

# ARMONIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MANIZALES CON LAS NORMAS NSR-10



GABRIEL ANDRÉS BERNAL GRANADOS, MSc. Ph.D. (E)

*Instituto de Estudios Ambientales (IDEA) –  
Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales*



# 1

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES



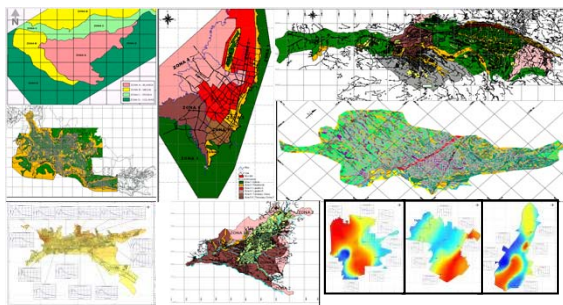
## Estudios de amenaza y riesgo sísmico en el país

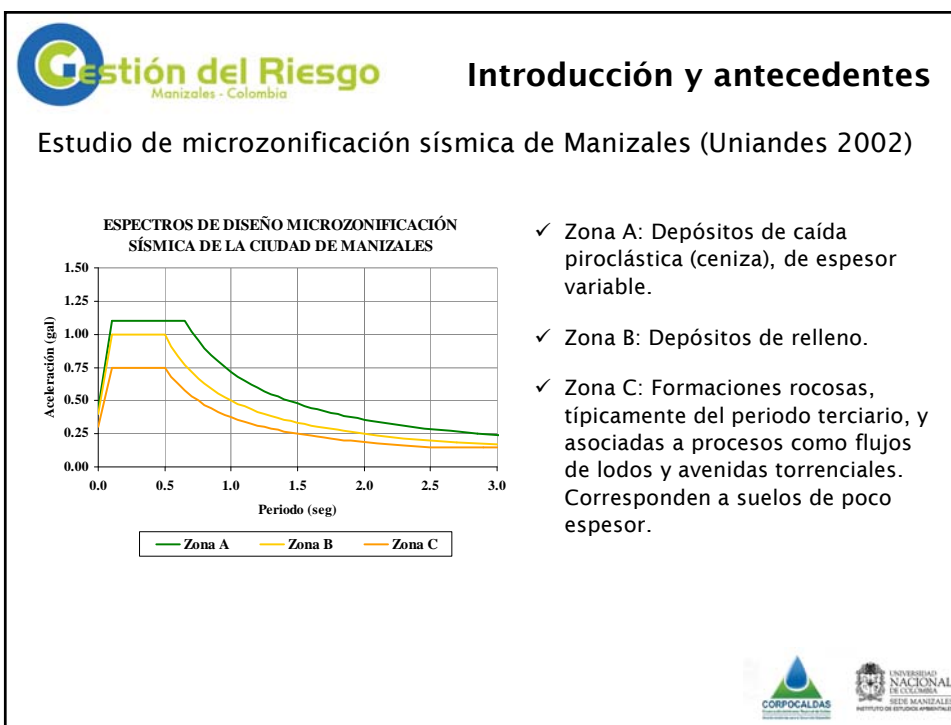
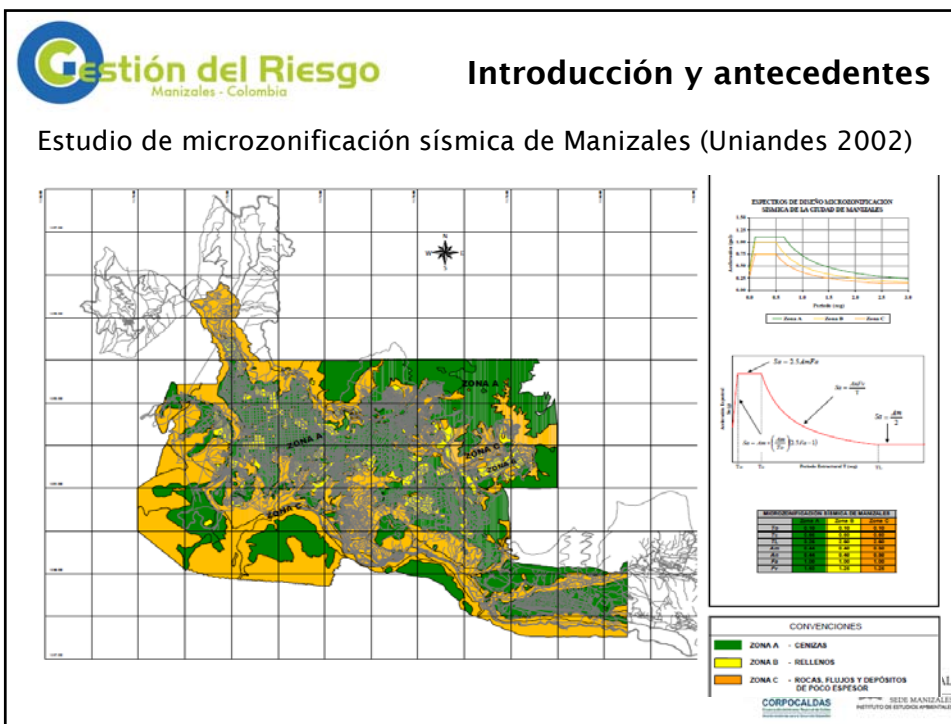
- ✓ Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes - 1984, AIS
- ✓ Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia - 1984, AIS
- ✓ Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia - 1996 AIS, INGEOMINAS, UNIANDES
- ✓ Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-98 (Ley 400 de 1997)
- ✓ Actualización del Estudio Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia - 2009 AIS.
- ✓ Actualización de las Normas Colombianas de Construcción Sismorresistente, NSR 10.
- ✓ Actualización del Código Colombiano de Puentes - 2013 AIS.



## Estudios de microzonificación sísmica de ciudades

- ✓ 1992 - Popayán (CEO, INGEOMINAS, UNIANDES)
- ✓ 1996 - Bogotá (INGEOMINAS, UNIANDES)
- ✓ 1999 - Medellín (EAFIT, INGEOMINAS, UN)
- ✓ 1999 - Pereira/Dosquebradas (UNIANDES)
- ✓ 1999 - Armenia (OFDA/AID, AIS, UNIANDES)
- ✓ 2002 - Manizales (UNIANDES, UN)
- ✓ 2005 - Palmira/ Tuluá/ Buga (UNIANDES, CVC)
- ✓ 2006 - Cali (INGEOMINAS)
- ✓ 2006 - Ibagué (UNIANDES)
- ✓ 2007 - Actualización Bogotá (DPAE, UNIANDES, SCG, AIS)
- ✓ 2010 - Actualización Popayán (UNIANDES)





**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

## Introducción y antecedentes

### Sistema de Información Sísmica de Manizales - SISMan


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SISMan  
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES

**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

## Introducción y antecedentes

### Sistema de Información Sísmica de Manizales - SISMan

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SISMan  
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES



## Introducción y antecedentes

Sistema de Información Sísmica de Manizales - SISMan

PÁGINA 112

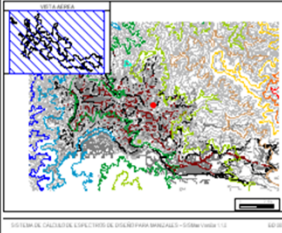
OBJETIVO DEL ASPECTO TAPA DE RIESGO DE RASGO INICIAL PARA LA SEAR (AL 2012)

**1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO**

Nombre del Proyecto	
Objetivo	
Justificación	
Beneficiarios	
Impacto esperado	

**2. BARRA DE UBICACIÓN**

Manizales

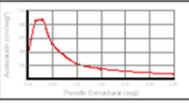


SISTEMA DE CÁLCULO DE EFECTOS DE SISMO PARA MANIZALES - Versión 1.00 - 001 000000

PÁGINA 212

OBJETIVO DEL ASPECTO TAPA DE RIESGO DE RASGO INICIAL PARA LA SEAR (AL 2012)

**3. ESPECTRO DE RIESGO**



PERÍODO	ACELERACIÓN
0.1	0.050
0.2	0.040
0.3	0.035
0.5	0.030
1.0	0.025
2.0	0.020
5.0	0.015
10.0	0.012
20.0	0.010
50.0	0.008
100.0	0.007

**4. FIRMA DEL PROFESIONAL RESPONSABLE**

Nombre: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Profesión: \_\_\_\_\_

Matrícula Profesional: \_\_\_\_\_


ESPACIO RESERVADO PARA EL VISTO BUENO DE LA COP. AQUÍ VA LA FIRMA

Nombre: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Profesión: \_\_\_\_\_

Matrícula Profesional: \_\_\_\_\_

SISTEMA DE CÁLCULO DE EFECTOS DE SISMO PARA MANIZALES - Versión 1.00 - 001 000000





## Introducción y antecedentes

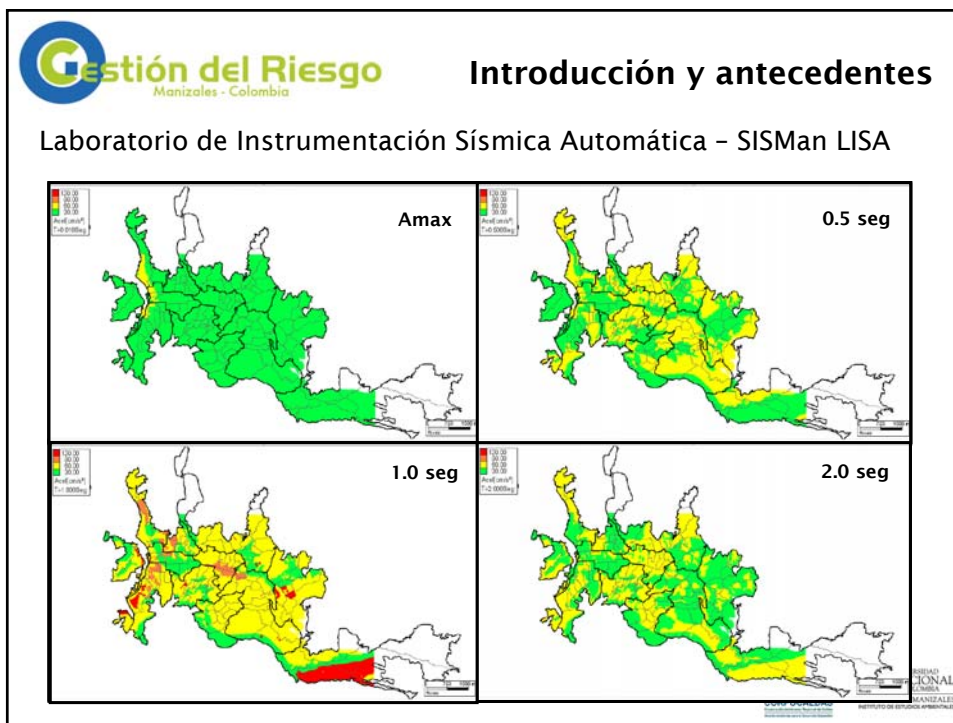
Red de acelerógrafos de Manizales

Estación	Equipo
INFI Manizales	SMA
Monum. Colonizadores	SMA
Universidad Nacional	ETNA
Hospital de Caldas	ETNA
Estación de Palermo	ETNA
ENTElsa	ETNA









**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

### Introducción y antecedentes

Laboratorio de Instrumentación Sísmica Automática - SISMan LISA

The map displays the urban layout of Comuna - 10, with different colored areas representing varying levels of seismic risk. A zoomed-in view on the left shows the comuna's location within the city of Manizales. The logos for CORPOCALDAS and the Universidad Nacional de Colombia are visible at the bottom right.

**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

### Introducción y antecedentes

Laboratorio de Instrumentación Sísmica Automática - SISMan LISA

The map displays the urban layout of Comuna - 4, with different colored areas representing varying levels of seismic risk. A zoomed-in view on the left shows the comuna's location within the city of Manizales. The logos for CORPOCALDAS and the Universidad Nacional de Colombia are visible at the bottom right.



## Justificación

No obstante la existencia de un estudio de microzonificación sísmica en Manizales, se realiza esta actualización por las siguientes razones:

- ✓ La necesidad de contar con un estudio de microzonificación sísmica armonizado a la normativa nacional, de manera que su utilización sea directa dentro de lo estipulado en la NSR 10.
- ✓ La existencia de un mayor número de registros acelerográficos a nivel nacional, a partir de los cuales es posible definir un modelo de atenuación de movimiento fuerte para ser aplicado en la evaluación de la amenaza.
- ✓ La oportunidad de aplicar una metodología novedosa que 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.
- ✓ Mayor experiencia y sensibilidad sobre la utilización de los espectros de diseño.



## Objetivos

1. Construir un modelo geotécnico para la ciudad de Manizales, con fines de respuesta dinámica.
2. Evaluar la respuesta dinámica del suelo en múltiples ubicaciones dentro de la ciudad.
3. Calcular las funciones de transferencia del espectro de Fourier en múltiples ubicaciones dentro de la ciudad.
4. Definir una familia de acelerogramas compatibles con la amenaza en roca para fines de futuros estudios de respuesta sísmica local.
5. Calcular la amenaza sísmica a nivel de superficie en toda la ciudad.
6. Armonizar la amenaza a las formas espectrales dadas en la NSR 10.





**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

# 2 FUNCIONES DE ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE






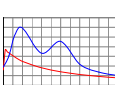
**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia


## Evaluación de la amenaza sísmica

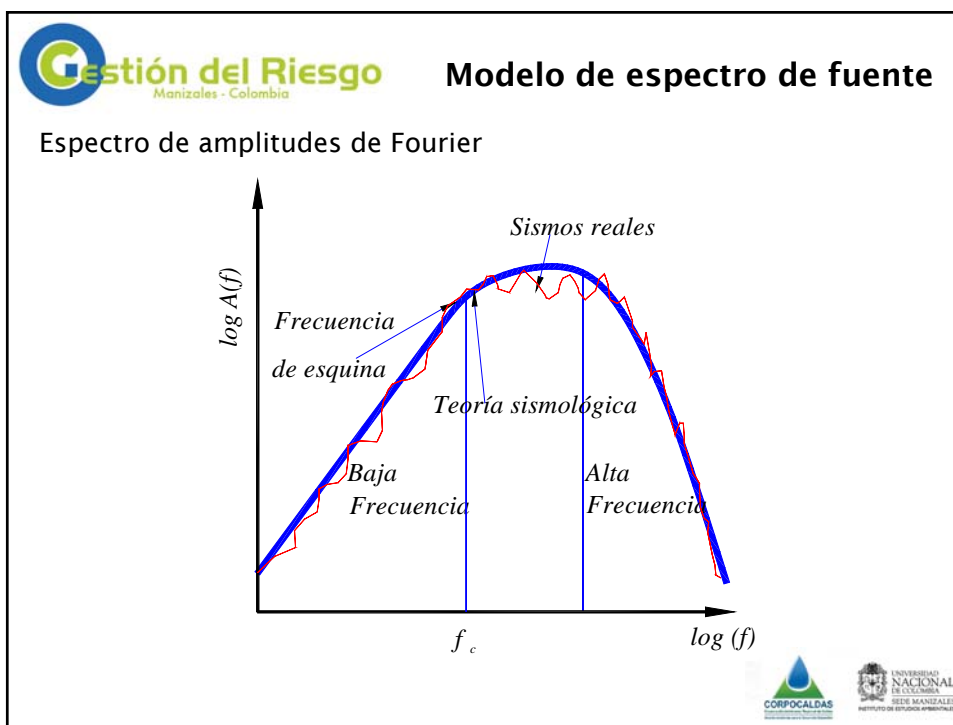
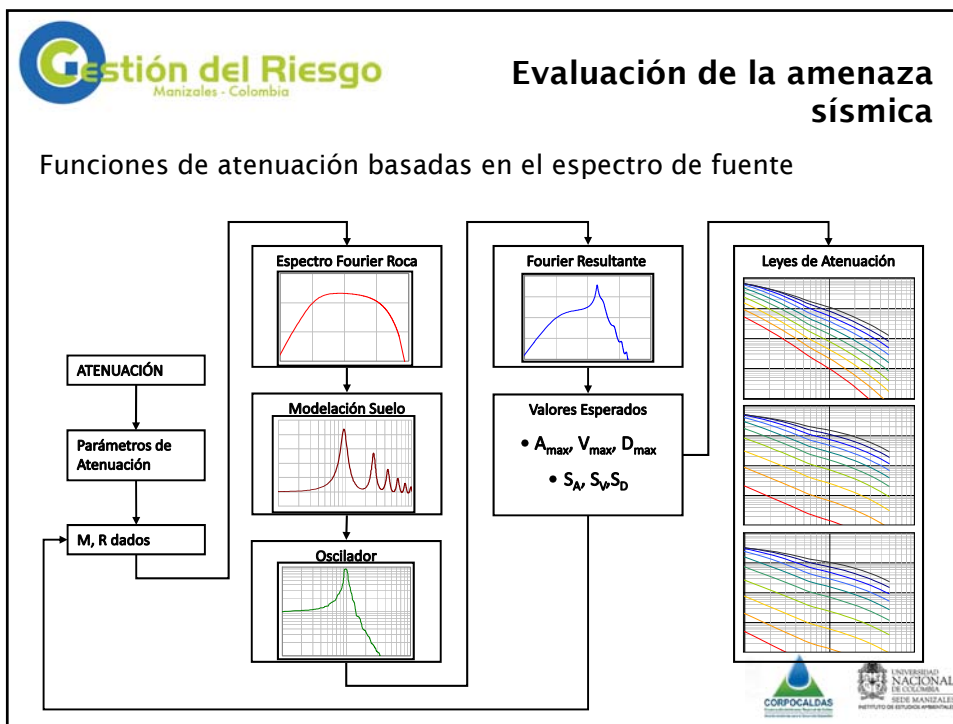
```

            graph TD
            A[MODELO AMENAZA SÍSMICA] --> B[Definición de Fuentes Sismogénicas]
            B --> C[Discretización de Fuentes Sismogénicas]
            C --> D[ATENUACIÓN]
            D --> E[Integración de la Amenaza Sísmica]
            E --> F[Espectros de Peligro Uniforme]
            
```

$$v(d|Ro, p) = \sum_{i=1}^{n=N} \int_{M_i}^{M_p} -\frac{\partial^2}{\partial M} \Pr(A > d | M, Ro) dM$$






**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

## Modelo de espectro de fuente

**Fuente puntual**

Cambio de impedancias en la superficie libre      Espectro de Brune      Atenuación anelástica      Filtro alta frecuencia


$$A(f) = \underbrace{\frac{2}{\sqrt{2}}}_{\text{Descomposición en componentes ortogonales iguales}} \underbrace{\frac{R_{\theta\phi}}{4\pi\rho\beta^3 R}}_{\text{Espectro de Brune}} \underbrace{\frac{M_0 \cdot f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}_{\text{Atenuación anelástica}} \cdot \exp\left(\frac{-\pi f R}{\beta Q_0 f^\epsilon}\right) \cdot \exp(-\pi f k)$$

**Fuente finita**

$$A(f)^2 = \frac{R_{\theta\phi}}{4(\pi\rho\beta^3)^2} (M_0 f^2)^2 \frac{\exp(-2\pi f k)}{r_0^2} \left[ E1(\alpha R) - E1\left(\alpha \sqrt{r_0^2 + R^2}\right) \right]$$

$\alpha = 2\pi/\beta Q_0$

Radio de la zona de ruptura      Integral exponencial



**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

## Valor esperado de PGA

**Teoría de vibraciones aleatorias**


Constante de Euler (0.577...)


$$E(PGA) = \sqrt{2 \ln \left( \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \right)} T_d \sqrt{m_0} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln \left( \frac{T_d}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \right)}} \sqrt{m_0}$$

Duración de la fase intensa

$$m_n = \frac{2^{n+1} \pi^n}{T_d} \int_{-\infty}^{\infty} f^n A(f) df$$

$$T_d = \frac{1}{f_c} + 0.05R$$





## Calibración del modelo

Algoritmo de calibración

$$E(PGA) = f(M_0, R, \Delta\sigma, Q_0, \varepsilon, k, \rho, \beta, R_{\theta\phi}, R_x)$$



Está relacionado con la magnitud


$$\text{Log}_{10}(M_0) = 1.5M_w + 16.1$$

*Debe contarse con una base de datos de registros acelerográficos a nivel de roca firme. En dicha base de datos E(PGA), Mw y R están dados*

Parámetros libres

$$E(PGA) = f(\Delta\sigma, Q_0, \varepsilon, k, \rho, \beta, R_{\theta\phi}, R_x)$$





## Calibración del modelo


Algoritmo de calibración

- ✓ Es posible fijar  $\rho$ ,  $\beta$  y  $R_x$  a valores de referencia (2.5 Ton/m<sup>3</sup>, 3.5 Km/s y 100 Km, respectivamente).

Parámetros libres susceptibles de calibración

$$E(PGA) = f(\Delta\sigma, Q_0, \varepsilon, k, R_{\theta\phi})$$





## Calibración del modelo

**Algoritmo de calibración**

✓ Los parámetros libres tienen rangos de variación que corresponden a valores físicamente posibles.

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo
$\Delta\sigma$	Bar	50	250
$\varepsilon$	-	0.8	1
$Q_o$	-	50	800
$k$	-	0.005	0.04
$R_{\theta\theta}$	-	0.55	0.65







## Calibración del modelo

**Algoritmo de calibración**

- ✓ Los individuos corresponden a diferentes modelos de atenuación de movimiento fuerte.
- ✓ El genotipo de estos individuos es el conjunto de parámetros sismológicos seleccionados para la calibración.
- ✓ La evolución inicia con una población de individuos generados aleatoriamente, y sigue un proceso iterativo en el cual los individuos son cruzados y mutados para dar vida a la población de la siguiente generación.
- ✓ En cada generación, el ajuste de cada individuo de la población (es decir, el sesgo que presenta a los valores observados de PGA) es evaluado.
- ✓ La nueva generación de individuos es usada en la siguiente iteración del algoritmo.
- ✓ El algoritmo termina cuando se alcanza un máximo número de generaciones, o cuando se obtiene un ajuste suficientemente bueno.





## Calibración del modelo

**Inicialización** Un conjunto de cientos o miles de individuos es creado como población inicial.

Valores seleccionados aleatoriamente

$\Delta\sigma$	$Q_o$	$\varepsilon$	$k_I$	$Q_I$	$R_{\theta\theta}$
----------------	-------	---------------	-------	-------	--------------------

Elementos de la población

Población (Tamaño N)

Elemento 1



Elemento 2


...

Elemento i

...

Elemento N



## Calibración del modelo

**Selección** Dentro de cada generación, el ajuste de los individuos es determinado por su capacidad de reducir el sesgo respecto a los valores observados de PGA



Intensidad real o nominal  
(Determinada a partir de los registros)


$$a_{rec} = \sqrt{\frac{a_x^2 + a_y^2}{2}}$$

$$Re = \ln \left( \frac{a_{rec}}{E\{PGA\}} \right)$$

Residual

Intensidad calculada con el modelo





## Calibración del modelo

*Selección* Dentro de cada generación, el ajuste de los individuos es determinado por su capacidad de reducir el sesgo respecto a los valores observados de PGA

$$sesgo = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Re_i$$

El individuo con el menor sesgo será declarado campeón y será cruzado con todos los otros individuos de su generación.






## Calibración del modelo


*Cruce y mutación* El cruce se lleva a cabo por medio de una mezcla aleatoria de los parámetros sismológicos de los individuos "padres" (uno de los cuales es siempre el campeón), de manera que el individuo "hijo" resultante tiene en su genotipo información de ambos padres.


Elemento a



Elemento b

Nuevo elemento







**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

## Calibración del modelo

*Finalización*

- ✓ Un mínimo sesgo aceptable y un máximo número de generaciones deben ser definidos con el fin de limitar el número total de iteraciones.
- ✓ Cuando alguno de los dos se alcanza, el algoritmo finaliza.
- ✓ El individuo campeón de la última generación contiene la combinación óptima de parámetros sismológicos que definen el modelo de espectro de fuente y proveerá el menor sesgo.

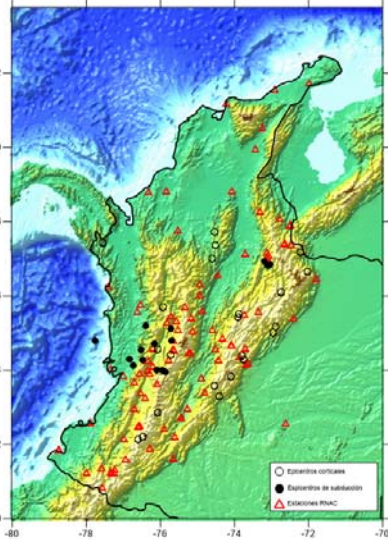




**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia


## Funciones de atenuación

**Red Nacional de Acelerógrafos**

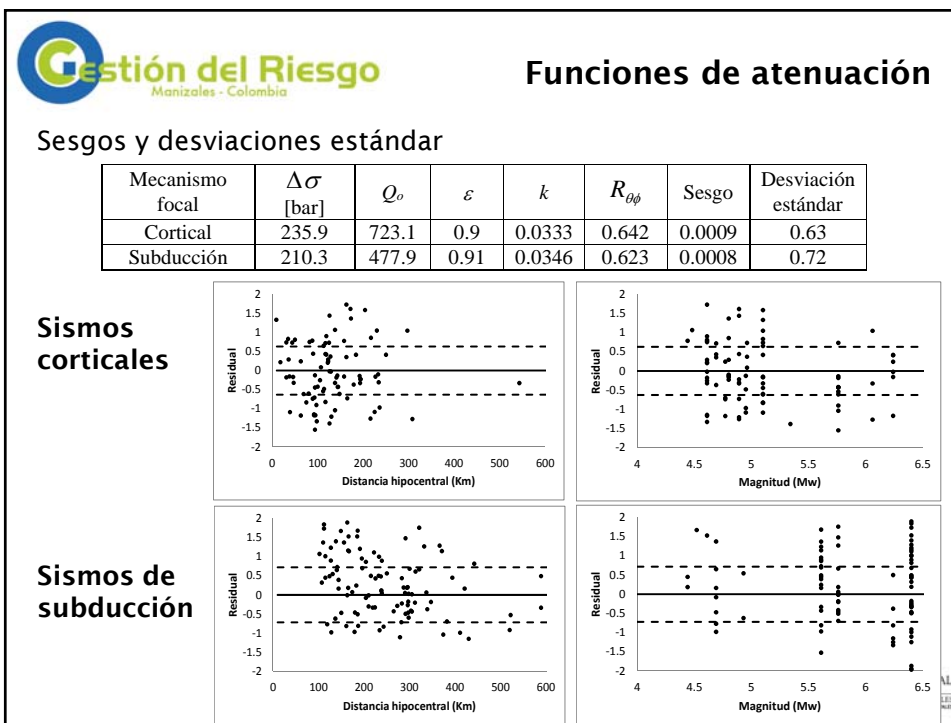
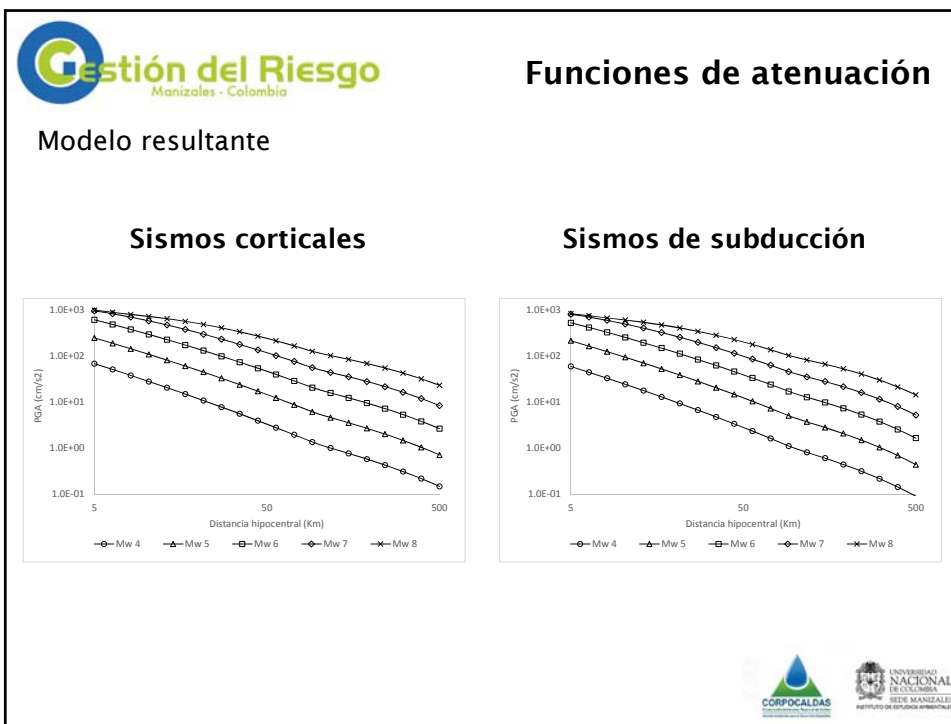


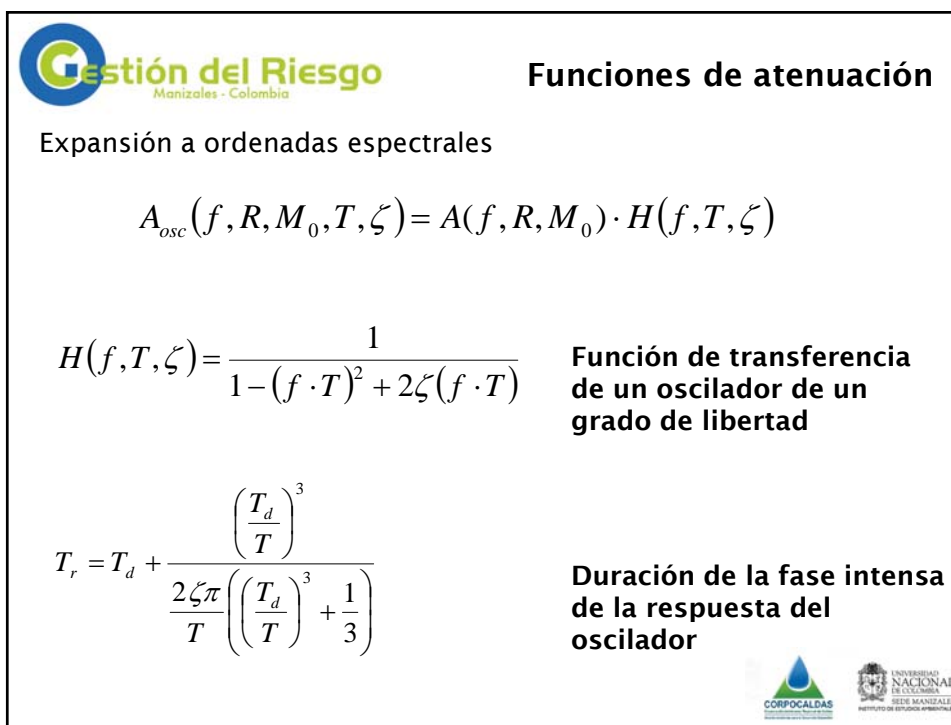
The map shows the geographical distribution of seismic stations across Colombia. It includes a legend with three symbols: a white circle for cortical epicenters, a black circle for subduction epicenters, and a red triangle for stations of the National Accelerometer Network (RNAC).

- ✓ Se calibró un modelo de atenuación por cada mecanismo focal: cortical y subducción.
- ✓ Se emplearon 206 acelerogramas.
- ✓ 87 acelerogramas asociados a 22 terremotos corticales
- ✓ 119 acelerogramas asociados a 15 terremotos de subducción





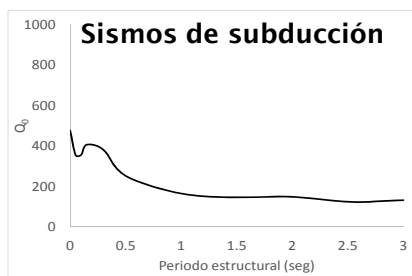
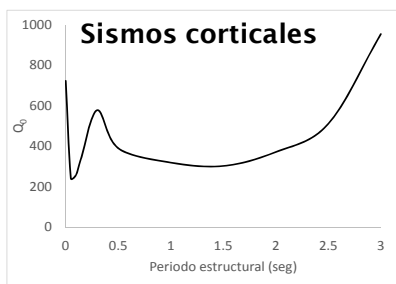




## Funciones de atenuación

### Expansión a ordenadas espectrales

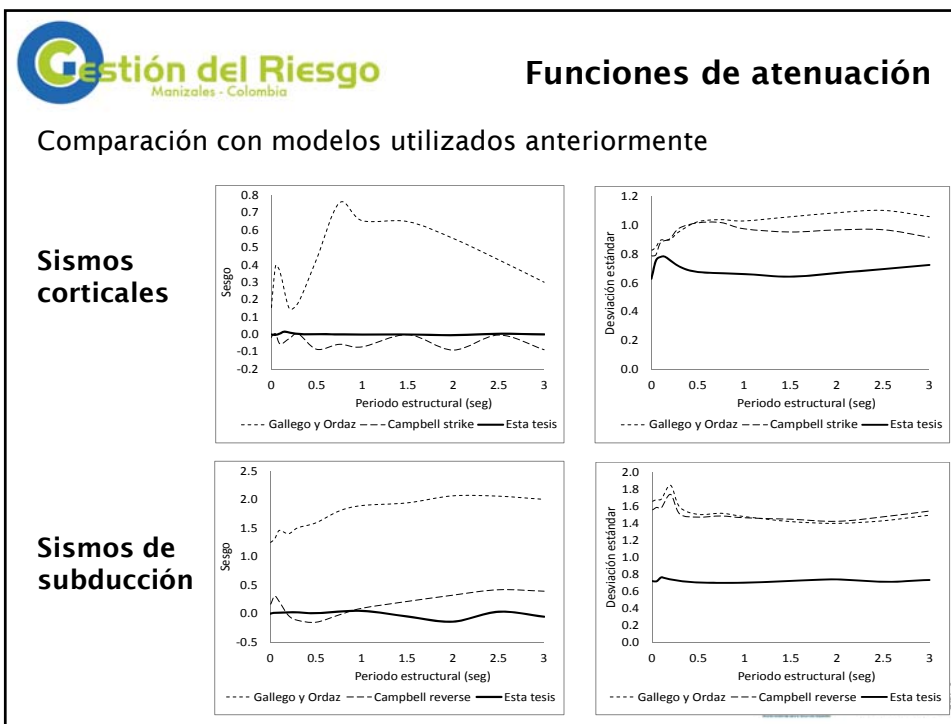
- ✓ Se fijan los valores de todos los parámetros libres a sus valores calibrados para PGA, con excepción de  $Q_0$ .
- ✓ Esto tiene que ver con la clara dependencia de  $Q$  con la frecuencia, así mismo como la independencia de todos los demás parámetros.
- ✓ Por lo tanto, se ajusta únicamente  $Q_0$ .



## Funciones de atenuación

### Expansión a ordenadas espectrales

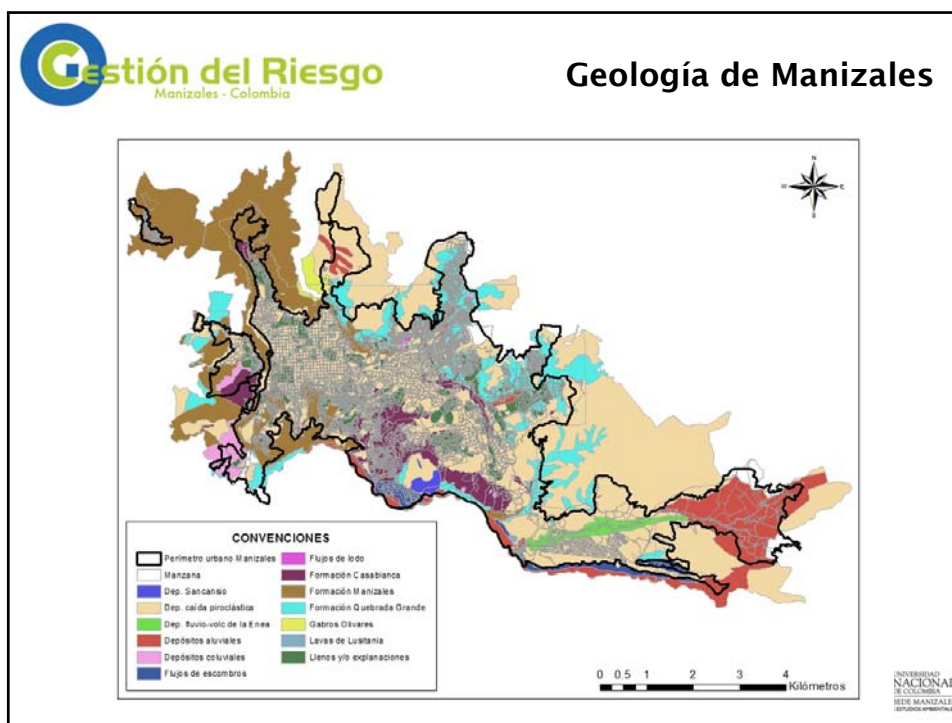
T (seg)	Cortical			Subducción		
	$Q_0$	Sesgo	Desviación estándar	$Q_0$	Sesgo	Desviación estándar
0.05	241.2	-0.0027	0.76	355.9	0.0172	0.72
0.10	257.8	0.0053	0.78	356.9	0.0143	0.76
0.15	344.3	0.0154	0.78	406.9	0.0208	0.75
0.30	578.3	0.0015	0.72	382.2	0.0232	0.72
0.50	390.4	0.0009	0.68	253.2	0.0075	0.70
1.00	319.2	-0.0010	0.66	165.5	0.0483	0.70
1.50	302.3	-0.0008	0.64	146.8	-0.0492	0.72
2.00	371.2	-0.0046	0.67	149.6	-0.1402	0.74
2.50	510.9	0.0033	0.70	124.8	0.0334	0.71
3.00	954.9	-0.0003	0.72	132.8	-0.0540	0.73



# 3 MODELO GEOTÉCNICO DE MANIZALES

**CORPOCALDAS**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**  
SISTEMA MANIZALEÑO  
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES



**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

## Geología de Manizales

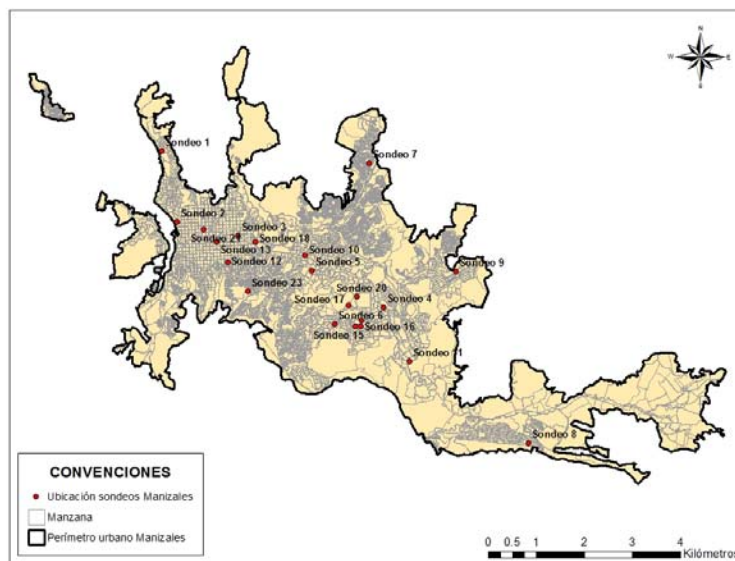
- ✓ La mayoría de la extensión de la ciudad se encuentra sobre depósitos de caída piroclástica (ceniza), de espesor variable. Se destacan también el complejo Quebradagrande, la formación Manizales y la formación Casabianca.
- ✓ El Complejo Quebradagrande incluye rocas volcánicas y sedimentarias. Presenta en general alto buzamiento con excepciones locales.
- ✓ La Formación Manizales está constituida por un conjunto de rocas sedimentarias vulcanogénicas con clastos del complejo volcánico Ruiz-Tolima.
- ✓ 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 consolidados y de ambiente subaéreo. Las capas de los diferentes eventos son visibles y alternan entre ellas lapilli, arena volcánica y ceniza.


CORPOCALDAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
Sede Manizales  
Instituto de Estudios Ambientales

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.

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.

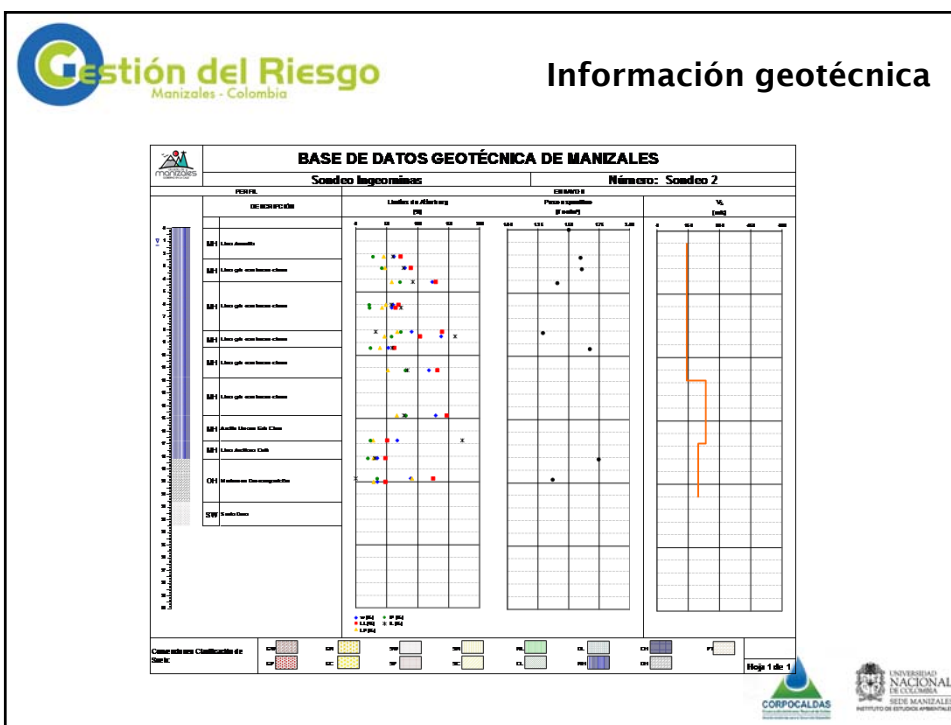


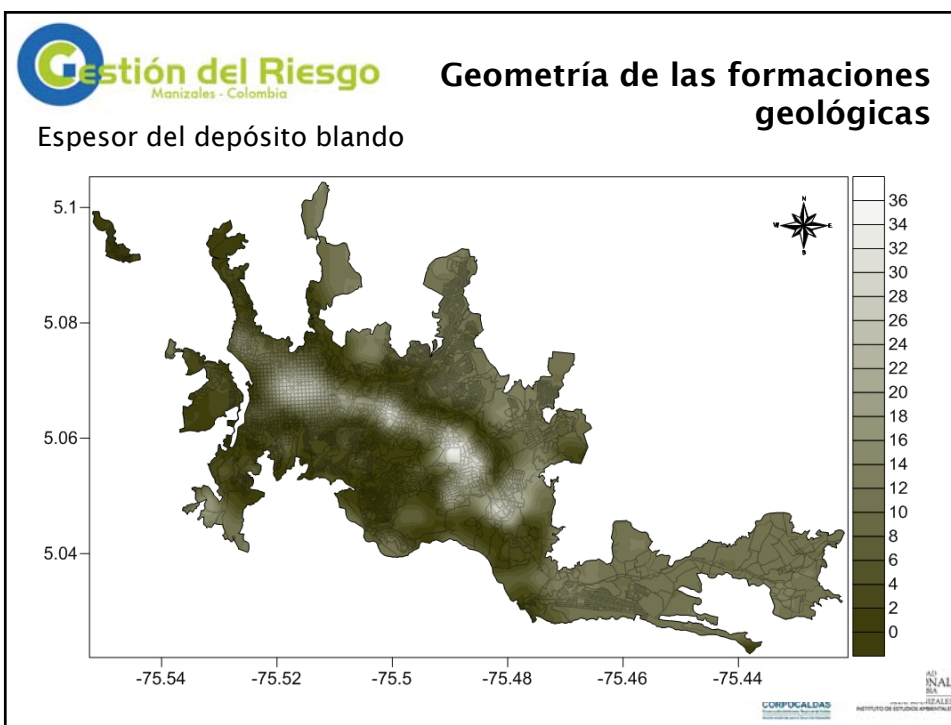
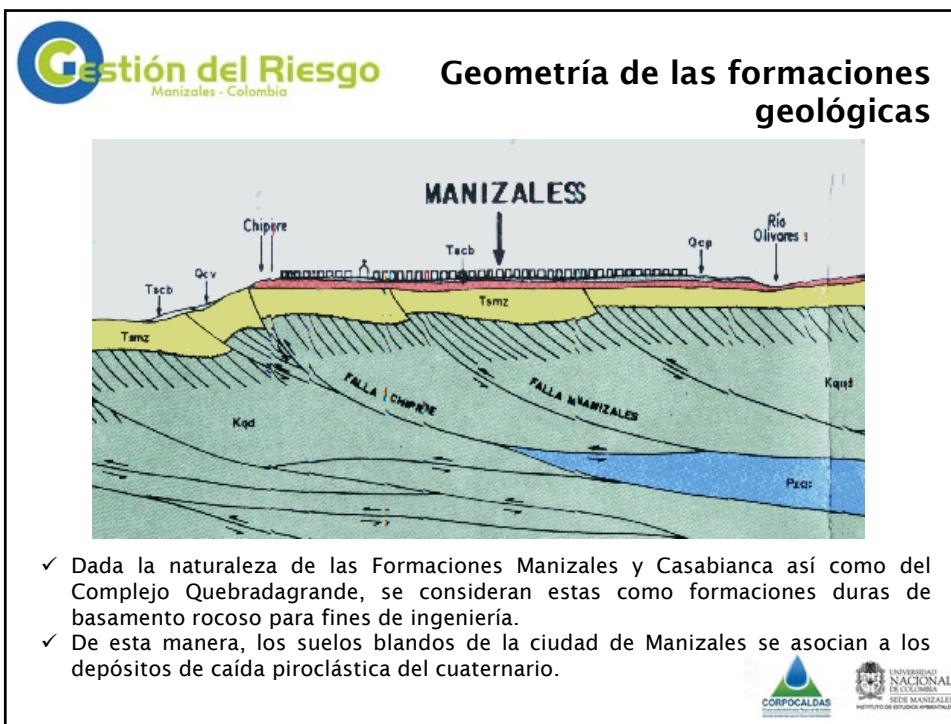


## Información geotécnica

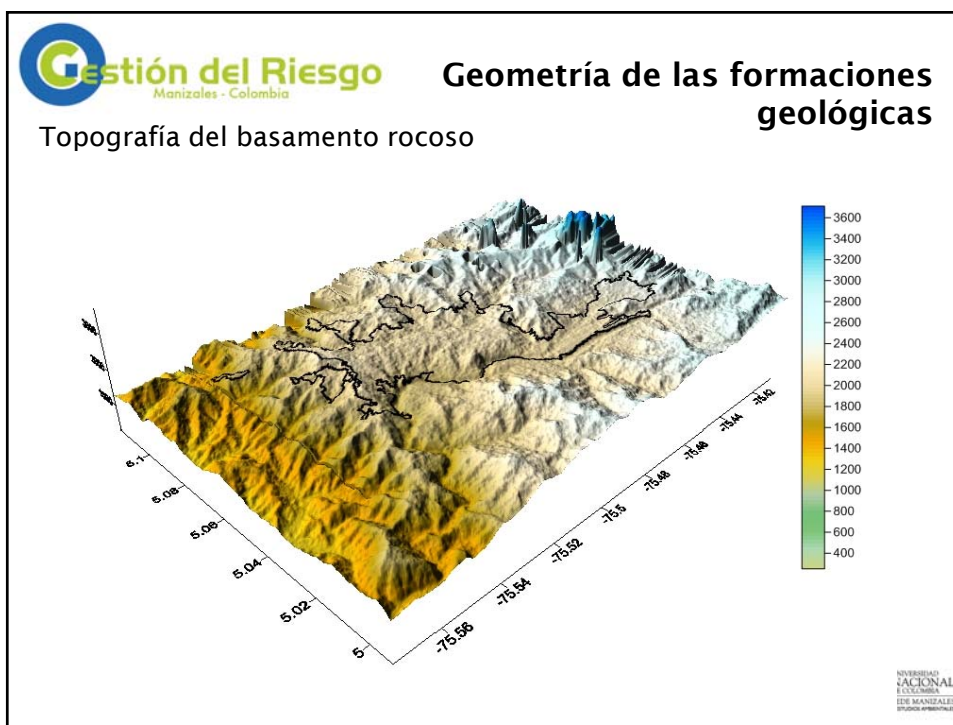
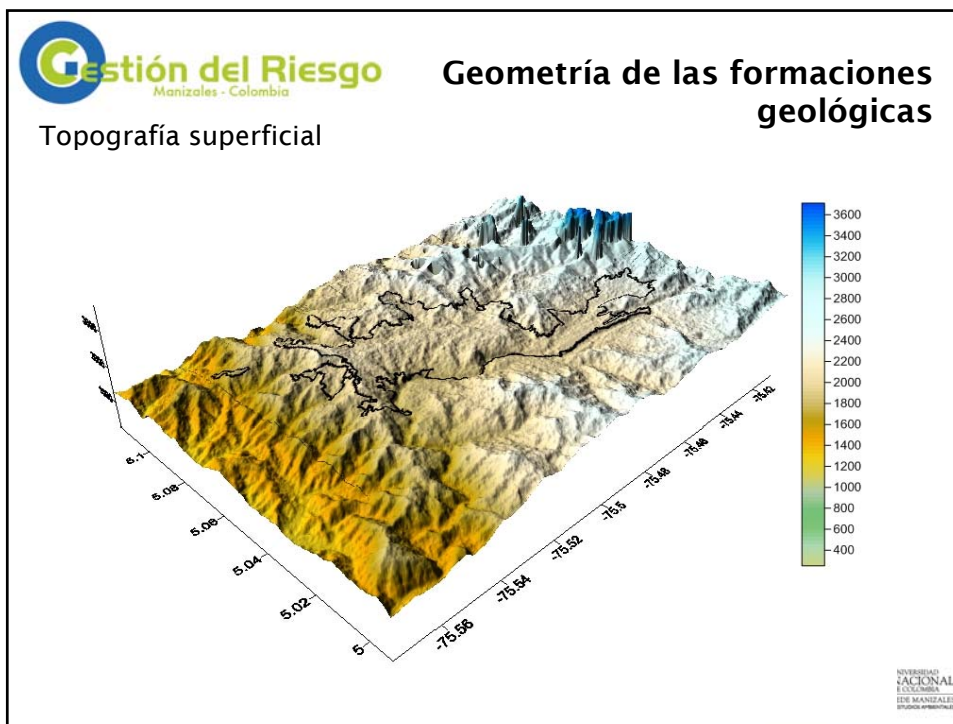
Sondeo	Ubicación	Longitud	Latitud	Profundidad [m]
1	Clínica Seguros Sociales	-75.53	5.08	8.75
2	Ingeominas	-75.52	5.07	23.5
3	Parque Caldas	-75.51	5.07	40
4	Facultad de Arquitectura	-75.49	5.06	42
5	Confamiliares	-75.50	5.06	34
6	Escuela Atanasio Girardot	-75.49	5.05	34
7	Colegio Bosques del Norte	-75.49	5.08	31.5
8	Colegio San Pio 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	Alejandro 1	-75.49	5.05	23.5
15	Alejandro 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












## Modelo geotécnico

- ✓ 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.
- ✓ 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

## Modelo geotécnico

- ✓ 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 construye 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:
  - Las formaciones geológicas superficiales son las que dan origen a los depósitos de suelo blando.
  - Materiales con el mismo origen geológico tienden a tener propiedades similares, que presentan variaciones importantes en la profundidad.
  - 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.




## Modelo geotécnico


**Correlación en profundidad**

- ✓ Se sabe que las propiedades geotécnicas están correlacionadas en profundidad.
- ✓ Su nivel de correlación se modela mediante la matriz de auto correlación  $C$  para cada propiedad geotécnica.

$$C = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \rho_{1,3} & \cdots & \rho_{1,n} \\ \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & \rho_{2,3} & \cdots & \rho_{2,n} \\ \rho_{3,1} & \rho_{3,2} & \rho_{3,3} & \cdots & \rho_{3,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{n,1} & \rho_{n,2} & \rho_{n,3} & \cdots & \rho_{n,n} \end{bmatrix}$$

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






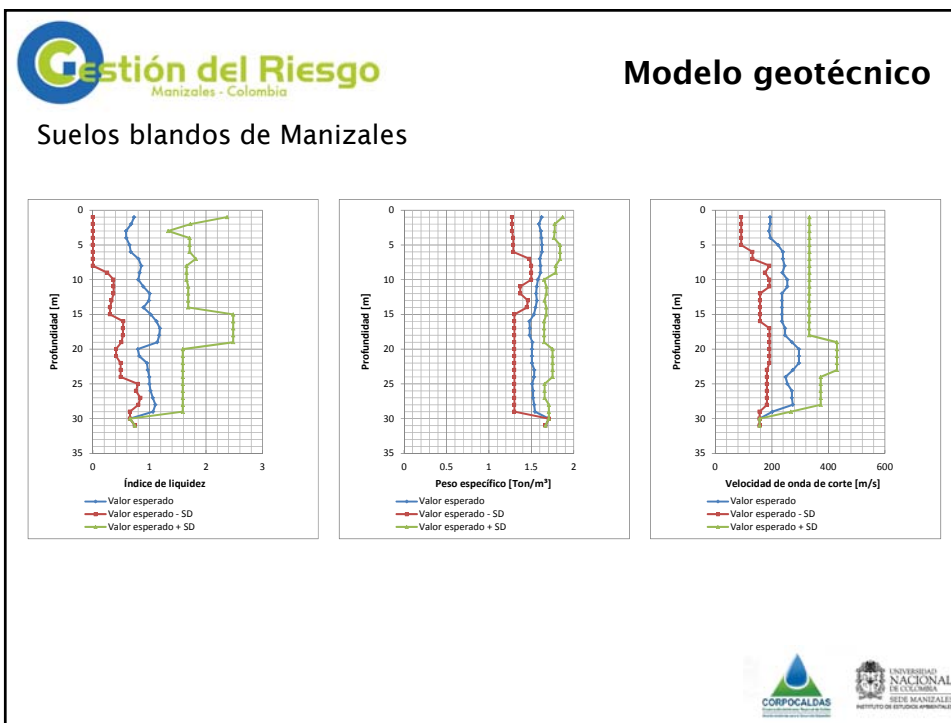
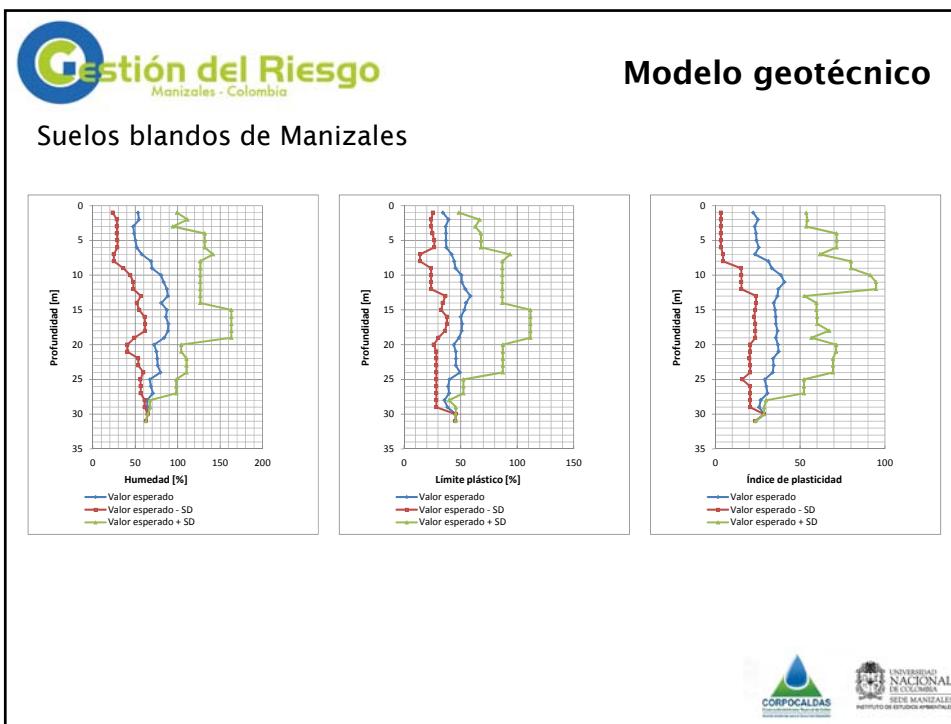
## Modelo geotécnico


**Correlación en profundidad**

De esta manera, una propiedad geotécnica  $X$ , queda definida por:

- ✓ Su valor esperado, como función de la profundidad  $m_X(z)$
- ✓ Su varianza, como función de la profundidad  $s^2_X(z)$
- ✓ Sus límites de truncamiento mínimo y máximo, como función de la profundidad  $L1_X(z)$ ,  $L2_X(z)$
- ✓ Su matriz de auto correlación  $C_X$







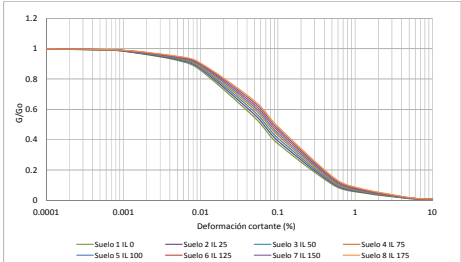
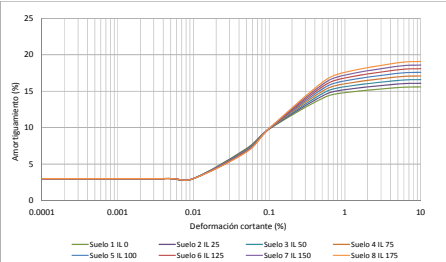
## Modelo geotécnico


**Modelos dinámicos del suelo blando**


**Suelos cohesivos - Modelo Uniandes (2002)**

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

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

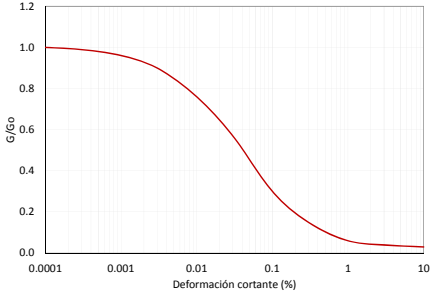
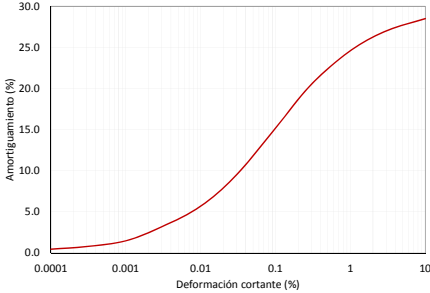






## Modelo geotécnico

**Modelos dinámicos del suelo blando**


**Suelos granulares - Modelo Seed e Idriss (1970)**





# 4 RESPUESTA DINÁMICA DE LOS SUELOS BLANDOS






## Estratigrafías sintéticas

Las estratigrafías sintéticas se construyen mediante la simulación de los valores de las propiedades geotécnicas en profundidad, de la siguiente manera:

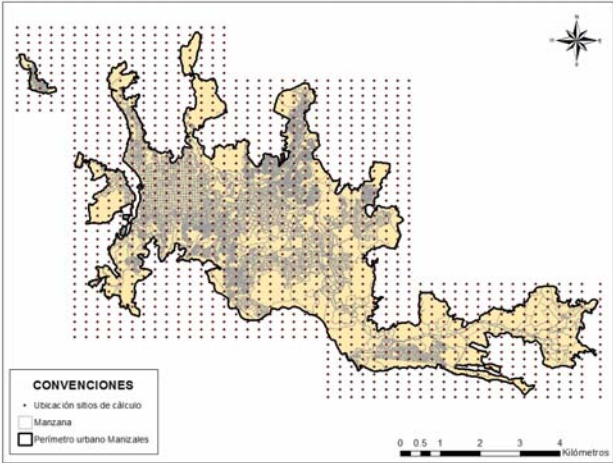
- 1) se determina la profundidad total de la estratigrafía según el modelo geológico
- 2) Esta profundidad se subdivide en capas de igual espesor  $h$
- 3) Para cada capa, se determinan las propiedades geotécnicas mediante la generación de un número aleatorio, siguiendo su distribución de probabilidad
- 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  $U$  que se define como:

$$U^T U = C$$

$$R_c = RU$$





## Malla de cálculo




Se definió una malla 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.

Adicionalmente a las propiedades mencionadas, se asigna un valor base de amortiguamiento y se calcula el esfuerzo de confinamiento efectivo.






## Malla de cálculo

**Estratigrafía sintética generada en el sitio de cálculo 457**

ID	Profundidad [m]	Espesor [m]	$\gamma$ [Ton/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	$G_0$ [Mpa]	$\beta$	w [%]	LL [%]	LP [%]	IP	IL	$\sigma'$ [Ton/m <sup>2</sup> ]
1	0.5	1	1.622	193.73	6205.296	0.03	53.21	56.66	34.31	22.35	0.85	1.622
2	1.5	1	1.606	193.73	6142.81	0.03	53.76	60.53	36.78	23.75	0.72	3.228
3	2.5	1	1.601	192.03	6017.041	0.03	50.92	62.18	37.99	24.19	0.54	4.828
4	3.5	1	1.615	192.73	6114.548	0.03	48.07	60.5	36.88	23.62	0.47	6.443
5	4.5	1	1.621	208.45	7181.185	0.03	49.39	61.17	37.03	24.15	0.51	8.064
6	5.5	1	1.625	230.44	8795.359	0.03	50.89	62.11	37.17	24.94	0.55	9.689
7	6.5	1	1.613	239.09	9397.92	0.03	54.64	65.26	39.65	25.61	0.59	11.302
8	7.5	1	1.604	242.09	9584.948	0.03	63.2	72.76	43.17	29.59	0.68	12.407
9	8.5	1	1.608	241.24	9540.33	0.03	69.18	78.31	44.89	33.42	0.73	13.015
10	9.5	1	1.592	246.11	9831.892	0.03	74.95	84.03	48.05	35.98	0.75	13.607
11	10.5	1	1.57	254.84	10395.072	0.03	81.81	90.56	50.86	39.7	0.78	14.177
12	11.5	1	1.56	245.26	9565.652	0.03	85.31	91.5	52.57	38.93	0.84	14.737
13	12.5	1	1.56	235.68	8835.435	0.03	87.84	93.23	56.37	36.86	0.85	15.298
14	13.5	1	1.557	235.68	8817.741	0.03	84.56	92.19	56.68	35.52	0.79	15.855
15	14.5	1	1.54	235.68	8721.659	0.03	83.96	88.87	54.02	34.84	0.86	16.395
16	15.5	1	1.504	235.68	8516.402	0.03	86.67	87.14	51.72	35.42	0.99	16.9
17	16.5	1	1.48	241.22	8778.381	0.03	87.57	86.35	50.72	35.62	1.03	17.38
18	17.5	1	1.481	246.76	9192.222	0.03	88.79	87.28	51.1	36.18	1.04	17.861
19	18.5	1	1.496	259.02	10229.702	0.03	86.41	85.88	49.72	36.16	1.02	18.356
20	19.5	1	1.51	283.57	12373.798	0.03	78.25	82.52	46.26	36.26	0.88	18.866
21	20.5	1	1.507	295.86	13444.442	0.03	73.6	81.91	44.84	37.08	0.78	19.373

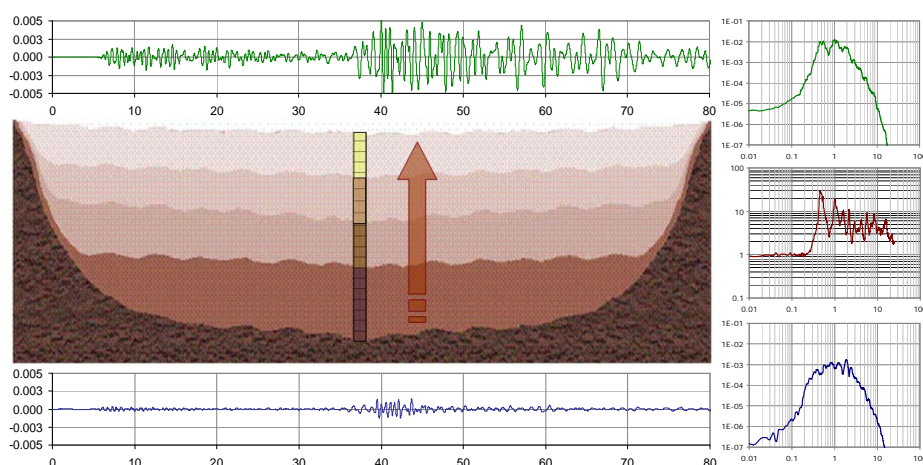


## Incertidumbre en la respuesta

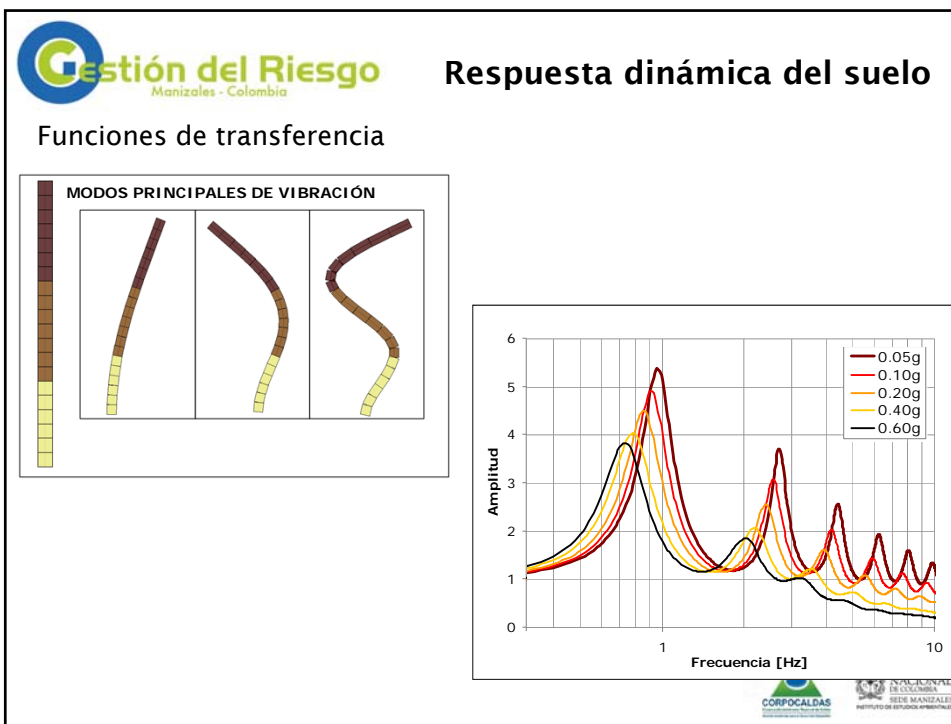
- ✓ La generación de un conjunto de 20 estratigrafías sintéticas permite estimar el nivel de incertidumbre en la respuesta dinámica del suelo por efecto del desconocimiento del valor exacto de las propiedades geotécnicas.
- ✓ La evaluación de la incertidumbre en la respuesta dinámica de suelos blandos 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).

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

## Respuesta dinámica del suelo







**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

## Respuesta dinámica del suelo

### Funciones de transferencia - señales para el cálculo

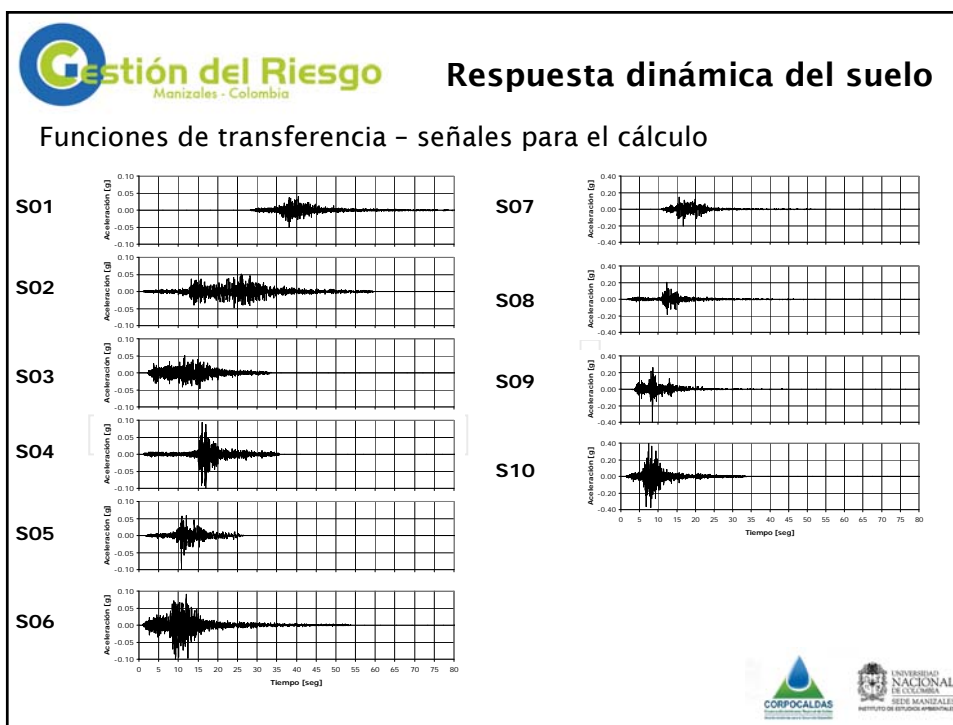
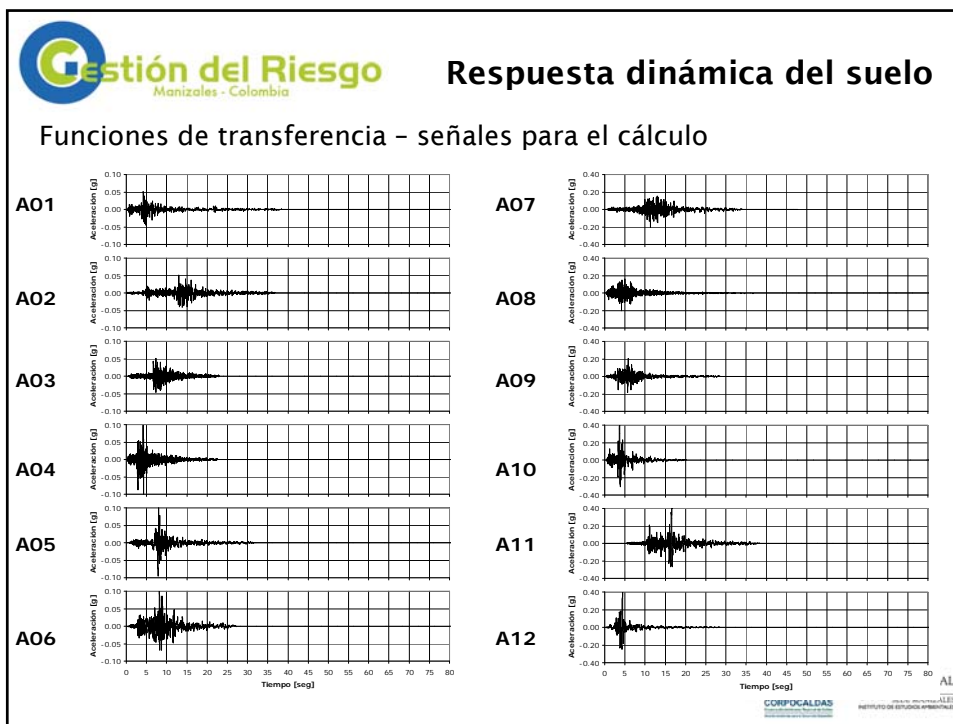
#### Señales fuente activa


ID	Nombre	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax (g)	Δt (seg)	Amax Utilizada (g)	Factor de Diezmado
A01	Chalfant Valley	U.S.A	21/07/1986	6.2	50	39.81	0.051	0.005	0.05	4
A02	Georgia	U.S.S.R	15/06/1991	6.2	52	38.17	0.046	0.005	0.05	4
A03	Palm Springs	U.S.A	08/07/1986	6	63	24	0.053	0.005	0.05	4
A04	Anza	U.S.A	08/07/1986	6	26	24	0.113	0.005	0.1	4
A05	Armenia - Bocatoma	Colombia	19/01/1999	6.2	42	31.92	0.084	0.01	0.1	2
A06	Imperial Valley	U.S.A.	15/10/1979	6.5	36	28.28	0.109	0.005	0.1	4
A07	Irpinia	Italia	23/11/1980	6.5	33	36.34	0.199	0.0029	0.2	4
A08	Whittier Narrows	U.S.A	10/01/1987	6	10	29.96	0.199	0.02	0.2	1
A09	San Fernando	U.S.A	09/02/1971	6.6	27	29.66	0.212	0.01	0.2	2
A10	Coalinga	U.S.A.	22/07/1983	5.7	12	21.3	0.375	0.005	0.4	4
A11	Northridge	U.S.A.	17/01/1994	6.7	35	30.33	0.493	0.01	0.4	2
A12	Park Field	U.S.A.	28/06/1966	6.1	10	30.33	0.356	0.01	0.4	2

#### Señales fuente subducción

ID	Nombre	País	Fecha	Magnitud	Distancia (km)	Duración (seg)	Amax (g)	Δt (seg)	Amax Utilizada (g)	Factor de Diezmado
S01	Nuxco	México	15/07/1996	6.5		83	0.049	0.005	0.05	4
S02	Ocotito	México	14/09/1995	7.2		61	0.059	0.001	0.05	2
S03	Zihuatejelo	México	10/12/1994	6.6		34.05	0.053	0.01	0.05	2
S04	Paraiso	México	25/09/1984	6.5		36.67	0.102	0.005	0.1	4
S05	Red Smart	Taiwan	12/06/1985	6.5	45	27.15	0.142	0.01	0.1	2
S06	La Unión	México	10/12/1994	6.6		54.98	0.092	0.005	0.1	4
S07	Caleta	México	09/08/2000	6.7		42.21	0.194	0.005	0.2	4
S08	Ocotito	México	25/04/1989	6.5		53.16	0.195	0.01	0.2	2
S09	Copala	México	24/10/1993	6.2		58.94	0.292	0.01	0.4	2
S10	Las Vigas	Mexico	25/04/1989	6.5		34.43	0.345	0.005	0.4	4

**CORPOCALDAS**  
CORPORACIÓN DE CALDAS  
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES





## Respuesta dinámica del suelo

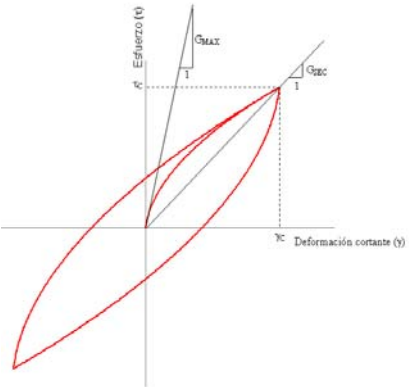
**Metodología de cálculo**


Se usa el modelo lineal equivalente, el cual consiste en una modificación del modelo de Kelvin-Voigt para tener en cuenta algunos tipos de no linealidades.

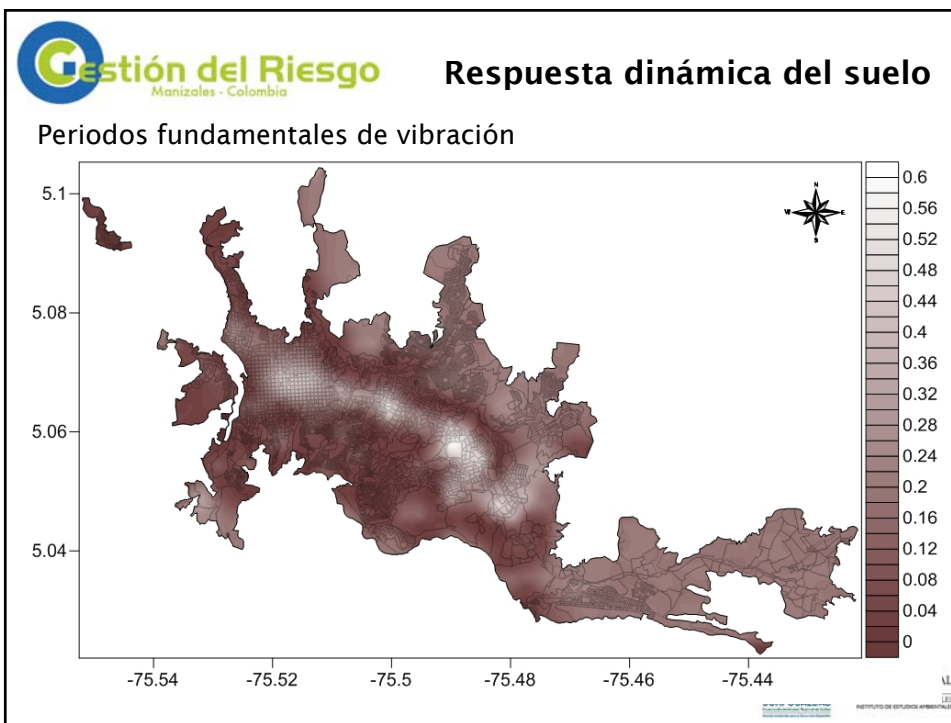
La no linealidad y el comportamiento de esfuerzo deformación de los suelos es modelado como el de un material con rigidez degradante descrita por la curva de Ramberg y Osgood (1943).

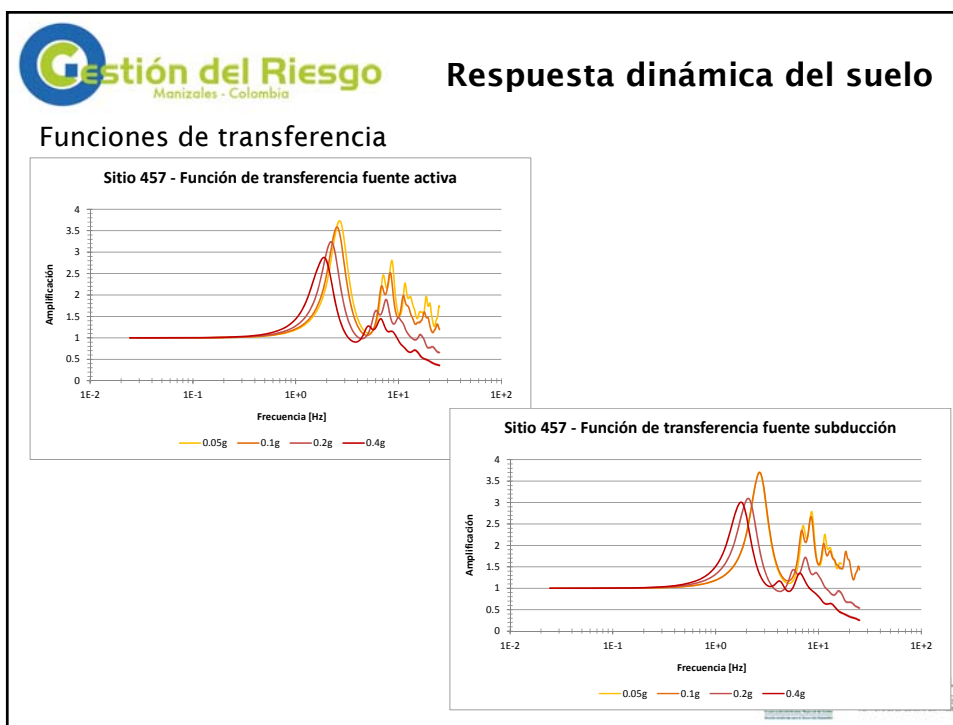
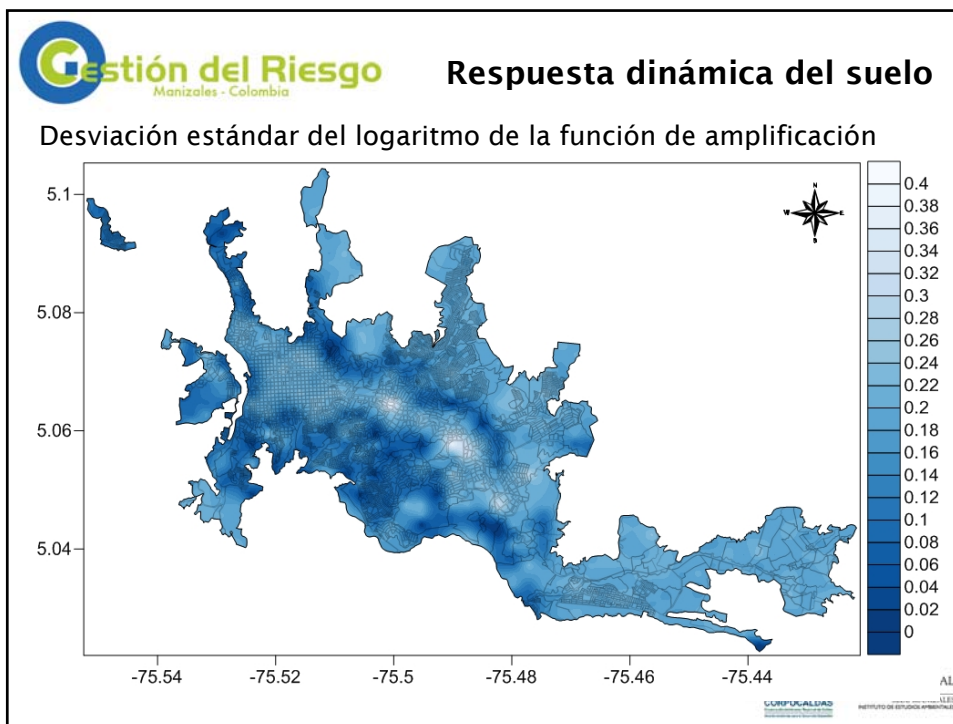
El módulo de corte equivalente,  $G$ , es tomado como el módulo secante  $G_{SEC}$ , que depende de la amplitud de deformación cortante  $g$ .

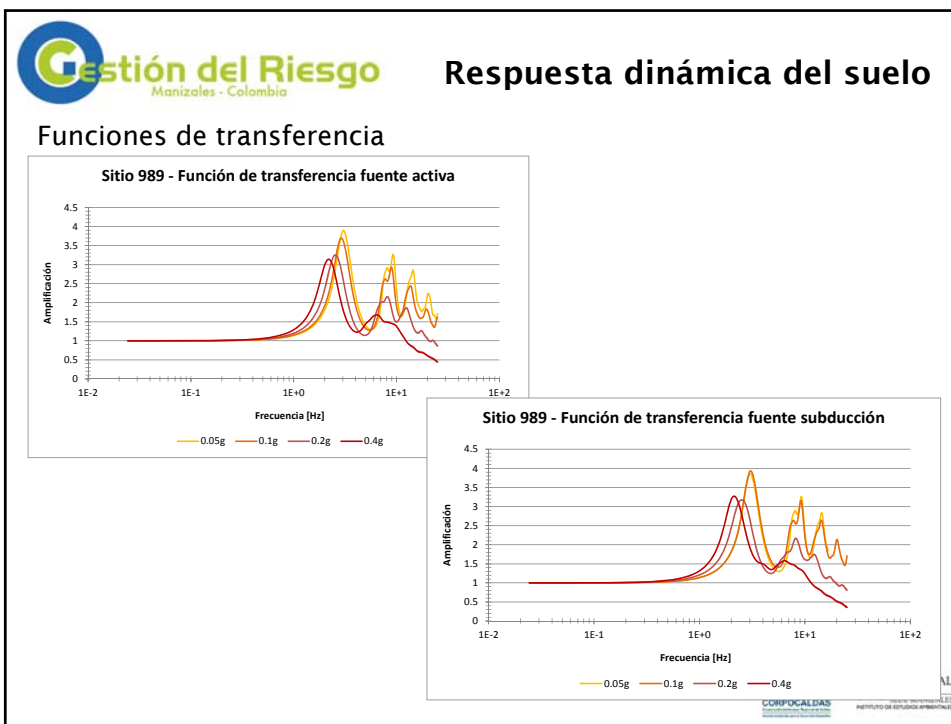
Para obtener la respuesta lineal, se usa el método de la matriz propagadora de Thompson-Haskell.







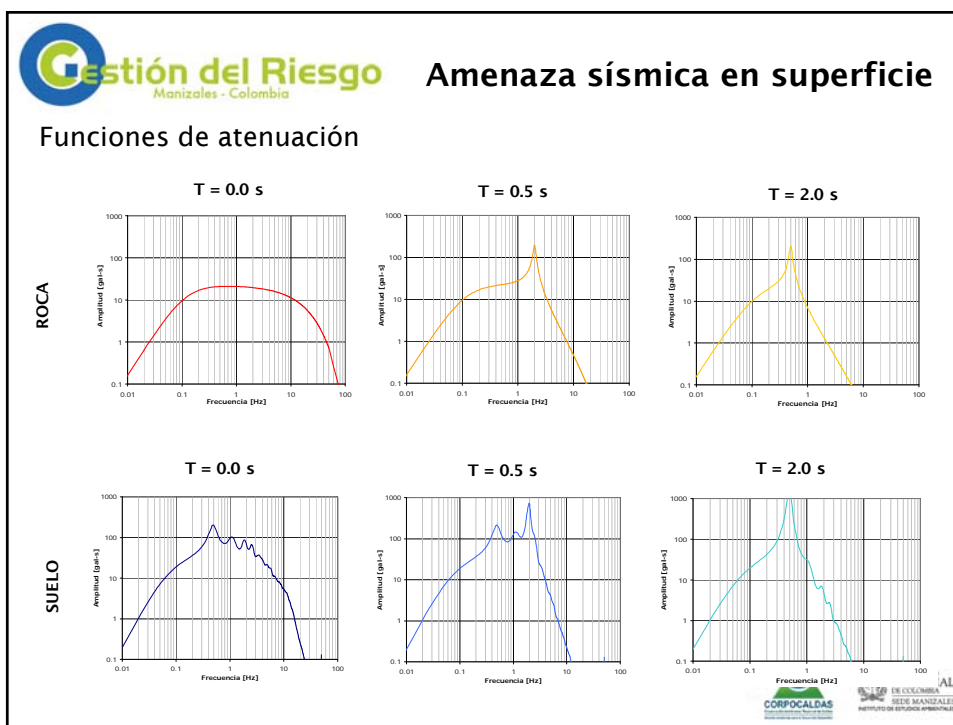
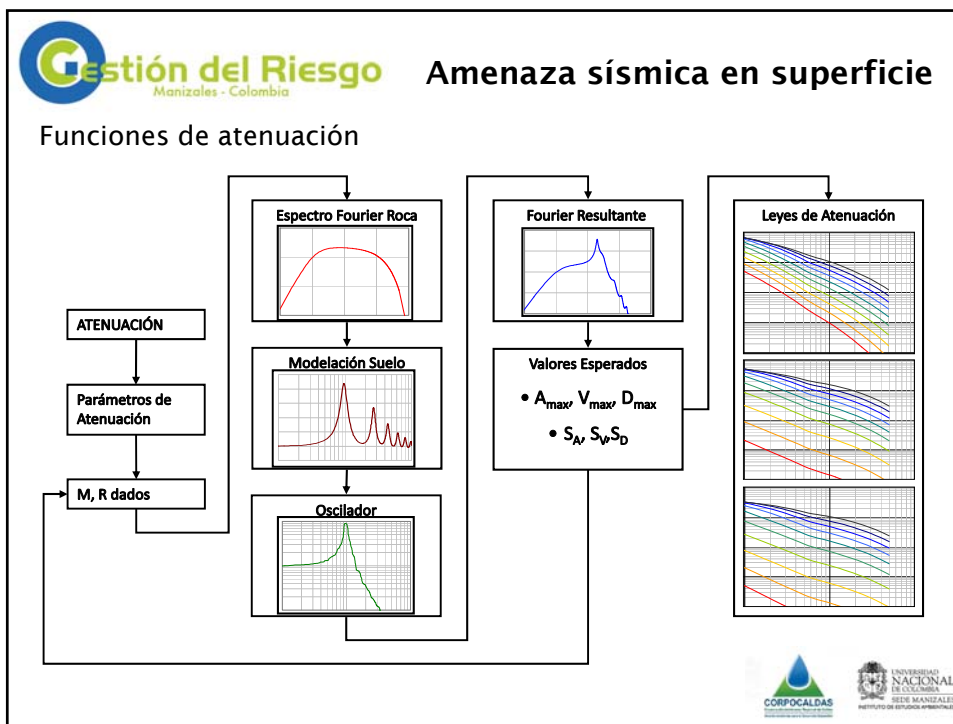


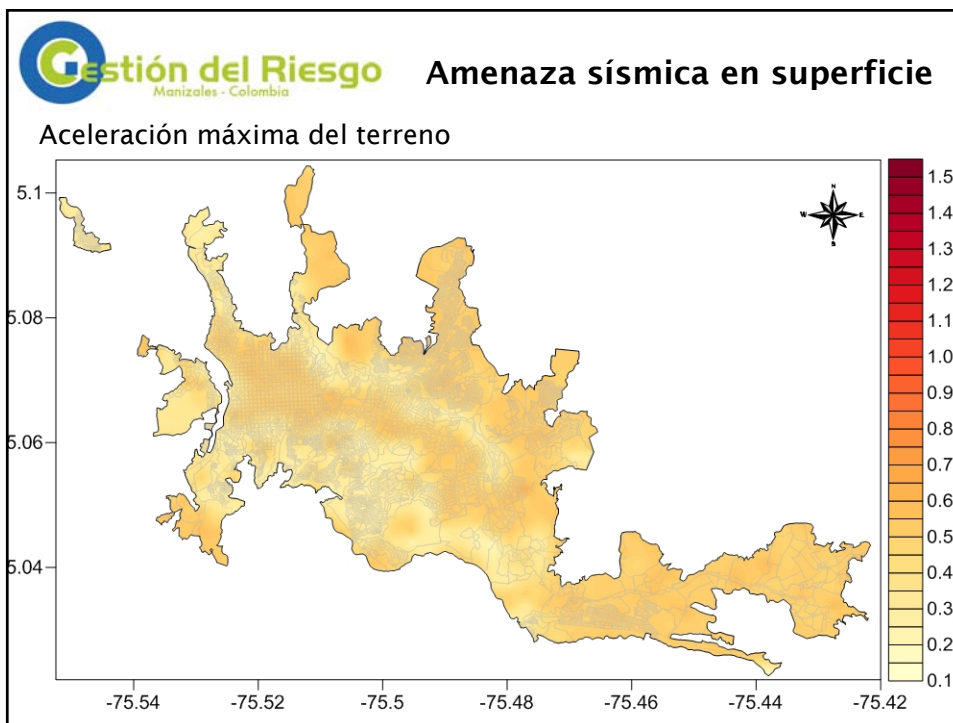
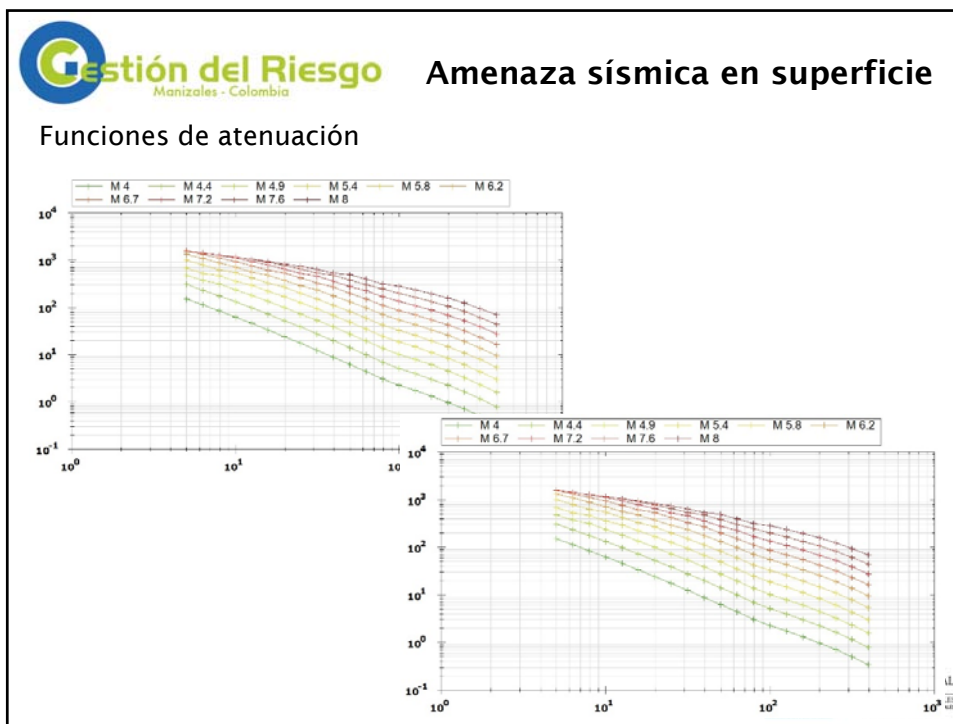


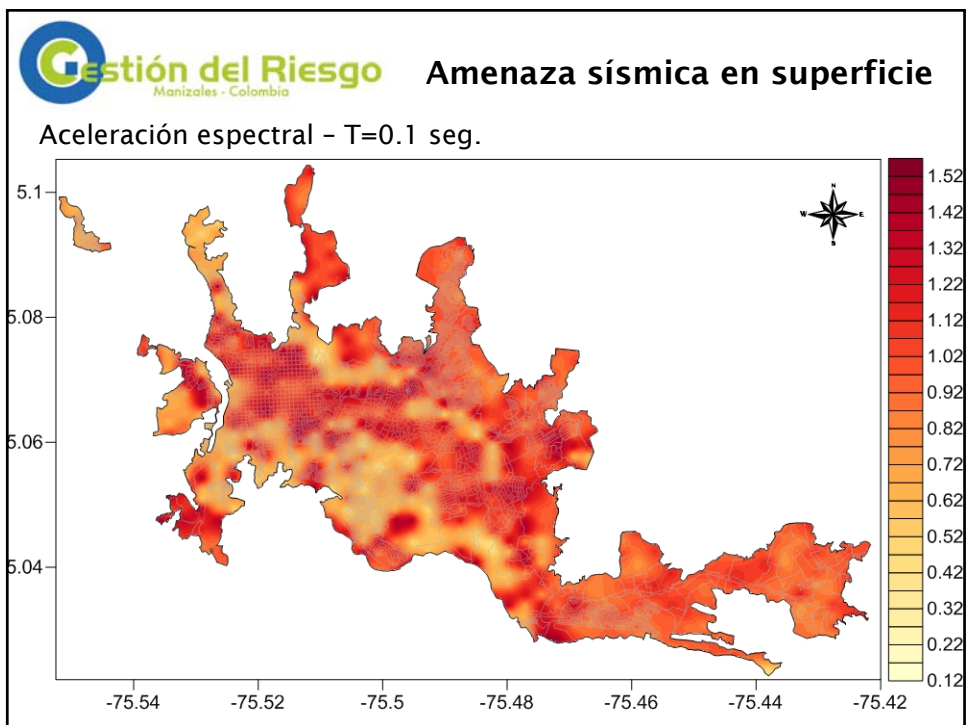
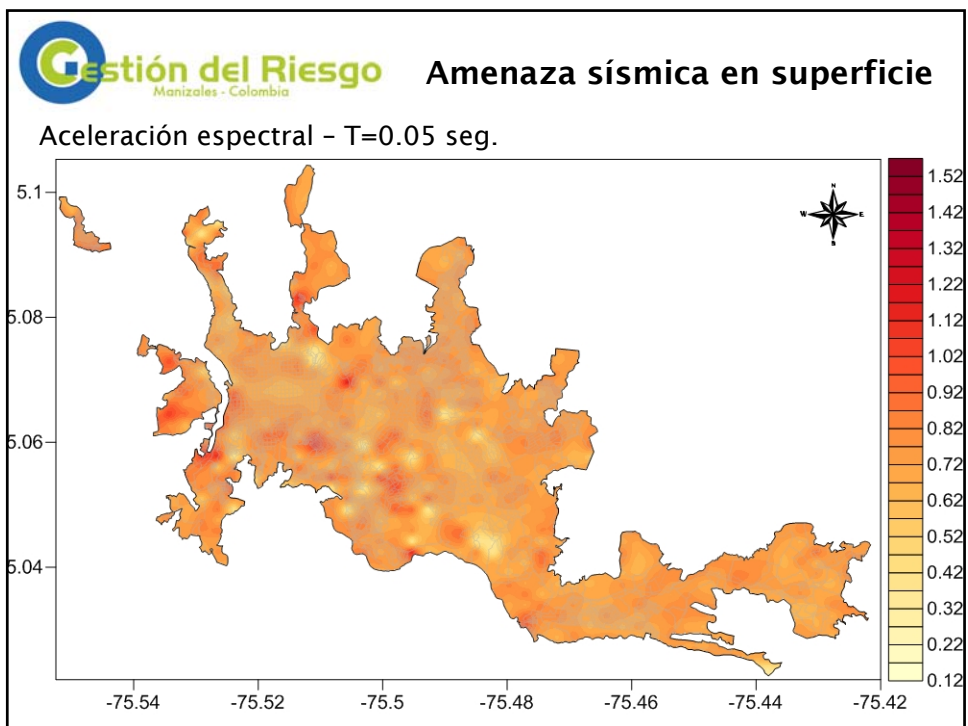
**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

# 5 AMENAZA SÍSMICA EN SUPERFICIE DEL TERRENO

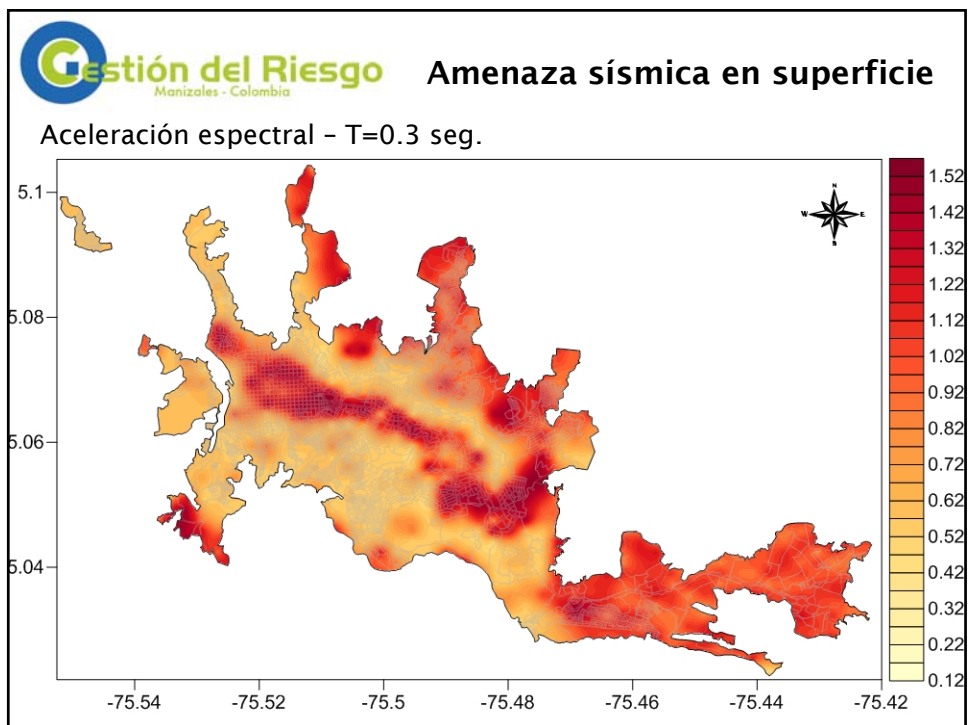
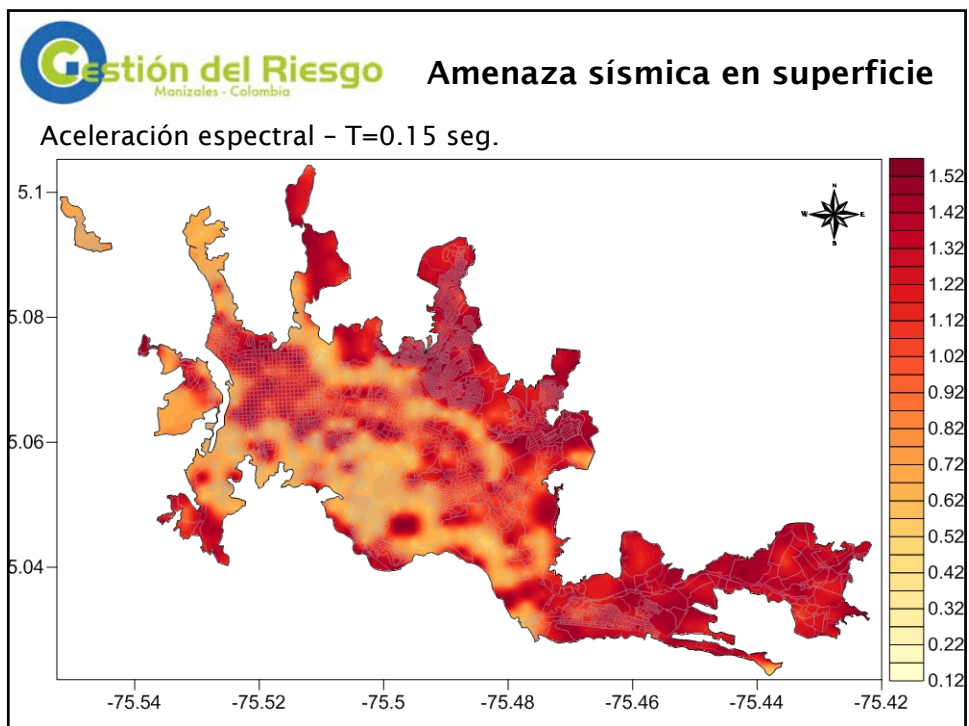
CORPOCALDAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SISSE MANIZALES  
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES

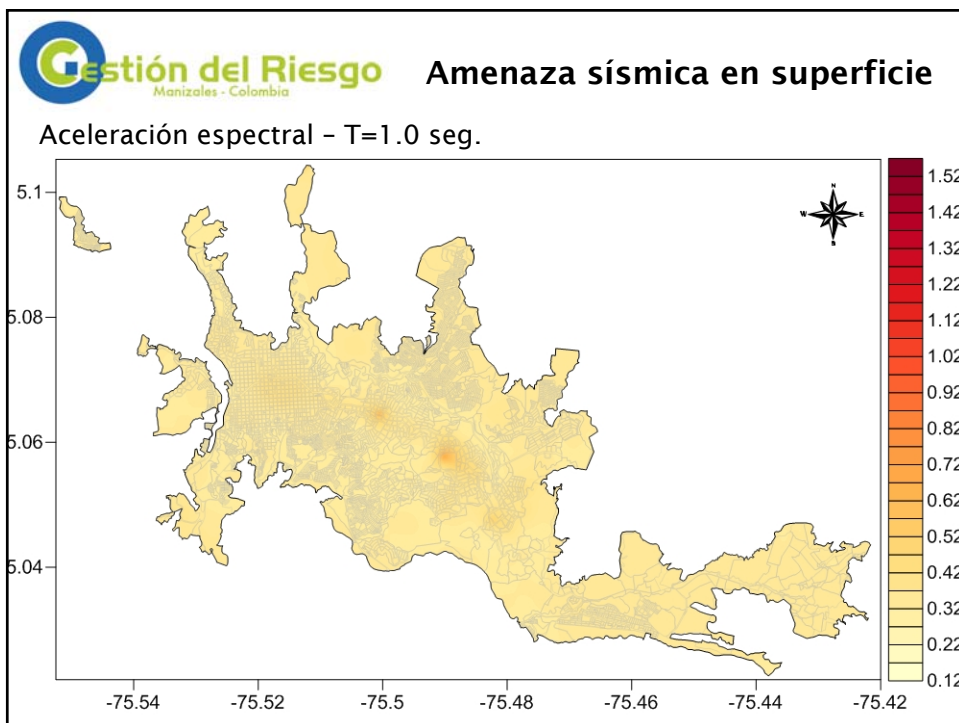
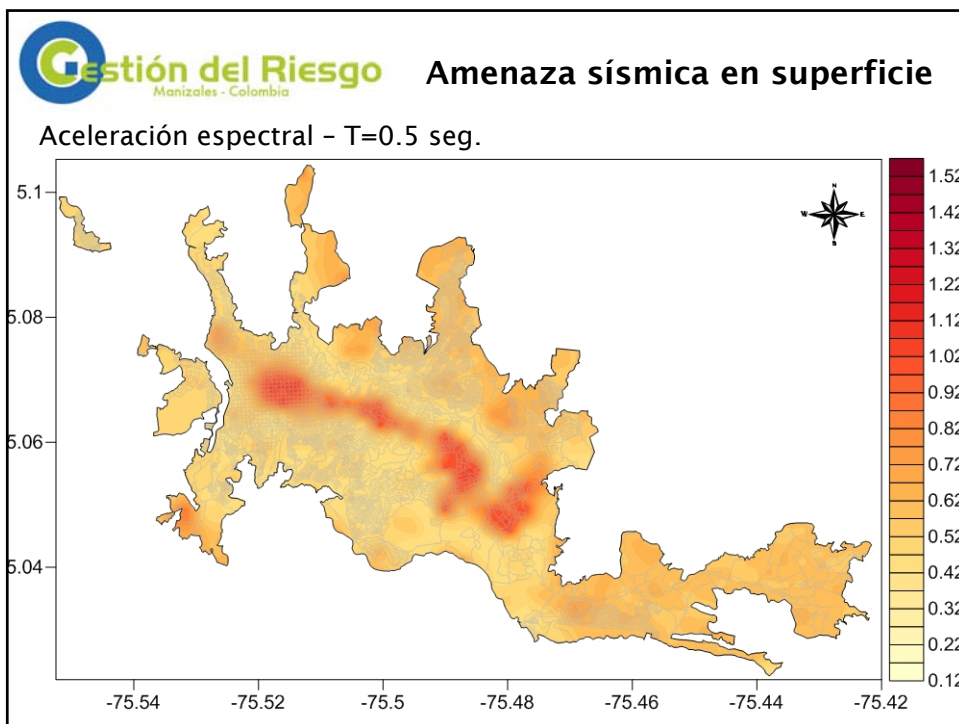


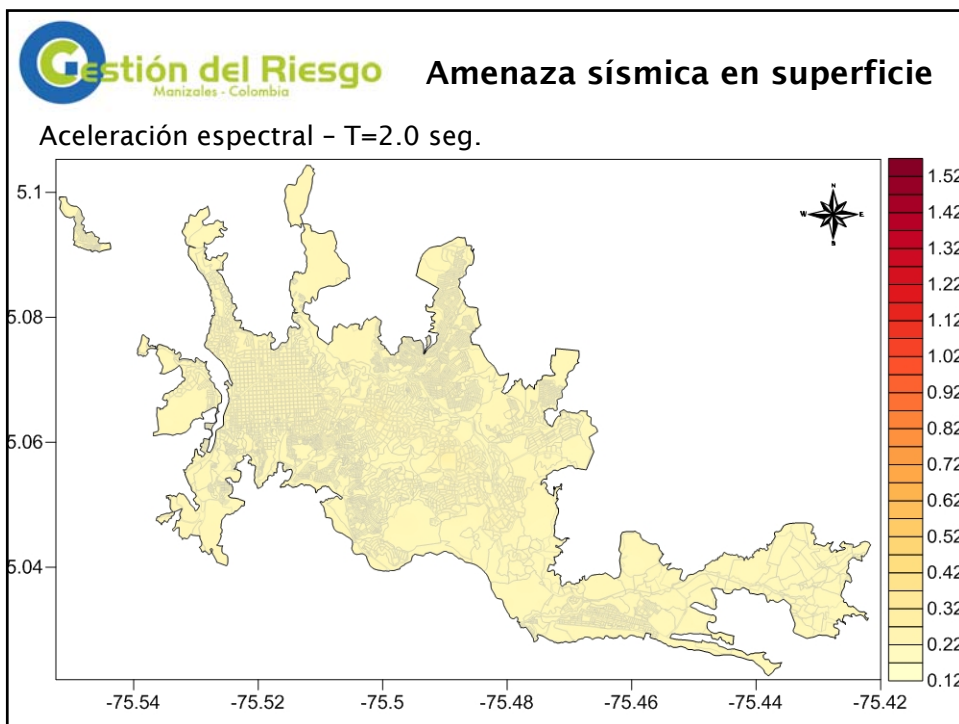












**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

# 6 ARMONIZACIÓN CON LA NSR-10

**COPROPALDAS**  
CORPORACIÓN PROMOTORA DE MANIZALES

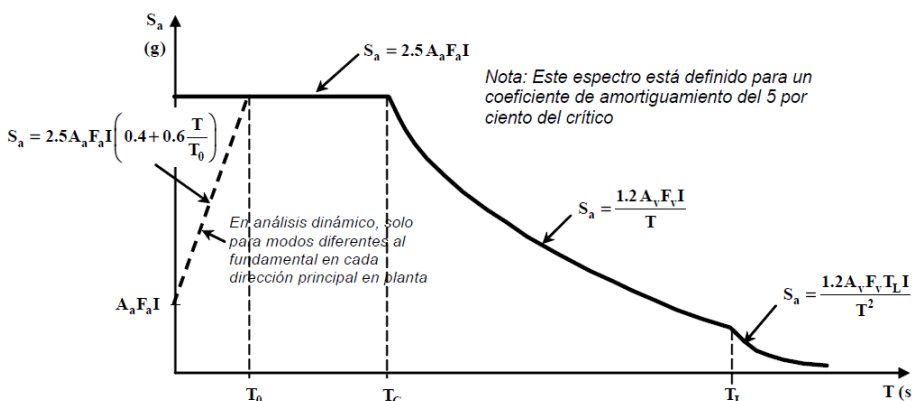
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
Sede Manizales  
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES

## Armonización con la NSR-10

- ✓ 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, de manera que se viabilice su uso en el mismo contexto de aplicación de la normativa de construcciones sismo resistentes a nivel nacional.
- ✓ 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:
  - 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.
  - El promedio de las diferencias de aceleración espectral para todos los periodos estructurales.

## Armonización con la NSR-10

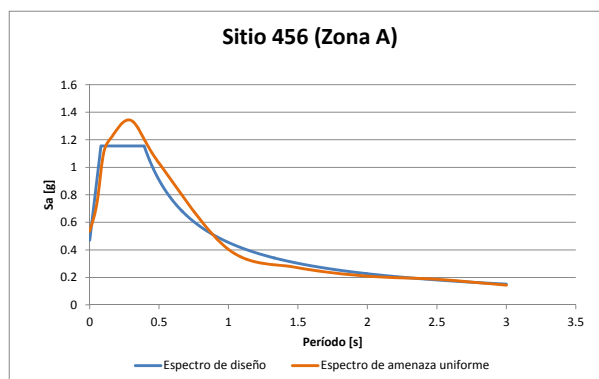
Los espectros de diseño se calculan por medio de la definición de 5 parámetros:  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $I$ ,  $F_a$  y  $F_v$ . Los primeros 2 parámetros están asociados a la amenaza en roca, el tercero al nivel de importancia y los 2 restantes al efecto de la respuesta de los depósitos de suelo.

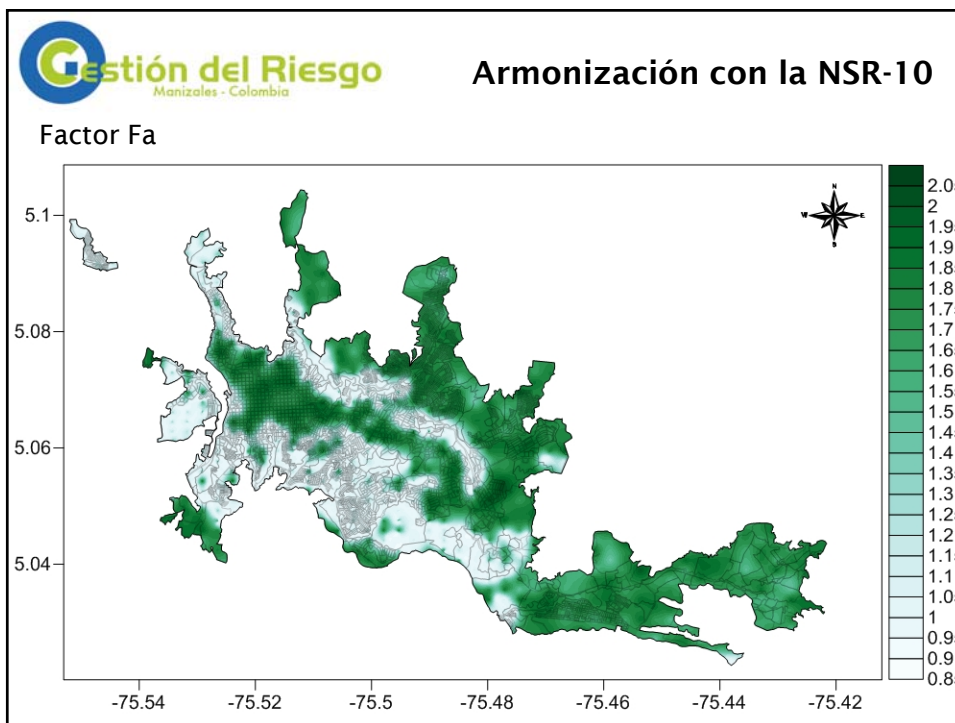
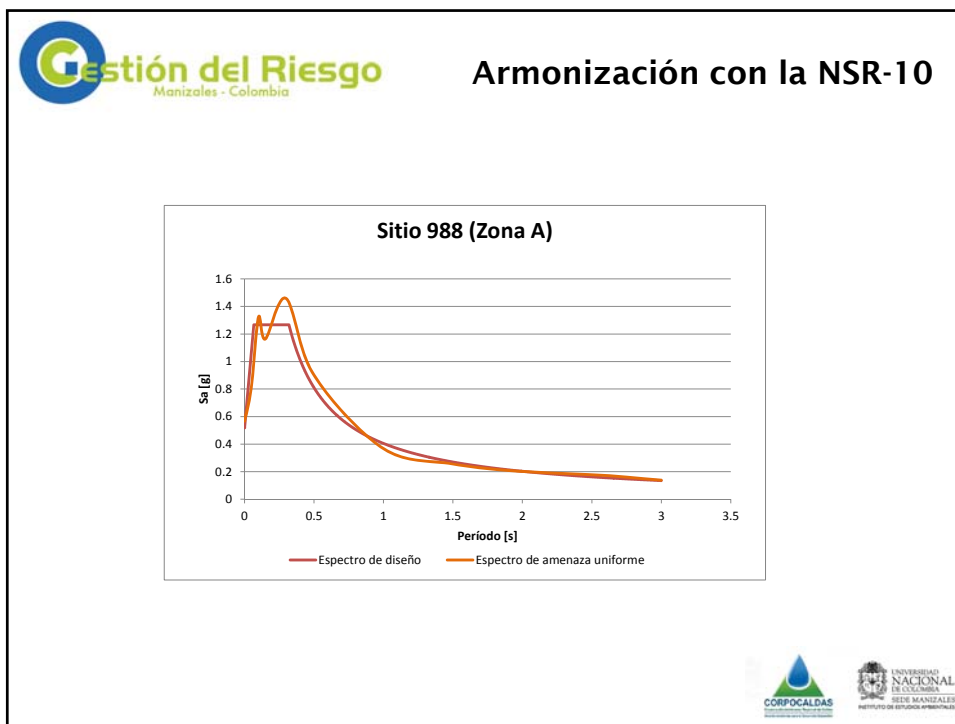


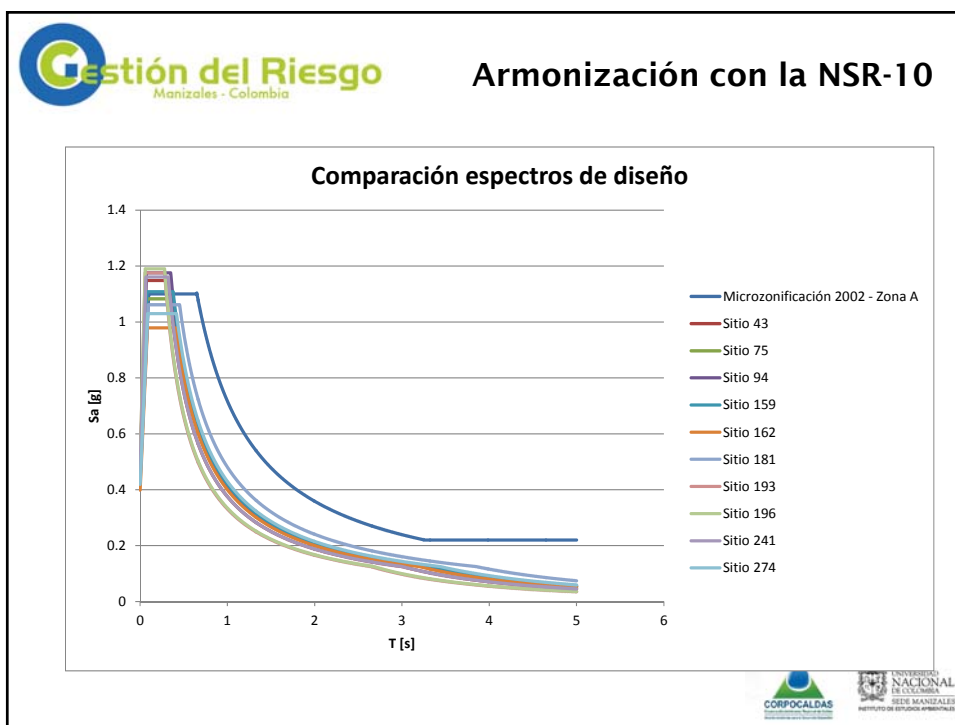
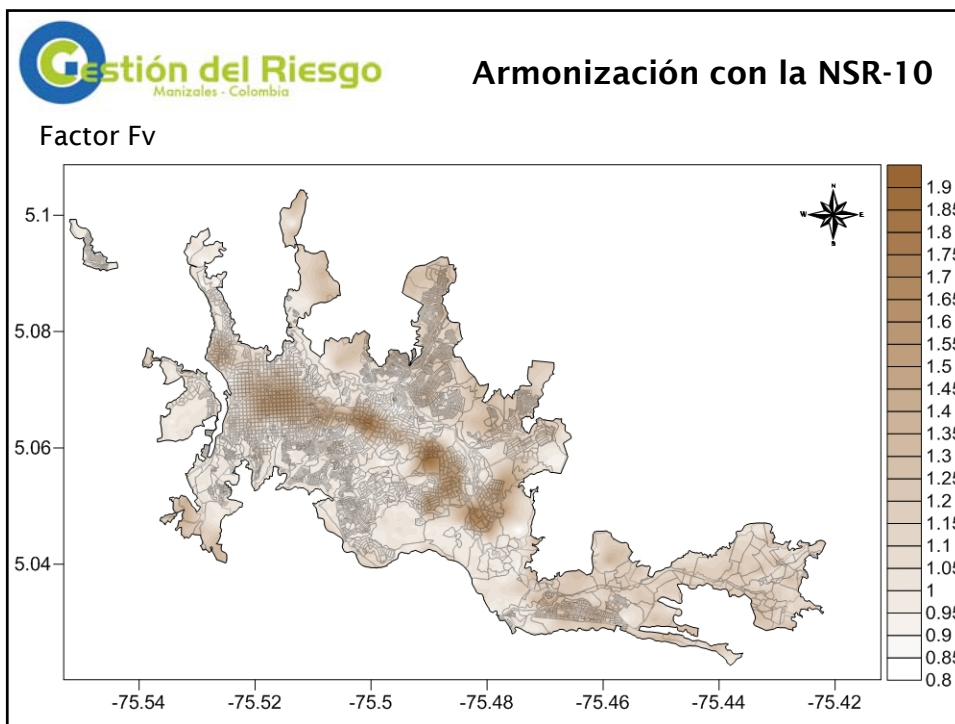
## Armonización con la NSR-10

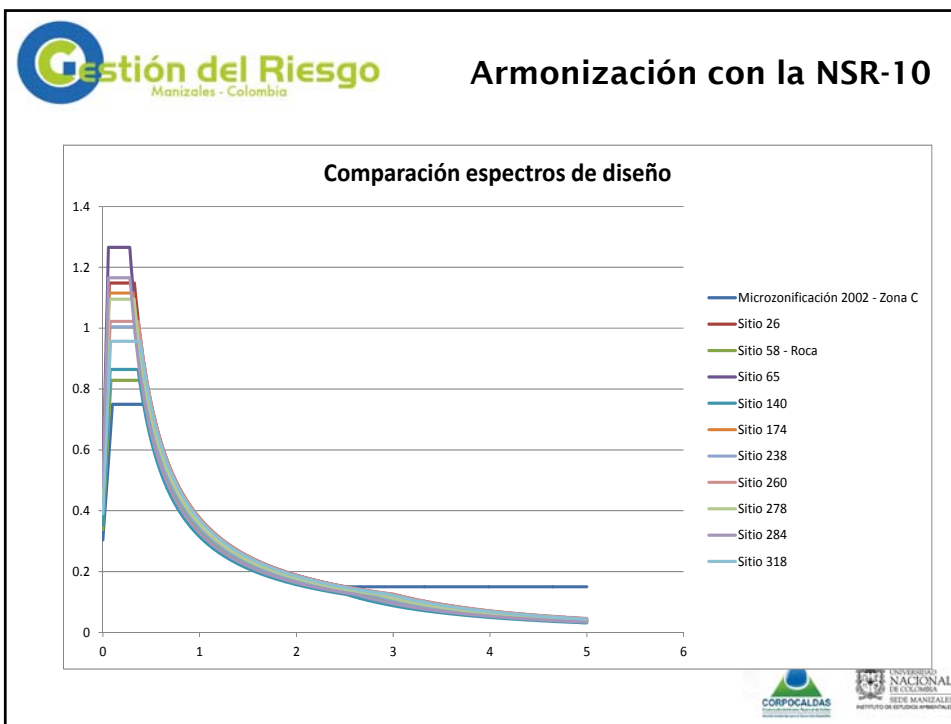
- ✓ Con el fin de armonizar los espectros de diseño resultantes a la NSR-10, se fijan los parámetros de amenaza en roca a los especificados para la ciudad de Manizales:  $Aa = 0.25 \text{ g}$  y  $Av = 0.25 \text{ g}$ .
- ✓ El factor de importancia se asume como  $I=1$ , dado que la aplicabilidad de los resultados acá presentados se limita al diseño de edificaciones convencionales.
- ✓ Por último, se establecen como parámetros libres los asociados al efecto del suelo blando:  $Fa$  y  $Fv$ .

## Armonización con la NSR-10







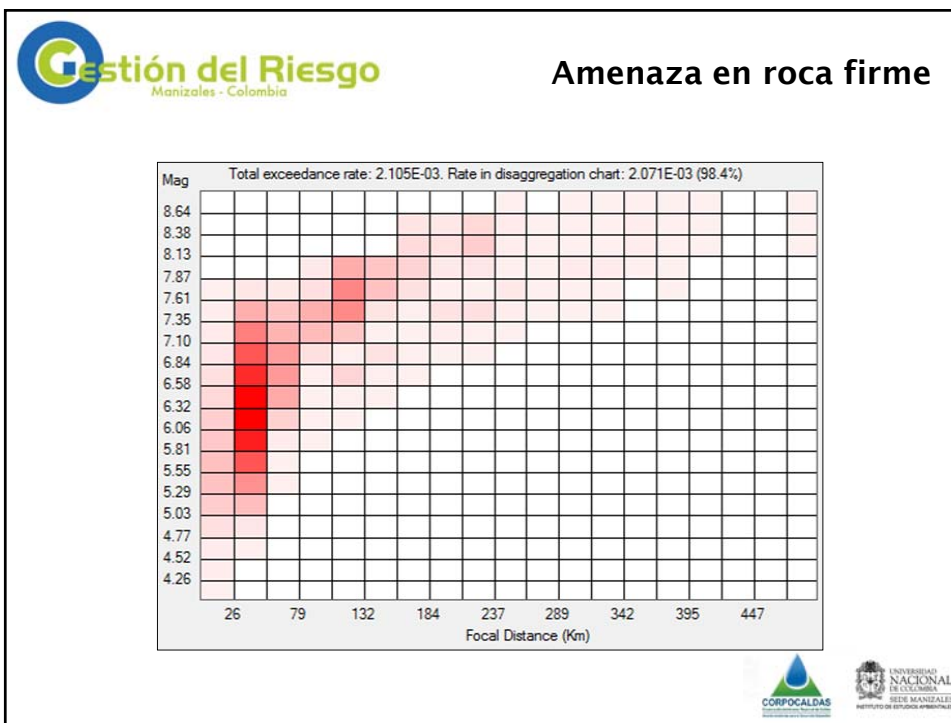
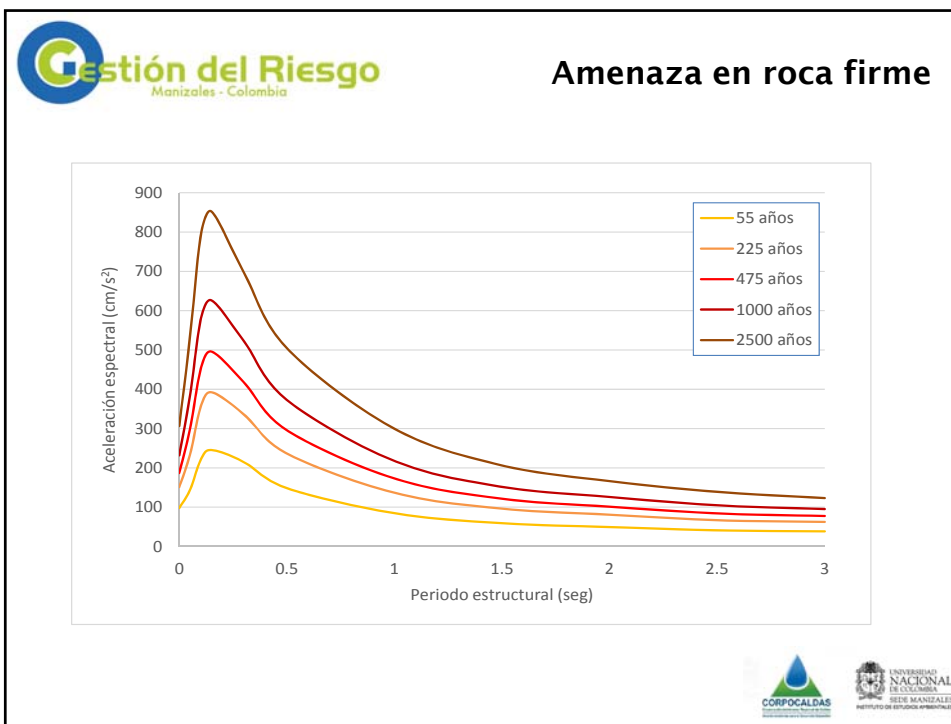



**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

**7 SEÑALES COMPATIBLES  
CON LA AMENAZA**

Logos: CORPOCALDAS, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE MANIZALES, INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES









## Señales seleccionadas

### Primer rango

Nombre	Fecha	Hora	Pais	Estación	Fuente	Tipo de suelo	Longitud epicentro	Latitud epicentro	Longitud estación	Latitud estación	Dst. Hpoc.[Km]	Prof. [Km]	Mecanismo	Mw	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV [cm/s]	PGD [cm]	Dur. [seg]
Northridge-01	17/01/1994	12:31.00 (UT)	USA	Pacoima Dam (upper left)	NGA	A	-118.55	34.21	-118.40	34.33	26.85	17.5	Reverse	6.69	1285.2	105.5	23.5	39.98
Northridge-01	17/01/1994	12:31.00 (UT)	USA	Pacoima Dam (dow nstr)	NGA	A	-118.55	34.21	-118.40	34.33	26.85	17.5	Reverse	6.69	434.1	31.5	4.5	19.98
San Fernando	09/02/1971	14:00.00 (UT)	USA	Lake Hughes #4	NGA	B	-118.41	34.44	-118.48	34.65	27.46	13	Reverse	6.61	152.7	8.6	1.9	36.89
R Kobe Japan	18/01/1995	20:46.00 (UT)	Japan	Kobe University	NGA	B	135.01	34.59	135.24	34.73	31.08	17.3	Strike - Slip	6.9	310.5	34.9	7.4	31.99
Ipina, Italy-02	23/11/1990	19:35.00 (UT)	Italy	Auletta	NGA	B	15.33	40.85	15.56	40.56	37.81	7	Normal	6.2	23	8.1	10.2	110.23
San Fernando	09/02/1971	14:00.00 (UT)	USA	Pasadena - Old Seismo Lab	NGA	B	-118.41	34.44	-118.17	34.15	41.27	13	Reverse	6.61	202.1	11	2.5	29.98
Ipina, Italy-02	23/11/1990	19:35.00 (UT)	Italy	Sturno	NGA	B	15.33	40.85	15.12	41.02	27.5	7	Normal	6.2	77.2	18.9	13	126.07
Northridge-01	17/01/1994	12:31.00 (UT)	USA	LA - Wonderland Ave	NGA	B	-118.55	34.21	-118.38	34.11	25.82	17.5	Reverse	6.69	172.1	12	2.8	29.98
Northridge-01	17/01/1994	12:31.00 (UT)	USA	Vasquez Rocks Park	NGA	B	-118.55	34.21	-118.33	34.49	41.9	17.5	Reverse	6.69	139.1	11.3	2.9	39.98
Northridge-01	17/01/1994	12:31.00 (UT)	USA	LA - Griffith Park Observatory	NGA	B	-118.55	34.21	-118.30	34.12	30.86	17.5	Reverse	6.69	163.6	13.8	2.4	46.93
Loma Prieta	18/10/1989	03:00 (UT)	USA	Gilroy Array #1	NGA	B	-121.88	37.04	-121.57	36.97	33.55	17.48	Reverse-Oblique	6.93	473.2	34.5	8.1	39.94
Ipina, Italy-01	23/11/1990	19:34.00 (UT)	Italy	Auletta	NGA	B	15.34	40.81	15.56	40.56	34.44	9.5	Normal	6.9	62.4	21.5	44.8	118.23
Ipina, Italy-01	23/11/1990	19:34.00 (UT)	Italy	Sturno	NGA	B	15.34	40.81	15.12	41.02	31.8	9.5	Normal	6.9	357.8	220.2	568.9	163.91
Northridge-01	17/01/1994	12:31.00 (UT)	USA	Burbank - Howard Rd	NGA	B	-118.55	34.21	-118.30	34.20	28.05	17.5	Reverse	6.69	163.3	8.6	1.8	29.98
Northridge-01	17/01/1994	12:31.00 (UT)	USA	M Wilson - OT Seis Sta	NGA	B	-118.55	34.21	-118.06	34.22	49	17.5	Reverse	6.69	134.4	5.8	0.5	39.98
Ipina, Italy-01	23/11/1990	19:34.00 (UT)	Italy	Beaccia	NGA	B	15.34	40.81	15.38	41.01	25.13	9.5	Normal	6.9	83.1	43.9	35.4	131.91
Morgan Hill	24/04/1984	21:15.00 (UT)	USA	Gilroy Array #1	NGA	B	-121.70	37.31	-121.57	36.97	39.55	8.5	Strike - Slip	6.19	98.3	11.7	16.8	119.9
Channoli	28/03/1999	19:05.11 (UTC)	India	Joshimath	COSMOS	Rock	79.40	30.51	79.57	30.55	26	15	Unknown	6.6	696	37.2	20.1	25.04
Northridge	17/01/1994	12:31.03.9 (UTC)	USA	Lake Hughes #9	COSMOS	Rock	-118.55	34.21	-118.56	34.61	29.4	17.5	Reverse	6.7	221.2	13.6	3.5	59.98

### Segundo rango


ID	Nombre	Fecha	Hora	Pais	Estación	Fuente	Tipo de suelo	Longitud epicentro	Latitud epicentro	Longitud estación	Latitud estación	Dst. Hpoc. [Km]	Prof. [Km]	Mecanismo	Mw	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV [cm/s]	PGD [cm]	Dur. [seg]
1741	Chi-Chi, Taiwan	20/09/1999	:00 (UT)	Taiwan	TCU085	NGA	B	120.80	23.86	24.68	121.36	107.16	6.76	Reverse-Oblique	7.62	53.7	6.5	7.4	79
1570	Chi-Chi, Taiwan	20/09/1999	:00 (UT)	Taiwan	ILA063	NGA	B	120.80	23.86	24.62	121.52	111.09	6.76	Reverse-Oblique	7.62	81.7	12.8	9	79
1810	Chi-Chi, Taiwan	20/09/1999	:00 (UT)	Taiwan	TIN042	NGA	B	120.80	23.86	23.00	121.28	105.69	6.76	Reverse-Oblique	7.62	58.9	6.9	9.5	125
	Landers	28/06/1992	11:57:34.1 (UTC)	USA	Rancho Cucamonga	COSMOS	Rock	-116.44	34.20	34.17	117.58	105.1	7	Strike-slp	7.3	65.6	9.6	7.7	165
	Landers	28/06/1992	11:57:34.1 (UTC)	USA	Wrightwood - Jackson flat	COSMOS	Rock	-116.44	34.20	34.38	116.43	121.1	7	Strike-slp	7.3	46.5	10.1	7.3	70



# 8

## 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 ajusto 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.
4. 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.
5. 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.




## Principales aplicaciones de los resultados

1. Para la construcción de edificaciones nuevas, así como la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las existentes y su reforzamiento.
2. Como modelo de respuesta sísmica dentro del SISMan LISA. El uso de un modelo como el presentado permitiría determinar de manera directa la respuesta sísmica de los suelos de Manizales en múltiples ubicaciones, ante la ocurrencia de un terremoto caracterizado por un acelerograma registrado en roca.
3. Para la evaluación de riesgo, a partir de la definición de funciones de transferencia del espectro de respuesta, haciendo uso del modelo geotécnico propuesto.



# 9 SOFTWARE DE CÁLCULO



**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

**Strong Motion Analyst**  
Version 1.0  
Copyright © Gabriel Bernal 2014  
All rights reserved.

**Gestión del Riesgo**  
Manizales - Colombia

**Seismic Microzonation Studio**  
Version 1.0.0.0  
Copyright © Gabriel Bernal 2012  
All rights reserved.

Site	Longitude (°)	Latitude (°)
1	-74.7821	4.3777
2	-74.7821	4.3822
3	-74.7821	4.3967
4	-74.7821	4.4062
5	-74.7821	4.4157
6	-74.7821	4.4252
7	-74.7821	4.4347
8	-74.7821	4.4442
9	-74.7821	4.4537
10	-74.7821	4.4632
11	-74.7821	4.4727
12	-74.7821	4.4822
13	-74.7821	4.4917
14	-74.7821	4.5012
15	-74.7821	4.5107
16	-74.7821	4.5202
17	-74.7821	4.5297
18	-74.7821	4.5392
19	-74.7821	4.5487
20	-74.7821	4.5582
21	-74.7821	4.5677
22	-74.7821	4.5772
23	-74.7821	4.5867
24	-74.7821	4.5962
25	-74.7821	4.6057
26	-74.18488	4.3777
27	-74.18488	4.3872
28	-74.18488	4.3967
29	-74.18488	4.4062
30	-74.18488	4.4157
31	-74.18488	4.4252
32	-74.18488	4.4347

