



Actualización de la microzonificación sísmica de Manizales

Update of the seismic microzonation of Manizales

Gabriel Bernal^{1*}, Omar Darío Cardona², Mario A. Salgado¹ y Claudia Villegas³

¹Investigador, Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

²Profesor, Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia

³Consultora, INGENIAR CAD/CAE Ltda., Bogotá, Colombia

RESUMEN

Se actualizó la microzonificación sísmica de Manizales mediante la aplicación de una metodología moderna para la evaluación de efectos de sitio en ciudades, la cual está basada en la geometría de las formaciones geológicas conformadas por suelos blandos. Sobre la base de la interpretación geológica para el área de la ciudad, la elevación (sobre el nivel del mar) de los contactos geológicos es definida, y se obtiene un modelo geométrico tridimensional del subsuelo de la ciudad. La información geotécnica disponible se utiliza para asignar tipos de suelo al modelo geométrico. Las características estáticas y dinámicas del suelo se definen como variables aleatorias y sus momentos de probabilidad se calculan mediante estadística sobre los datos geotécnicos disponibles. Una malla de cálculo compuesta por 1275 nodos se define sobre la ciudad y para cada nodo se obtiene una estratigrafía sintética con parámetros geotécnicos asignados siguiendo sus distribuciones de probabilidad. La respuesta dinámica se calcula, para cada nodo de la malla, por medio de un análisis 1D no lineal (lineal equivalente), utilizando un conjunto de espectros de amplitudes de Fourier generados a nivel de roca firme mediante un modelo de espectro de fuente, para diferentes combinaciones de magnitud y distancia. De esta manera se definen funciones de atenuación del movimiento fuerte específicas de cada nodo de la malla de cálculo. Se calcula la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno y se obtienen los espectros de amenaza uniforme para 475 años de periodo de retorno. A partir de dichos espectros se ajustan espectros de diseño armonizados a la NSR 10, mediante la búsqueda aleatoria de los parámetros F_a y F_v que garantizan un ajuste óptimo. Se calculó la amenaza a nivel de roca firme para establecer los valores de los parámetros A_a y A_v . De esta manera, para cualquier ubicación dentro de la ciudad, es posible establecer los valores para determinar el espectro de diseño adecuado. Los resultados de esta microzonificación se presentan de manera rasterizada, lo cual implica un salto cualitativo desde la concepción tradicional de la microzonificación sísmica por zonas, a una concepción por puntos dentro de una malla de cálculo, y en general en cualquier ubicación seleccionada haciendo uso del modelo desarrollado.

Palabras clave: Microzonificación sísmica, amenaza sísmica, respuesta dinámica de suelos, normativa sismo resistente.

ABSTRACT

Seismic microzonation of Manizales was updated by applying a modern methodology for assessing site effects in cities, which is based on the geometry of geological formations that are formed by soft soils. Based on the geological interpretation for the area of the city, the elevation (above sea level) of geological contacts is defined, and a three-dimensional geometric model of the subsoil of the city is obtained. The geotechnical information available is used to map soil types to the geometric model. The static and dynamic characteristics of the soil are defined as random variables and their probability moments are calculated using statistics on the geotechnical data available. A computational grid of 1275 nodes is defined over the city and for each node synthetic stratigraphies are constructed with geotechnical parameters obtained following their probability distributions. The dynamic response is calculated for each node of the grid, by a 1D nonlinear analysis (linear equivalent) using a set of Fourier amplitude spectra generated at bedrock level using a source spectrum model, for different combinations of moment magnitude and hypocentral distance. Site-specific attenuation functions are generated and used to calculate seismic hazard at surface level. Uniform hazard spectra for 475 years return period are obtained. From these spectra harmonized design spectra to the NSR 10 are generated by random search of F_a and F_v parameters to ensure optimum fit. The hazard at bedrock was calculated to establish the values of A_a and A_v parameters. Thus, for any location within the city, the values to determine the adequate design spectrum can be obtained from the model. The results are presented in raster way, which is a qualitative leap from the original conception of seismic microzonation for areas to a grid of points, so the design spectrum can be obtained in any location by using the model.

Keywords: Seismic microzonation, seismic hazard, soil dynamic response, earthquake resistant design regulations.

* gabernal@cimne.upc.edu



1. INTRODUCCIÓN

La Universidad de los Andes adelantó en el 2002 el Estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales, con la colaboración de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. En este estudio se realizó la investigación geotécnica del subsuelo de la ciudad, la evaluación de la respuesta dinámica, y la definición de espectros de diseño en 3 zonas. Las zonas corresponden a:

- Zona A: Depósitos de caída piroclástica (ceniza), de espesor variable.
- Zona B: Depósitos de relleno.
- Zona C: Formaciones rocosas, típicamente del periodo terciario, y asociadas a procesos como flujos de lodos y avenidas torrenciales. Corresponden a suelos de poco espesor.

El estudio realizado por la Universidad de los Andes en 2002, es un excelente referente y, a opinión de los autores, uno de los estudios más avanzados para su época en términos de ingeniería sísmica y dinámica de suelos. No obstante la existencia de un estudio de microzonificación sísmica en Manizales, se aplica en este estudio una metodología novedosa para la evaluación de efectos de sitio en la ciudad, la cual está basada en la geometría de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos (Bernal et al., 2013). Esta metodología permite calcular la respuesta dinámica del suelo en cualquier punto dentro de la ciudad, y consecuentemente realizar cálculos de amenaza sísmica a nivel de superficie y la armonización de dicha amenaza a la normativa nacional.

2. MODELO GEOTÉCNICO DE MANIZALES

Para determinar la respuesta dinámica en una ubicación específica, se requiere conocer las características estratigráficas y propiedades geotécnicas de los suelos existentes. Estos factores son cruciales para la correcta determinación de los valores de amplificación asociados al comportamiento dinámico del suelo en condiciones de movimiento fuerte. La manera como cada uno de estos factores influyen la respuesta definitiva ha sido objeto de estudios teóricos y experimentales a nivel mundial en años recientes.

La información geotécnica existente para Manizales es el resultado de una serie de estudios que se han llevado a cabo en la ciudad desde hace más de una década. Se cuenta entonces con información geotécnica referente a exploraciones de suelos con fines de evaluación de respuesta dinámica local, información de profundidad de basamento rocoso, periodos dominantes de los depósitos de suelo y amenaza general a nivel de superficie, como resultado del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad.

2.1 Geología de Manizales

La mayoría de la extensión de la ciudad se encuentra sobre depósitos de caída piroclástica (ceniza), de espesor variable. Se destacan también el complejo Quebradagrande, la formación Manizales y la formación Casabianca. El Complejo Quebradagrande incluye rocas volcánicas y sedimentarias, principalmente areniscas líticas, brechas sedimentarias, conglomerados polimícticos con clastos volcánicos, cuarzo lechoso, fragmentos de anfibolitas, chert, lutitas, lentes de calizas y grauvacas (Duque, 2006). Presenta en general alto buzamiento con excepciones locales.

Según Naranjo y Ríos (1989), la Formación Manizales suprayace el basamento metasedimentario y es a la vez la unidad inferior del supraterrano volcánico de Manizales. Está constituida por un conjunto de rocas sedimentarias vulcanogénicas con clastos del complejo volcánico Ruiz-Tolima. Los afloramientos de la Formación Manizales se dan al occidente de la ciudad, en donde la unidad presenta un eskarpe de falla de más de treinta metros de altura asociado al sistema Romeral. La Formación Casabianca es en términos generales igual a la anterior. Subyace a los depósitos de caída piroclástica que constituyen el terreno superficial de Manizales. Espacialmente, reposa sobre la Formación Manizales y el Complejo Quebradagrande.

La mayoría de la superficie del área urbana de Manizales está constituida por dos unidades cuaternarias de caída piroclástica. La más antigua es una capa de tobas volcánicas afectadas por la última glaciación. La segunda unidad está caracterizada por tefras (cenizas) estratificadas no consolidadas y de ambiente subaéreo. Las capas de los diferentes eventos son visibles y alternan entre ellas lapilli, arena volcánica y ceniza.

2.2 Información geotécnica

En el estudio de microzonificación sísmica de Manizales (Uniandes, 2002) se realizaron 23 perforaciones exploratorias que constituyen la mejor base de información geotécnica para la ciudad, en términos de evaluación de la respuesta dinámica de los suelos. La mayoría se encuentran ubicados sobre la formación de depósitos de caída piroclástica. La Tabla 1 presenta el nombre, ubicación y profundidad total explorada de los sondeos disponibles. De cada sondeo se cuenta con la siguiente información en profundidad:



- Clasificación del suelo en el sistema USCS[†].
- Descripción del material del estrato.
- Humedad natural del suelo, límites de Atterberg (límite plástico y límite líquido) y propiedades índice derivadas de estos (índice de plasticidad e índice de liquidez).
- Peso específico.
- Perfil de velocidad de onda de cortante, medido mediante ensayo Down Hole.

Tabla 1: Listado de sondeos disponibles obtenidos del Estudio de Microzonificación Sísmica de Manizales (Uniandes, 2002)

Sondeo	Ubicación	Longitud	Latitud	Profundidad
1	Clínica Seguros Sociales	-75.53	5.08	8.75
2	Ingeominas	-75.52	5.07	23.5
3	Parque Caldas	-75.51	5.07	40
4	Facultad de Arquitectura	-75.49	5.06	42
5	Confamiliares	-75.50	5.06	34
6	Escuela Atanasio Girardot	-75.49	5.05	34
7	Colegio Bosques del Norte	-75.49	5.08	31.5
8	Colegio San Pío X La Enea	-75.46	5.03	18
9	Instituto Integrado La Sultana	-75.47	5.06	21
10	Coldeportes	-75.50	5.07	42
11	Colegio Santa Inés	-75.48	5.05	50
12	Subestación Marmato CHEC	-75.51	5.06	16.5
13	Catedral	-75.52	5.07	40
13	Catedral	-75.52	5.07	40
14	Alejandria 1	-75.49	5.05	23.5
15	Alejandria 2	-75.49	5.05	9
16	Torrear	-75.49	5.05	10
17	La Gotera (UNAL)	-75.49	5.06	15
18	P. Fundadores	-75.51	5.07	17
20	Estadio Palogrande	-75.49	5.06	29.5
21	Antigua Alcaldía	-75.52	5.07	25
21	Antigua Alcaldía	-75.52	5.07	25
23	Villa Carmenza	-75.51	5.06	14.8

2.3 Geometría de las formaciones geológicas

A partir de la información de los sondeos existentes, junto con sondeos adicionales obtenidos del estudio de microzonificación sísmica de Manizales (Uniandes, 2002), y estableciendo el límite a nivel de superficie del depósito de suelo blando como el contacto con las formaciones rocosas (Casabianca, Manizales), se definió una capa de espesor aproximado del depósito blando.

La topografía empleada en este estudio tiene una resolución espacial de 30 m y fue obtenida del proyecto ASTER GDEM[‡] de la NASA. La topografía y la base del depósito de suelo blando constituyen la geometría del problema, y permiten definir espesores de suelo blando en toda la ciudad. La Figura 1 muestra un esquema tridimensional de las capas de topografía de contacto rocoso y topografía superficial.

Para el caso de la geometría de la tabla de agua, se estableció un valor promedio de 7 metros de profundidad para toda la ciudad. Esta suposición se adoptó por simplicidad dada la dificultad en la definición de la variación espacial de este parámetro.

[†] Unified Soil Classification System

[‡] ASTER Global Digital Elevation Map. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

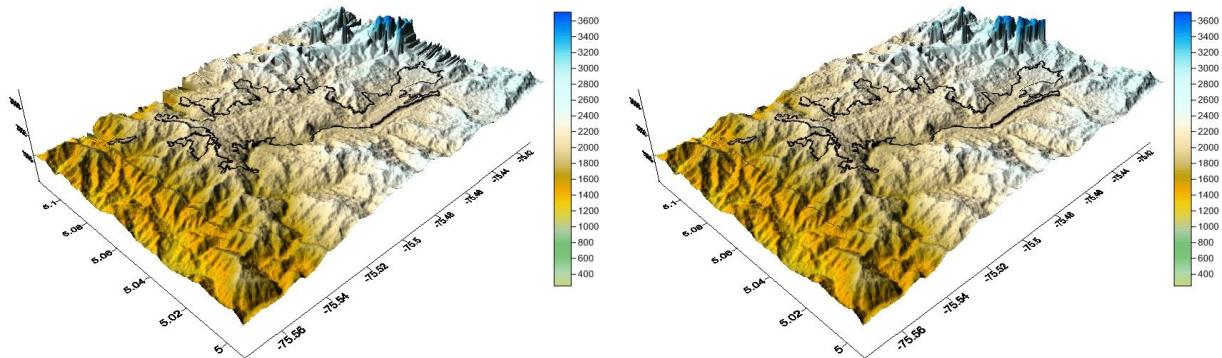


Figura 1: Esquema tridimensional de la topografía del contacto de roca (izquierda) y de la topografía de la superficie (derecha). Valores en metros sobre el nivel del mar.

2.4 Modelo geotécnico

En este estudio se aplica una metodología moderna de evaluación de los efectos de sitio en grandes extensiones, la cual se basa en la generación de estratigrafías sintéticas sobre ubicaciones arbitrarias en la ciudad, las cuales no han sido exploradas anteriormente. Estas estratigrafías son la base para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos blandos. La correcta aplicación de esta metodología depende en gran medida de la correcta definición de las estratigrafías.

Las estratigrafías se construyen en función de la geometría de las formaciones geológicas y de los tipos de suelo definidos para cada una. Los tipos de suelo representan la variación en profundidad de los momentos estadísticos de todas las propiedades geotécnicas. Esto quiere decir que las propiedades geotécnicas se modelan como variables aleatorias. Las propiedades geotécnicas incluidas en el modelo son:

- Contenido de humedad
- Límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico)
- Propiedades índice (índice de plasticidad e índice de liquidez)
- Peso específico
- Velocidad de onda de cortante

Se definen entonces los siguientes parámetros, en función de la profundidad, para cada una de las propiedades listadas: *valor esperado*, *varianza*, *límite mínimo* y *límite máximo*. Con estos parámetros se define una distribución de probabilidad normal truncada para cada propiedad. Esto permite simular estratigrafías en cada sitio de cálculo. La simulación de estratigrafías se realiza bajo tres preceptos fundamentales que se asumen ciertos:

1. Las formaciones geológicas superficiales son las que dan origen a los depósitos de suelo blando.
2. Materiales con el mismo origen geológico tienden a tener propiedades similares, que presentan variaciones importantes en la profundidad.
3. Las propiedades geotécnicas que caracterizan los suelos tienen incertidumbre. Esta incertidumbre puede ser cuantificada mediante análisis estadísticos sobre los datos de los suelos asociados a la misma formación geológica.

Dado que, siguiendo esta metodología, la gran mayoría de los puntos de cálculo corresponden a sitios no explorados aún, la simulación de estratigrafías permite cuantificar la incertidumbre asociada a los valores asignados a las propiedades geotécnicas. Ahora bien, se sabe que las propiedades geotécnicas están correlacionadas en profundidad, dado que si bien el depósito de suelo blando se modela como un medio estratificado, realmente los suelos que pertenecen a la misma formación geológica no presentan estratos marcados, sino variaciones suaves en el valor de sus propiedades en profundidad. Con el fin de cuantificar el nivel de correlación en profundidad, se calcula una matriz de auto correlación C para cada propiedad geotécnica.



$$C = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \rho_{1,3} & \dots & \rho_{1,n} \\ \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & \rho_{2,3} & \dots & \rho_{2,n} \\ \rho_{3,1} & \rho_{3,2} & \rho_{3,3} & \dots & \rho_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n,1} & \rho_{n,2} & \rho_{n,3} & \dots & \rho_{n,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

C es una matriz simétrica y definida positiva de $n \times n$, en donde n es el número total de intervalos en profundidad. Los elementos de la matriz son los coeficientes de correlación entre intervalos. El coeficiente de correlación entre los intervalos i y j ($\rho_{i,j}$) se determina como,

$$\rho_{i,j} = \frac{Cov(X_i, X_j)}{\sigma_{x_i} \cdot \sigma_{x_j}} \quad (3)$$

en donde X es el parámetro geotécnico en consideración, $Cov(X_i, X_j)$ es la covarianza del parámetro entre los intervalos i y j , y σ_{x_i} y σ_{x_j} son las desviaciones estándar del parámetro en los intervalos i y j , respectivamente. La covarianza $Cov(X_i, X_j)$ se determina como,

$$Cov(X_i, X_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (X_{i,k} - \bar{X}_i) \cdot (X_{j,k} - \bar{X}_j) \quad (3)$$

en donde N es el número total de muestras (sondeos reales) que tienen datos en ambos intervalos i y j . De esta manera, una propiedad geotécnica X , queda definida por:

1. Su valor esperado, como función de la profundidad $\mu_X(z)$
2. Su varianza, como función de la profundidad $\sigma_X^2(z)$
3. Sus límites de truncamiento mínimo y máximo, como función de la profundidad $L1_X(z)$, $L2_X(z)$
4. Su matriz de auto correlación C_X

Dado que se definió que los suelos blandos de Manizales están asociados principalmente al depósito de caída piroclática, se define un único tipo de suelo para la ciudad. Este tipo está descrito completamente por las características listadas anteriormente, las cuales se obtienen mediante un análisis estadístico sobre los datos disponibles en los sondeos existentes.

Las curvas de degradación del módulo de cortante y amortiguamiento para el suelo fueron obtenidas del estudio Uniandes (2002), en el cual se definieron estas curvas como función del índice de liquidez, por ser esta una propiedad que correlaciona muy bien con las variaciones en amortiguamiento y módulo de corte para diferentes niveles de deformación cortante.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{0.0006 + 0.0002 \cdot IL} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

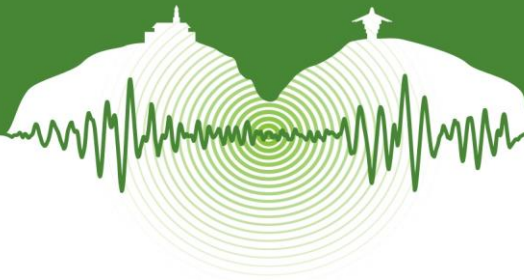
$$\beta = (0.1528 + 0.0205 \cdot IL) \cdot \left(1 - \frac{G}{G_0} \right) \quad (5)$$

En donde, G/G_0 es la relación de variación del módulo de cortante respecto al módulo máximo (G_0), β es el amortiguamiento, γ es la deformación cortante e IL es el índice de liquidez. Como modelo de degradación de rigidez y amortiguamiento en suelos granulares, se emplea el valor promedio de la relación propuesta por Seed e Idriss (1970).

3. RESPUESTA DINÁMICA DE SUELOS

3.1 Estratigrafías sintéticas

Las estratigrafías sintéticas se construyen mediante la simulación de los valores de las propiedades geotécnicas en profundidad. Los pasos para construir una estratigrafía sintética son: 1) se determina la profundidad total de la estratigrafía según el modelo geológico; 2) esta profundidad se subdivide en capas de igual espesor h ; 3) para cada capa, se determinan las propiedades geotéc-



nicas mediante la generación de un número aleatorio, siguiendo su distribución de probabilidad; 4) la secuencia de números aleatorios R que definen la variación en profundidad de una propiedad geotécnica en la estratigrafía simulada, es alterada por la matriz triangular U^{\S} que se define como,

$$U^T U = C \quad (6)$$

Se genera entonces una secuencia de números aleatorios correlacionados R_c , de la siguiente manera,

$$R_c = RU \quad (7)$$

Se definió la malla de cálculo con un total de 50x50 nodos, recortada por un polígono que contiene a la ciudad de Manizales, para un total de 1275 sitios de cálculo. En cada nodo de la malla de cálculo se generó un conjunto de 20 estratigrafías sintéticas, con capas de suelo uniforme de 1 metro de espesor. Cada capa tiene propiedades asignadas de manera aleatoria en función de la distribución de probabilidad de los parámetros geotécnicos y su correlación en profundidad. Adicionalmente a las propiedades geotécnicas básicas, se definen el nivel de amortiguamiento inicial (igual a 3% en todos los casos) y el esfuerzo de confinamiento efectivo, el cual es una función del peso específico de los estratos y de la profundidad del nivel freático.

3.2 Incertidumbre en la respuesta del suelo

La generación de un conjunto de 20 estratigrafías sintéticas por sitio de cálculo, permite estimar el nivel de incertidumbre en la respuesta dinámica del suelo por efecto del desconocimiento del valor exacto de las propiedades geotécnicas. La evaluación de la incertidumbre en la respuesta dinámica de suelos blandos es un tema que ha sido objeto de estudio desde hace varios años y que a la fecha no ha sido resuelto del todo. En este trabajo, se sigue el enfoque propuesto por Bazurro y Cornell (2004), aplicando la modificación propuesta por Stewart y Goulet (2006), en la cual, la desviación estándar del logaritmo de la aceleración espectral en superficie $Sa^s(f)$ (en donde f es el inverso del periodo de vibración estructural) se define como,

$$\sigma_{\ln Sa^s(f)} \approx \sqrt{\sigma_{\ln Sa(f)}^2 + b_1^2 \sigma_{\ln PGA}^2 + \sigma_{\ln AF(f)}^2 + 2b_1 \rho \sigma_{\ln PGA} \sigma_{\ln Sa(f)}} \quad (8)$$

en donde $\sigma_{\ln Sa(f)}$ es la desviación estándar de la aceleración espectral en roca (dada por la función de atenuación), $\sigma_{\ln PGA}$ es la desviación estándar de PGA en roca (dada por la función de atenuación), $\sigma_{\ln AF(f)}$ es la desviación estándar asociada a la incertidumbre en la respuesta dinámica del sitio, b_1 es la pendiente de la relación entre $\ln AF(f)$ y $\ln PGA$, y ρ es el coeficiente de correlación entre los términos de aceleración espectral y PGA en roca.

3.3 Respuesta dinámica del suelo

El método más empleado en la actualidad es el modelo de respuesta lineal equivalente propuesto por Idriss y Seed (1968) y Seed e Idriss (1970). En este método se calcula la respuesta lineal del estrato de suelo usando un método de matriz propagadora y, por medio de un proceso iterativo, se ajustan las propiedades (rigidez a cortante y amortiguamiento) en función de modelos constitutivos de comportamiento no lineal del suelo.

Uno de los métodos de matriz propagadora más ampliamente usado es el desarrollado originalmente por Thompson (1950) y corregido por Haskell (1953). Ha sido empleado no sólo en evaluación de respuesta dinámica, sino en sismología en general, por estar enfocado al análisis de ondas superficiales (Rayleigh y Love) en medios estratificados. Este método (conocido en sismología como el método de Thompson-Haskell) es un caso especial del método de matriz propagadora introducido por Gilbert y Backus (1966). Conceptualmente el método de la matriz propagadora es muy simple. El medio verticalmente heterogéneo se reemplaza por una serie de capas de materiales homogéneos, con características mecánicas conocidas. El movimiento se propaga verticalmente mediante la combinación de las propiedades de todos los estratos en la matriz propagadora. Dado que se trata de operaciones matriciales simples, el método es computacionalmente muy eficiente. Detalles del método de la matriz propagadora pueden consultarse en Aki y Richards (2002).

3.4 Resultados

A partir del análisis de la respuesta dinámica se obtienen parámetros importantes que caracterizan la respuesta de los suelos de Manizales. La Figura 6 presenta el mapa de periodos fundamentales de vibración calculados y la distribución espacial del valor promedio de la desviación estándar del logaritmo de la función de amplificación del espectro de respuesta ($\sigma_{\ln AF(f)}$).

^{\S} La matriz U se determina aplicando la descomposición de Cholesky a la matriz C .

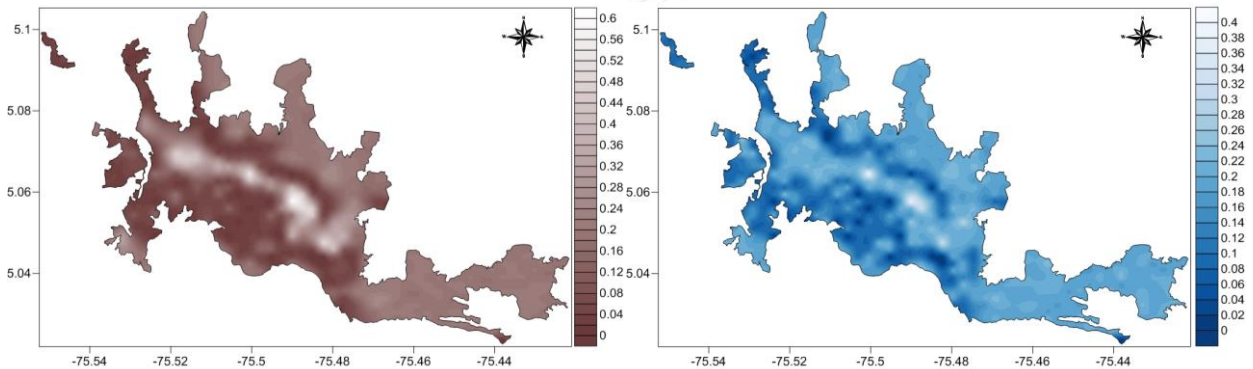


Figura 6: Periodos fundamentales de vibración (izquierda) y distribución espacial del promedio de la desviación estándar del logaritmo de la función de amplificación del espectro de respuesta (derecha).

4. AMENAZA SÍSMICA EN SUPERFICIE DEL TERRENO

En las últimas décadas se ha desarrollado el enfoque probabilista en los análisis de amenaza sísmica, con el fin de involucrar de manera analítica la incertidumbre asociada con las variables que intervienen en el peligro sísmico de una región. Parámetros como la frecuencia de ocurrencia de determinado sismo, la probabilidad de que ocurra en un sitio específico, probabilidades de excedencia de intensidades sísmicas, entre otros, son incluidos en los modelos de cálculo, para conformar un análisis probabilista de amenaza sísmica (PSHA por sus siglas en inglés). El modelo de fuentes empleado ha sido tomado del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS 2010, Salgado et.al. 2010). Se tienen un total de 39 fuentes, 31 de las cuales son de tipo cortical, y 8 de subducción.

4.1 Atenuación de las intensidades de movimiento fuerte

Una vez calculada la incertidumbre asociada a la respuesta dinámica del suelo en los sitios de cálculo, es posible generar funciones de atenuación que involucren esta incertidumbre junto con las características de amplificación propias del sitio. Esto permitirá realizar un análisis de amenaza sísmica en cada ubicación con el fin de obtener espectros de amenaza uniforme.

Para este fin se emplea un modelo calibrado del espectro de amplitudes de Fourier (EAF) radiado desde las fuentes sísmicas. Este modelo permite establecer el EAF teórico, dados un momento sísmico y una distancia hipocentral. Dicho EAF teórico es entonces empleado para calcular la respuesta dinámica de la columna de suelo del sitio particular, determinando de esta manera el EAF a nivel de superficie del terreno. De este último, empleando teoría de vibraciones aleatorias, se obtiene la aceleración espectral en superficie. Esta operación se repite para todo el juego de magnitudes y distancias que componen la función de atenuación a nivel de roca firme, de manera que se determina una función de atenuación para el sitio. Finalmente, para cada periodo estructural considerado, se le asocia a la función de atenuación su valor de desviación estándar calculado. El procedimiento se repite para todos los sitios de cálculo. Estas funciones de atenuación están definidas entonces en términos de aceleraciones espectrales para varios periodos estructurales.

4.2 Cálculo de la amenaza sísmica

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, puede calcularse la amenaza sísmica considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentra la estructura. Este cálculo se llevó a cabo en el programa CRISIS 2014 (Ordaz et al., 2014).

La amenaza o el peligro sísmico se expresa, entonces, en términos de la tasa de excedencia de valores dados de intensidad sísmica. Si se leen los valores de intensidad correspondientes a valores fijos de tasa de excedencia (o alternativamente periodos de retorno) en cada uno de los nodos de la malla de cálculo, es posible generar espectros de amenaza uniforme y mapas de amenaza sísmica. La Figura 7 presenta mapas de amenaza sísmica en superficie para PGA y para aceleración espectral con $T=0.5$ seg. En ambos casos el periodo de retorno es de 475 años.

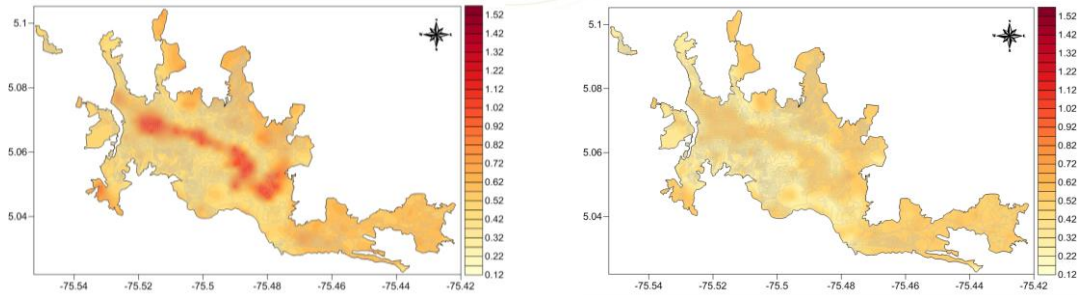
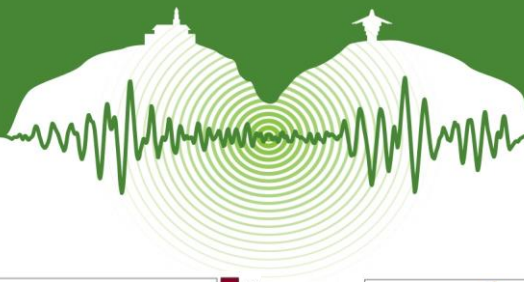


Figura 7: Mapas de amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno. Aceleración espectral para $T = 0.0$ seg (izquierda) y $T = 0.5$ seg (derecha).

5. ARMONIZACIÓN A LA NSR-10

5.1 Procedimiento de ajuste de formas espectrales

Los espectros de amenaza uniforme obtenidos en los análisis anteriores se utilizan como base para establecer las formas finales de los espectros de diseño. Estos espectros se definen de manera armonizada con lo especificado en la NSR-10. Para la armonización de las formas espectrales se emplea un procedimiento computacional mediante el cual se ajusta una forma espectral particular al espectro de amenaza uniforme calculado en cada sitio. Para garantizar un buen ajuste se minimizan tres características diferentes:

1. La diferencia en el área bajo la curva de los espectros de amenaza y diseño
2. La diferencia máxima de aceleración espectral para cualquier periodo estructural
3. El promedio de las diferencias de aceleración espectral para todos los periodos estructurales.

Los espectros de diseño se calculan por medio de la definición de 5 parámetros: Aa , Av , I , Fa y Fv . Con el fin de armonizar los espectros de diseño resultantes a la NSR-10, se fijan los parámetros de amenaza en roca a los especificados para la ciudad de Manizales: $Aa = 0.25g$ y $Av = 0.25g$. El factor de importancia se asume como $I = 1$, dado que es un factor que puede asignarse posteriormente en función del tipo de edificación a diseñar. Por último, se establecen como parámetros libres los asociados al efecto del suelo blando: Fa y Fv .

Dado que se trata de un problema no lineal, no resulta factible emplear métodos estadísticos clásicos para ajustar el valor óptimo de los parámetros del espectro de diseño. Por lo tanto, el procedimiento de ajuste corresponde a una iteración sobre valores de los parámetros asociados al efecto del suelo, siguiendo un algoritmo genético, con el fin de garantizar la convergencia a la solución de la iteración realizada. El procedimiento de ajuste es el siguiente:

1. Se establecen rangos de variación de los parámetros libres (asociados al suelo) con el fin de restringir la iteración sólo a valores lógicos.
2. Se construye una población inicial de tamaño N , compuesta de arreglos de parámetros libres, seleccionados de manera aleatoria dentro de los rangos anteriormente definidos. Esto corresponde a crear N espectros de diseño por cada espectro de amenaza uniforme.
3. Se calcula el error general como la suma de los errores asociados a las relaciones descritas anteriormente: la diferencia en el área bajo la curva de los espectros de amenaza y diseño, la diferencia máxima de aceleración espectral para cualquier periodo estructural y el promedio de las diferencias de aceleración espectral para todos los periodos estructurales.
4. Se asigna un peso a cada espectro de diseño de la población en función de su capacidad de minimizar el error general. Los espectros de diseño cuyo error general sea cercano a cero tendrán un mayor peso dentro de la población total.
5. Se define un número total de futuras generaciones que permita restringir las iteraciones que se van a realizar. Para cada generación se realiza un relevo generacional en el cual se crearán nuevos espectros de diseño, por medio de la selección aleatoria de parejas de espectros dentro de la población total, y la combinación, también de manera aleatoria, de sus parámetros libres. Esta selección se hace de manera ponderada con los pesos previamente asignados, con el fin que los espectros de diseño con errores generales bajos tengan una mayor probabilidad de ser seleccionados que aquellos con errores altos. El relevo se repite un número de veces prestablecido en cada generación. En cada relevo generacional “nace” un nuevo espectro y “muere” el espectro con el error más alto.
6. Se repite el relevo generacional en cada generación y se continúa la iteración hasta completar el número total de generaciones, o hasta alcanzar un valor de tolerancia en el error general que se considere suficientemente bueno.

5.2 Coeficientes de diseño

La aplicación del procedimiento de ajuste resulta en la definición de un espectro elástico de diseño sísmo resistente, para cada punto de la malla de cálculo, el cual cumple con los parámetros establecidos por la norma NSR-10 para edificaciones. La distribu-



ción espacial de los parámetros F_a y F_v se presenta en la Figura 5. Es posible entonces, para cualquier localización dentro de la ciudad, definir un espectro de diseño en función de los parámetros F_a y F_v .

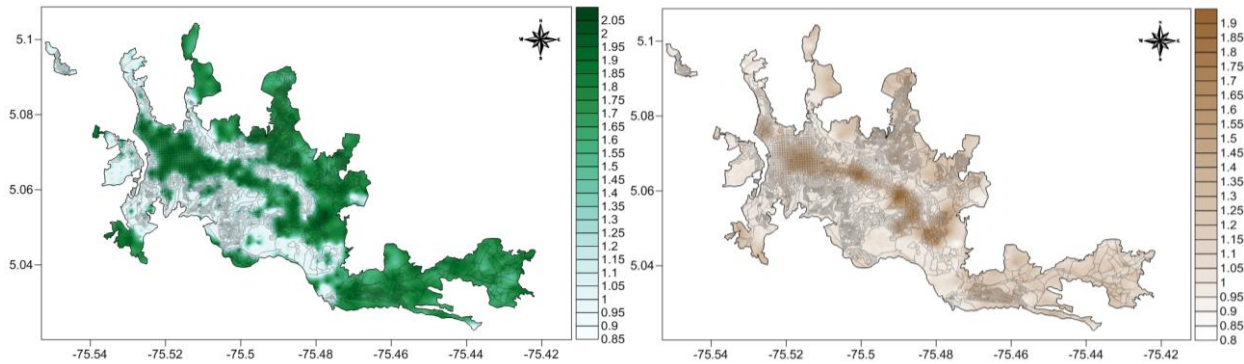


Figura 2: Distribución espacial de los coeficientes de diseño F_a (izquierda) y F_v (derecha).

CONCLUSIONES

Los resultados muestran un salto cualitativo en la definición de los movimientos sísmicos en superficie del terreno, con relación a las metodologías tradicionales para la microzonificación sísmica de ciudades. Las principales ventajas de la metodología aplicada son:

1. Está basada en la construcción de un modelo geotécnico tridimensional, el cual puede ser fácilmente mejorado y ajustado en la medida que se recopile más y mejor información geotécnica. Este modelo provee toda la información necesaria para el cálculo de la respuesta dinámica del suelo en cualquier ubicación dentro de la ciudad.
2. El desarrollo del modelo geotécnico involucra el conocimiento de la geología superficial de la ciudad, y en particular de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos. Adicionalmente permite establecer una relación directa entre dicha geología y las propiedades de los suelos blandos de la ciudad. Este modelo geotécnico es por lo tanto, un insumo importante para futuros trabajos de investigación en la ciudad.
3. Los resultados no se presentan por zonas sino de manera rasterizada, lo cual implica el cálculo de la respuesta sísmica de los depósitos de suelo en un gran número de ubicaciones, de las cuales la gran mayoría no han sido exploradas aún. En particular, en este estudio se calcularon 1275 sitios dentro de Manizales y en sus alrededores. Esto implica un salto cualitativo desde la concepción tradicional de la microzonificación sísmica por zonas, a una concepción por puntos dentro de una malla de cálculo, y en general en cualquier ubicación seleccionada haciendo uso del modelo geotécnico desarrollado.
4. La incertidumbre asociada al desconocimiento de las características geotécnicas de los suelos está debidamente calculada en el análisis, de manera que puede ser incorporada en posteriores evaluaciones de la amenaza sísmica siguiendo la metodología probabilista. Esto implica un salto cualitativo en lo que se refiere a considerar, en la evaluación de los movimientos sísmicos de diseño, todas las fuentes de incertidumbre de manera integral. En enfoques anteriores al acá propuesto, la respuesta dinámica de los suelos era considerada como determinista y no aportaba ningún nivel de incertidumbre al resultado final de amenaza.
5. Los resultados se presentan de manera armonizada a lo requerido por la NSR-10, de manera que se obtienen los valores de los parámetros asociados al suelo, F_a y F_v , para cada nodo de la malla de cálculo. Esto deriva en una representación espacial de los parámetros que controlan la forma final de los espectros de diseño de edificaciones nuevas. La utilización de estos espectros es entonces totalmente compatible con la normativa nacional, y por lo tanto permite una aplicación directa de la misma una vez definido el espectro de diseño a utilizar.

El trabajo presentado constituye un punto de partida en la investigación de nuevas maneras de abordar el problema de los efectos de sitio en Manizales, al abarcar todas las características relevantes en la problemática, desde la evaluación de la amenaza sísmica en roca, pasando por la geometría de las formaciones geológicas, las características de los suelos y la respuesta de los depósitos blandos, hasta la evaluación de la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno y su armonización con la normativa aplicable.

REFERENCIAS

- Aki, K. and Richards, P.G. 2002. *Quantitative Seismology*, Second Ed. University Science Books, Sausalito, CA.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). 2010. *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia*. Comité AIS-300
- Bazzurro, P. and Cornell, A. 2004. Ground-Motion Amplification in Nonlinear Soil Sites with Uncertain Properties. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 94, N° 6, pp. 2090-2109.



- Bernal, G., Cardona, O.D., Barbat, A.H., and Salgado, M. 2013. Enfoque integral para la evaluación de efectos de sitio en ciudades y su aplicación en Bogotá. *Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Bucaramanga.
- Duque, G. 2006. *Estudio de cinco conducciones subterráneas para el trasvase de aguas residuales, entre varias subcuencas del Olivares y el Río Chinchiná, en el sector urbano de Manizales-Villamaría y otras microcuencas vecinas*. INGENIERÍA DE SANEAMIENTO AMBIENTAL – INGESAM, 2006.
- Gilbert, F. and Backus, G. 1966. Propagator Matrices in Elastic Wave and Vibration Problems. *Geophysics*, Vol 31, pp. 326-332
- Haskell, N. A. 1953. The Dispersion of Surface Waves in Multilayered Media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 43, pp. 17-34
- Idriss, M.I. and Seed, H.B. 1968. Seismic Response of Horizontal Soil Layers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol 94, N° SM4 (Julio).
- Naranjo, J.L. y Ríos, P.A. 1989. *Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos*. Universidad de Caldas, Manizales, 1989.
- NSR-10. 2010. *Normas Colombianas de diseño y Construcción Sismo-resistente*. Ministerio de Vivienda. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Agular, A., Arboleda, J., Meletti, C., and D'Amico, V. 2014. "CRISIS 2014". Program for computing seismic hazard. UNAM, 2014.
- Salgado, M., Bernal, G., Yamín, L., y Cardona, O. 2010. Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Rev. de Ing.*, Vol 32, pp. 28-37.
- Seed, H.B. and Idriss, M.I. 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. *Report N° UCB/EERC-70/10*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Diciembre de 1970.
- Stewart, J.P. and Goulet, C.A. 2006. Comment on "Nonlinear Soil-Site Effects in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis" by Paolo Bazzurro and C. Allin Cornell. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 96, N° 2, pp. 745-747.
- Thompson, W.T. 1950. Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid. *Journal of Applied Physics*, Vol 21, pp. 89-93
- Universidad de los Andes. (2002). *Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales*. Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles – CIMOC. Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos – CEDERI. 2002.