos colaterales (licuación y deslizamiento), condición que representa a través de la variable Grado de Daño Total por efectos colaterales (GDT). Esta variable expresa, a juicio de los autores, la dependencia y el grado de daño total causado por los efectos colaterales de licuación y deslizamiento y su valor puede determinarse a través de la

Tabla 6.

Tabla 6. Matriz de grado de daño total por licuación y deslizamiento

EDL \ EDD	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	0	1	2	3
2	1	2	3	3
3	2	3	3	3

En la matriz anterior EDL es el estado de daño por licuación evaluado según el numeral 3.2 y EDD es el estado de daño por deslizamiento evaluado según el numeral 4.2.

Con base en el GDT, SEDAR evalúa los indicadores de daño corregidos por efectos colaterales, para las edificaciones ID_c (Ec. 12), para las tuberías y cableados RR_c (Ec.13), para los tanques y puentes ED_c (Ec. 14) y para los postes y torres ED_c (Ec. 15).

$$ID_c = ID + GDT * VC \quad [12]$$

$$RR_c = RR * \left(1 + GDT * VC \right) \quad [13]$$

$$ED_c = ED + \left(GDT * VC \right) \quad [14]$$

$$ED_c = GDT \quad [15]$$

Donde debido al movimiento sísmico se tiene: ID es el índice de daño de las edificaciones, RR es la tasa de roturas de las tuberías o el porcentaje de daño de los cableados, ED es el estado de daño de los tanques y puentes. VC es el valor de corrección de daño por efectos colaterales definido a juicio del usuario.

En el caso de los postes y torres se consideró que el daño causado por el movimiento sísmico es despreciable comparado con el daño causado por los efectos colaterales. En todos los casos el valor del indicador de daño corregido por efectos colaterales se acota al valor máximo del indicador de daño (e.i. el ID_c de edificaciones debe ser menor o igual a 100%).

6 RESULTADOS

Según cifras oficiales del año 2010, la ciudad de Bogotá cuenta con una población de 7'350.000 habitantes. En la ciudad existen 888.000 lotes, de los cuales el 92% están edificados. De este último porcentaje tienen uso residencial el 74.2%, uso comercial y de servicios el 21.8% y uso industrial el 2.4%.

En Colombia han existido tres códigos de construcción de sismo resistencia, correspondientes a los años 1985, 1998 y 2010. Un 39% de las edificaciones existentes fueron construidas antes de la publicación del primer código (1985), el 28% lo fueron entre 1985 y 1997, y un 23% después de 1998. El 50.7% de las edificaciones tienen entre 3 y 6 pisos, el 40.4% entre 1 y 2 pisos, y el 8.9% corresponden a edificaciones de más de 7 pisos de altura. El 15% de las edificaciones de la ciudad se encuentran localizadas en las zonas de ladera y el 20% en zonas aluviales con potencial de licuación.

El escenario de amenaza para el cual se presentan los resultados de daño corresponde al utilizado para el diseño de edificaciones sismo resistentes (NSR-10, 2010), el cual se asocio a un sismo generado en una fuente regional (Falla Frontal) con una magnitud de 7.3 en escala de Richter a una distancia promedio de 35 kilómetros y una profundidad de 25 Km. Dicho evento está asociado a un periodo de retorno equivalente de 475 años y produciría aceleraciones máximas en superficie de 0.2g en las zonas de cerros, 0.22 a 0.26g en las zonas de piedemonte, 0.15 a 0.2g en la zona lacustre y 0.13 a 0.18g en zonas aluviales.

La Figura 6 presenta la distribución espacial del grado de daño total por efectos colaterales evaluado para el escenario de amenaza sísmica descrito anteriormente y de acuerdo con los valores de la matriz presentada en el numeral 5. El valor de este parámetro es el utilizado en la evaluación espacial de los índices de daño corregidos por efectos colaterales de los elementos expuestos.

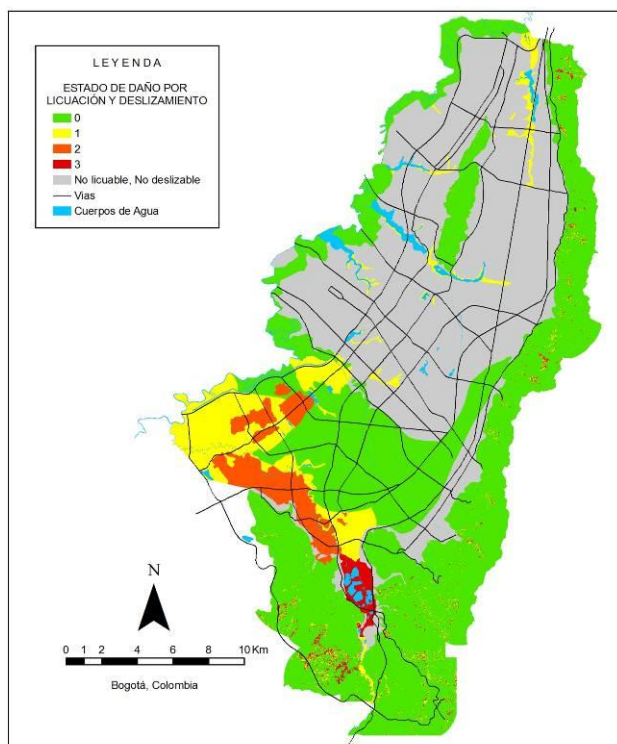


Figura 6. Mapa de grado total de daño por efectos colaterales para el escenario de amenaza considerado.

Para fines del presente documento se presentarán los resultados de daño correspondientes a edificaciones y redes de tubería (líneas vitales).

La evaluación de daños asociados al movimiento sísmico en edificaciones se efectuó mediante la metodología de índices de vulnerabilidad y daño (Benedetti y Petrini, 1984) y de Índices de daño (Miranda, 1999) según se indicó en el numeral 2, y los índices de daño corregidos por efectos colaterales se evaluaron mediante Ec. 12. Para la primera metodología, el índice de daño inicial promedio de las edificaciones de la ciudad es de 13.5%, mientras que el índice de daño corregido por efecto colaterales promedio es de 15%. Para la segunda metodología (Miranda, 1999), el índice de daño inicial promedio de las edificaciones de la ciudad es de 10.2% mientras que el índice de daño corregido por efecto colaterales promedio es de 11.8%. En ambos métodos los daños corregidos por efectos colaterales se concentran en las zonas de ladera y piedemonte de del sur oriente de a ciudad.

Para las redes de tuberías se evaluó el factor de vulnerabilidad con el método de Japan Waterworks Association (1998) y las tasas de roturas iniciales con la propuesta de Kubo & Katayama (1975). Las tasas de roturas corregidas por efectos colaterales fueron evaluadas mediante Ec. 13. Para un total de 541.726 elementos analizados, las tasas de rotura inicial asociado al movimiento sísmico, varían entre 0.003 a 0.86, con un valor medio de 0.20 roturas por kilómetro, las tasas de rotura corregidas por efectos colaterales varían entre

0.003 a 1.40, con un valor medio de 0.20 roturas por kilómetro.

7 CONCLUSIONES

Se propone un enfoque conceptual y metodológico que permite realizar de manera sistemática e integrada la evaluación espacial de daños por terremoto incluyendo los daños asociados al movimiento sísmico y a los efectos colaterales de licuación y deslizamiento en un contexto urbano.

La evaluación del estado de daño de los elementos expuestos se realiza en tres etapas: 1) se evalúa la vulnerabilidad sísmica de los elementos expuestos y la susceptibilidad del terreno a licuación y deslizamiento, 2) dado un escenario de amenaza sísmica, se evalúan los daños iniciales, asociados al movimiento sísmico, tanto en los elementos expuestos como en el terreno, 3) se evalúa el daño corregido por efecto colaterales de los elementos expuestos mediante una serie de funciones que integran los resultados de daño inicial con los daños inducidos por los efectos colaterales.

Los resultados de daño inicial y secundario en edificaciones y redes de tubería permiten ilustrar la incidencia que tienen sobre un elemento expuesto los diferentes fenómenos causantes del daño (movimiento sísmico, licuación y deslizamiento). Mediante SEDAR es posible completar la evaluación de daños de la totalidad del inventario de elementos expuestos considerando otros escenarios de amenaza sísmica. Un análisis integrado de todos esos resultados permite establecer un escenario general de riesgo sísmico de la ciudad en términos de daños a los elementos expuestos y afectaciones a la población.

Dada la naturaleza del marco conceptual y de las herramientas técnicas usadas para su implementación, se considera que es posible aplicar la metodología propuesta a otros ambientes urbanos y que siempre será posible mejorar la confiabilidad y validar los resultados a medida de que se disponga de información más completa y actualizada.

8 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá – FOPAE por el apoyo incondicional al grupo de escenario de daños de la coordinación de investigación y desarrollo.

9 REFERENCIAS

- ALA (2001). *Seismic Fragility Formulations for Water Systems*. Part 1 – Guideline. American Lifelines Alliance (ALA). ASCE-FEMA, 104 p.
- Benedetti, D. & Petrini, V. (1984). *Sulla Vulnerabilità Sísmica di Edifici in Muratura: Prioste di un Método di Valutazione*. Roma: Lindustria delle Costruzioni.
- Bonham-Carter, G.F., (1996) *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon, Elsevier Science Ltd. 338 p.

- Cardona, O. D. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Universidad Politécnica de Cataluña, PhD thesis, Barcelona, España.
- Carreño, M. L. (2005). *Seismic risk evaluation for an urban centre*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Cinicioglu, S. F., Bozbey, I., Oztoprak, S., kelsoglu, M.K., (2007). *An integrated earthquake damage assessment methodology and its application for two districts in Istanbul, Turkey*. Engineering Geology 94 pp 145-165.
- Coburn, A. y Spence, R. (1992). *Earthquake Protection*. John Wiley & Sons, Chinchester, England. 355 pp.
- FEMA. (2003). *HAZUS MH - Multi-hazard loss estimation methodology*. Eashington D.C.
- FOPAE. (2009). *Actualización y sistematización de escenario de daños por terremoto para Bogotá Fase 1*. Bogotá Colombia.
- FOPAE. (2010a). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño de sismoresistente de edificaciones*. Bogotá Colombia.
- FOPAE. (2010b). *Actualización y sistematización de escenario de daños por terremoto para Bogotá Fase 2*. Bogotá Colombia.
- Geo-hazards International. (1999). *RADIUS - Guidelines for the implementation of earthquake risk management projects*.
- Ingeominas & Universidad de los Andes (1997). *Microzonificación sísmica de Bogotá*. Colombia.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, T., Tokida, K.I., Yasuda, S.A. (1978). *A practical method for assessing soil liquefaction potential base on case studies at various sites in Japan*. Proceeding of the second international conference on microzonation, San Fransisco, pp 885-896.
- Japan Waterworks Association (1998). *Damage estimation of water supply pipeline due to earthquake*.
- Jibson, R. W., Harp., E. L., Michael., J.A. (2000). *A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps*. Engineering Geology 58 pp 271-289.
- Jibson, R.W., (1993) *Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis*. Transport. Res. Rec. 1411, 9-17.
- Jibson, R.W., Harp, E.L., Michael, J.A. (1998). *A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: An example from the Los Angeles California area*. US Geol.Surv. Open-File Rep. 98-113 17pp.
- JICA, (2002). *The Study on Disaster Prevention in the Bogota Metropolitan Area in the Republic of Colombia*. Japan International Cooperation Agency, Pacific Consultants international, OYO Corporation.
- Kubo & Katayama (1975) *Damage estimation of underground water suplí pipeline*.
- Lantada, M. (2007). *Evaluación del Riesgo Sísmico Mediante Métodos Avanzados y Técnicas GIS*. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis doctoral en Ingeniería. Barcelona España.
- Miranda, E (1999), *Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings*. Journal Structural Engineering. Eng, vol 125 No 4, 417 – 425.
- Newmark, N.M., (1965). *Effects of earthquakes on dam and embankments*. Fifth Ranking lecture. Geotechniques 15(2), 139-193.
- Oliveira C.S., Roca A., and Goula X. (2006). *Assessing and Managing Earthquake Risk*. Springer. Netherlands.
- Risk Management Solutions Inc., (1997) *Earthquake loss Estimation Methodology – HAZUS 97 Technical Manual*, Federal Emergency Management Agency, Washington , D.C. , USA.
- Seed, H.B., & Idriss I.M., (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, Vol 97, No. SM9.
- Van Westen, J.C. (1993). *Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS based hazard zonation*. Geol Rundsh, 86: 404-414
- Wieczorek, G.F., Wilson, R.C., Harp, E.L. (1985). *Map showing slope stability during earthquakes in San Mateu County California*. US Geol. Surv. Misc. Invest. Map I-1257-E.
- Wilson, R.C., Keefer, D.K., (1983). *Dynamic analysis of a slope failure from the 6 august 1979 Coyote Lake, California, earthquake*. Seismol. Soc. Am. Bull. 73, 863-877.
- Wilson, R.C., Keefer, D.K., (1985) *Predicting areal limits of earthquake induced landsliding*. In: Ziony, J.I. (Ed), *evaluating earthquake hazards in Los Angeles region - An earthScience perspective*. US Geol. Surv. Prof. Paper 1360, 316-345
- Yegian, M.K., Marciano, E., Ghahraman, V.G., (1991). *Earthquake induced permanent deformations: probabilistic approach*. ASCE Journal of Geotechnical Engineering.