# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO

#### CARRERA: INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIERAS CIVILES

**TEMA:** 

ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO EN EL SECTOR DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UBICADA EN LA PARROQUIA DE CHILLOGALLO DEL CANTÓN QUITO, USANDO MODELOS NUMÉRICOS DE CAMPO LIBRE, PROPAGACIÓN DE ONDA BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL, EMPLEANDO EL SOFTWARE MIDAS GTS NX.

#### AUTORAS: JIMÉNEZ CUEVA KAREN LISSET MENDOZA PICO BRÍTANI MICHELLE

#### TUTOR: RODRÍGUEZ BADILLO FREDDY ISRAEL

Quito, julio del 2021

#### **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotras, Karen Lisset Jiménez Cueva y Brítani Michelle Mendoza Pico, con documento/s de identificación N° 0927124552 y N° 1316216942, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO EN EL SECTOR DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UBICADA EN LA PARROQUIA DE CHILLOGALLO DEL CANTÓN QUITO, USANDO MODELOS NUMÉRICOS DE CAMPO LIBRE, PROPAGACIÓN DE ONDA BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL, EMPLEANDO EL SOFTWARE MIDAS GTS NX, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERAS CIVILES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autoras nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, julio del 2021

Karen Lisset Jiménez Cueva CI: 0927124552

Britani Mendoza

Brítani Michelle Mendoza Pico CI: 1316216942

2

#### DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO EN EL SECTOR DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA UBICADA EN LA PARROQUIA DE CHILLOGALLO DEL CANTÓN QUITO, USANDO MODELOS NUMÉRICOS DE CAMPO LIBRE, PROPAGACIÓN DE ONDA BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL, EMPLEANDO EL SOFTWARE MIDAS GTS NX, realizado por las Srtas. estudiantes JIMÉNEZ CUEVA KAREN LISSET y MENDOZA PICO BRÍTANI MICHELLE, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, 13 de julio del 2021

Freddy Israel Rodríguez Badillo CI: 1720094026

# ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SITIO EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, UBICADA EN LA PARROQUIA DE CHILLOGALLO DE LA CIUDAD DE QUITO, USANDO MODELOS NUMÉRICOS DE CAMPO LIBRE, PROPAGACIÓN DE ONDA BIDIMENSIONAL Y TRIDIMENSIONAL, EMPLEANDO EL SOFTWARE MIDAS GTS NX

SITE RESPONSE ANALYSIS AT THE SALESIAN POLYTECHNIC UNIVERSITY, LOCATED IN THE CHILLOGALLO PARISH OF THE CITY OF QUITO, USING NUMERICAL MODELS OF FREE FIELD, TWO – DIMENSIONAL AND THREE – DIMENSIONAL WAVE PROPAGATION, USING THE MIDAS GTS NX SOFTWARE

Karen Jiménez-Cueva<sup>1</sup>, Brítani Mendoza-Pico<sup>2</sup>, Freddy Rodríguez-Badillo<sup>3</sup>

## Resumen

### Abstract

La investigación se realizó con el objetivo de analizar la respuesta de sitio en el sector de la Universidad Politécnica Salesiana al sur de la ciudad de Quito, elaborando una comparativa de los resultados obtenidos en el software Midas GTS NX con modelos uni, bi y tri dimensionales, para cuatro categorías de amenaza sísmica, de acuerdo con la NEC 2015, capítulo Peligro Sísmico.

Tradicionalmente, para evaluar la respuesta de sitio se emplean modelos unidimensionales, sin embargo, los métodos de elementos y diferencias finitas evaluados en modelos de dos y tres dimensiones son adecuados para generar análisis dinámicos, utilizando modelos constitutivos que simulan el comportamiento del suelo cuando es sometido a cargas cíclicas.

Entre los datos de entrada están: los sismos semillas obtenidos de la base de datos PEER, datos geomecánicas y geofísicos, proporcionados por la Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito.

The research was carried out with the objective of analyzing the site response in the Salesian Polytechnic University sector to the south of the city of Quito, elaborating a comparison of the results obtained in the Midas GTS NX software with one, two and three-dimensional models, for four categories of seismic hazard, according to NEC 2015, Seismic Hazard chapter.

Traditionally, to evaluate the site response, one-dimensional models are used, however, the methods of elements and finite differences evaluated in two and three-dimensional models are suitable to generate dynamic analyzes, using constitutive models that simulate the behavior of the soil when it is subjected. at cyclical loads.

Among the input data are: the seed earthquakes obtained from the PEER database, geomechanical and geophysical data, provided by the Metropolitan Public Company of Quito. The results provided by the site response analysis (ARS) are: surface accelerograms, response spectra, acceleration profile,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Docente de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: kjimenezc2@est.ups.edu.ec; bmendozap@est.ups.edu.ec; frodriguezb1@ups.edu.ec

Los resultados que proporciona el análisis de displacement and angular deformation, among respuesta de sitio (ARS) son: acelerogramas en superficie, espectros de respuesta, perfil de aceleraciones. desplazamientos y deformación angular, entre otros.

Palabras Clave: Efecto de sitio, curva de degradación y amortiguamiento, modelos constitutivos, amortiguamiento de Rayleigh, Midas GTS NX

#### 1. Introducción

En la ciudad de Quito se han realizado estudios de microzonificación sísmica que se limitan a obtener la señal del sismo en superficie generalmente con un análisis de propagación de unidimensional. sin evaluar ondas la aplicabilidad de modelos numéricos bi v tridimensionales. Las hipótesis que se tienen al realizar el modelo 1D causan incertidumbre, sobre todo cuando existe variación espacial de los estratos. Entre las premisas asumidas por este modelo se establece que el suelo se extiende de forma infinita en la dirección horizontal sobre el lecho rocoso y la respuesta principal del depósito de suelo es la producida por la propagación vertical de las ondas cortantes, que se generan luego de las múltiples refracciones en las capas del suelo [1].

Esta investigación pretende analizar el comportamiento del suelo, a través de métodos numéricos utilizando elementos y diferencias finitas, en modelos uni, bi y tridimensionales, eiecutados en el software Midas GTS NX.

El software utiliza métodos numéricos en el que se linealizan las ecuaciones diferenciales, transformándolas en expresiones algebraicas que son integrables [2].

Los datos requeridos para la ejecución de la corresponden investigación a propiedades geomecánicas y geofísicas, acelerogramas de entrada correspondientes a cuatro categorías de amenaza sísmica: frecuente, ocasional, raro y muy raro de acuerdo con la NEC 2015, capítulo de Peligro Sísmico.

others.

Keywords: Site effect, degradation and damping curve, constitutive models, Rayleigh damping, Midas GTS NX

Los modelos 1D y 2D lineal equivalente, se aproximan al comportamiento no – lineal a través de la utilización de curvas dinámicas [3].

Los análisis 2D y 3D implementan modelos constitutivos de Mohr Coulomb y Hardening Soil, los cuales son lineal y no lineal estático respectivamente. Adicional para el 3D se usó el modelo constitutivo Ramberg - Osgood que desarrolla un comportamiento no lineal del suelo.

A partir de lo mencionado, se realiza una comparativa del efecto de sitio, entre los modelos uni, bi y tridimensional.

#### 2. Método

2.1. Datos de entrada

#### 2.1.1. Propiedades geotécnicas del sitio de análisis

Las propiedades geomecánicas características del suelo tienen gran relevancia en la amplificación de ondas en el sitio de análisis. En las Tabla 1 y 2 se presentan las propiedades físicas y geomecánicas obtenidas de ensayos triaxiales U.U. y en la Figura 1 las velocidades de onda de corte, datos proporcionados por la Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito. Cabe recalcar que el nivel freático del sitio de análisis se encuentra a la profundidad 0.5 m.

Se identificó que el basamento sísmico (suelo que tiene un comportamiento parecido a la roca), se encuentra aproximadamente a 60 m., puesto que a esa profundidad se tiene velocidades de onda de corte de 750 m/s. Se asume que desde la profundidad de 22 m. hasta 60 m. existe una relación lineal en las velocidades de onda de corte, valor obtenido de ensayos geofísicos en

estaciones del Metro de Quito cercanas al sitio de análisis.

La Vs<sub>30</sub> es 353 m/s y acorde con la NEC 2015 capítulo Peligro Sísmico, corresponde a un perfil de suelo tipo D.

Estrato	Pi (m)	Pf (m)	γ (T/m <sup>3</sup> )	IP (%)	SUCS
Estrato I	0	2	1.6	10.69	CL
Estrato II	2	8	1.7	8.90	ML
Estrato III	8	18	1.8	-	SM
Estrato IV	18	22	1.8	-	SP
Estrato V	22	61	1.8	-	SM

Tabla 1.Estratigrafía empleada en el análisis.

Donde "Pi" corresponde a la profundidad inicial del estrato y "Pf" es la profundidad final. Tabla 2. Parámetros de corte y dinámicos

	Cor	te	Dinán	nicos
Estrato	C (kg/cm <sup>2</sup> )	<b>φ</b> (°)	<i>vs</i> (m/s)	G <sub>máx</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
Estrato I	0.50	17.40	276.14	1321.45
Estrato II	0.70	18.60	266.99	1235.31
Estrato III	0.35	3.60	358.62	2359.82
Estrato IV	0.38	16.25	414.40	3150.89
Estrato V	0.30	11.68	575.77	6082.78



#### 2.1.2. Curvas de degradación del módulo de corte y relación de amortiguamiento

Cuando un depósito es sometido a cargas cíclicas como las que producen los sismos, se desarrolla un comportamiento no lineal, dado que la no linealidad se ve reflejada en la relación esfuerzo cortante – deformación angular. Si el suelo se encuentra en el rango de deformaciones pequeñas, se puede asumir que tiene un comportamiento lineal, pero a medida que aumenta la deformación angular, se reduce el módulo de corte y simultáneamente aumenta el amortiguamiento, permitiendo representar la energía disipada por el suelo [4].

La curva de degradación del módulo es la variación del módulo secante dividido para el módulo de corte máximo en función de la deformación angular, esta facilita la representación del comportamiento no lineal del suelo, puesto que solo es necesario conocer el módulo de corte inicial para obtener el módulo de corte a cualquier nivel de deformación [5].

Se utilizaron curvas de degradación del módulo cortante y relación de amortiguamiento, ilustradas en las Figuras 2 y 3, con sus respectivos autores.



Figura 2. Curvas de degradación de G/Gmáx empleado en el análisis.



A falta de ensayos dinámicos, las curvas de degradación y relación de amortiguamiento pertenecientes a los estratos I, II, III corresponden a datos obtenidos en ensayos realizados en la investigación de "Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito" [6], puesto que estos estratos tienen similitudes en sus propiedades dinámicas como es la velocidad de onda de corte.

Mientras que, las curvas de los estratos IV y V, fueron escogidas de la literatura técnica disponible en el software Midas GTS NX, en función de las características geofísicas y geomecánicas, dichas curvas fueron seleccionadas de acuerdo al tipo de suelo y sus características.

#### 2.1.3. Sismo de entrada

De acuerdo a la investigación "Espectros sísmicos de riesgo uniforme para verificar desempeño estructural en países sudamericanos" [7], se planteó el análisis ante cuatro eventos sísmicos: frecuente, ocasional, raro y muy raro, Figura 4.

Sismo	Vida Útil T	Probabilidad de Excedencia P*	Período medio de Retorno, tr	Tasa Anual de excedencia, p <sub>1</sub>
Frecuente	30 años	50%	43 años	0.02310
Ocasional	50 años	50%	72 años	0.01386
Raro	50 años	10%	475 años	0.00211
Muy raro	100	10%	970 años	0.00105
-	años			

Figura 4. Sismos recomendados por el Comité VISION 2000

En la norma NEC 2015 capítulo Peligro Sísmico, se presenta la curva de peligro sísmico para la ciudad de Quito. En función de esta se obtuvo la máxima aceleración normalizada (z) para cuatro niveles de categorías, identificadas en la tabla 3.

Tabla 3. Aceleraciones máximas de los niveles de sismos

Categoría	Tasa Anual de excedencia	Aceleración máxima (g)
Frecuente	0.02310	0.17
Ocasional	0.01386	0.23
Raro	0.00211	0.42
Muy raro	0.00105	0.51

Tomando como referencia un estudio de desagregación de amenaza sísmica, se identifica la magnitud y distancia epicentral de los sismos con mayor incidencia en la ciudad de Quito. Estableciendo que la mayor contribución corresponde a sismos de distancia epicentral de 30 km, y magnitud de 6.25 Mw, cuyas fuentes son fallas inversas [8].

De acuerdo con lo descrito anteriormente, en la investigación se usó una base de datos de 10 sismos por cada nivel de peligrosidad sísmica, obteniendo 40 sismos en total. Para encontrar dichos acelerogramas se empleó la red sísmica de California Peer Ground Motion Database, los cuales tienen las características antes expuestas incluyendo la velocidad de 750 m/s, a fin de representar que el sismo se desarrolla en el basamento sísmico.

#### 1) Escalamiento

Se empleó un escalado lineal, el cual consiste en multiplicar por un factor constante a todo el acelerograma antes corregido por línea base y filtrado por ruido, con la utilización del programa SeismoSignal. En la ecuación (1) se expresa el factor de escala:

l	Valor de aceleración máxima de acuerdo a cada categoría	(1)
к —	Valor de aceleración máxima del resgistro filtrado	(1)

Para optimizar el tiempo de ejecución y análisis de resultados se utilizó un solo acelerograma por categoría de amenaza sísmica para los modelos bi y tridimensionales. La elección de este acelerograma se definió a partir de los 10 espectros de respuesta de aceleración en superficie por categoría obtenidos del modelo de campo libre, a partir de los cuales se produjo un espectro resultante promedio de diseño, (exceptuando los sismos que están fuera de la media +/- la desviación estándar). Se eligió el acelerograma cuyo espectro sea similar al promedio (ver anexo 3).

#### 2.2. Análisis lineal equivalente

Es un método que simplifica el proceso de ARS, debido a que estima la respuesta cíclica no lineal del suelo en el dominio de la frecuencia. Sin ser un análisis no lineal da resultados lo suficientemente óptimos para su uso frecuente, simplificando las complejas propiedades no

lineales del suelo en propiedades lineales equivalente [9].

**2.2.1. Modelo de campo libre** [10]

El análisis de campo libre encuentra la respuesta del suelo debido a las ondas de corte transmitidas verticalmente, el análisis consta de múltiples estratos que son infinitos en la dirección horizontal, cada estrato es homogéneo y se supone que tiene propiedades de materiales isotrópicos.

Al considerar en la presente investigación la propagación vertical de las ondas SH (Onda de corte en dirección Horizontal), se presenta la ecuación de movimiento, correspondiente a (2).

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2\xi G \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} (2)$$

Donde:

- u: Desplazamiento horizontal
- $\rho$ : Densidad del suelo
- G: Módulo de corte
- $\xi$ : Relación de amortiguamiento histerética



Figura 5. Modelo de análisis de Campo libre.

La ecuación (3) corresponde a la solución de una señal armónica. Midas GTS NX para cada

señal armónica hace un ARS y luego superpone efectos.

$$u_m(x_m, w) = A_m(w)e^{ik_m x_m} + B_m(w)e^{-ik_m x_m} (3)$$

Donde:

 $u_m(x_m, w)$ : Desplazamiento horizontal en el dominio de la frecuencia.

 $k_m$ : Número de onda

 $A_m$ : Coeficiente de respuesta de onda elásticas transferidas hacia arriba

 $B_m$ : Coeficiente de respuesta de onda elásticas transferidas hacia abajo

#### 2.2.2. Modelo lineal equivalente 2D (LE)

Para el proceso de análisis se toman valores estimados de módulo de corte y amortiguamiento y se calcula la deformación efectiva para cada estrato diferente. Mediante un proceso iterativo se calculan las deformaciones, las propiedades dinámicas son reevaluadas y las deformaciones son actualizadas en base a las nuevas propiedades hasta tener una consistencia con el nivel de deformaciones alcanzadas por cada capa [11].

Se recomienda que las propiedades deban ser calculadas para un coeficiente de deformación efectivo de 0.65 en cada capa.

$$\gamma_{reff} = \alpha \gamma_{m \acute{a} x} (4)$$

Donde:

 $\gamma_{reff}$ : Deformación efectiva  $\gamma_{máx}$ : Deformación máxima  $\alpha$ : Coeficiente de deformación efectiva

#### 2.3. Análisis lineal Tiempo – Historia 2D

Los modelos bi y tridimensionales utilizan los modelos constitutivos estáticos de MC y HS. Para este análisis, el suelo estratificado horizontalmente es discretizado en masas concentradas, permitiendo al software Midas GTS NX resolver la siguiente ecuación:

$$[M]{\ddot{u}} + [C]{\dot{u}} + [K]{u} = [M]{I}{\ddot{u}}_{q} (5)$$

Donde:

[*M*]: Matriz de masas

[*C*]: Matriz de amortiguamiento

 $\{\ddot{u}\}$ : Vector de aceleración nodal

 $\{\dot{u}\}$ : Vector de velocidad relativa nodal

 $\{u\}$ : Vector de desplazamiento relativo nodal

*{I}*: Vector unitario

 $\ddot{u}_q$ : Aceleración en la base

#### 2.3.1. Amortiguamiento de Rayleigh

Es un amortiguamiento viscoso que simula en un modelo numérico la radiación perdida de una onda en el infinito. El amortiguamiento se impone a la velocidad de onda obtenida en los nodos del borde de la malla de elementos finitos de los modelos numéricos. La velocidad de onda en dichos nodos se amortigua considerando un modelo en función de la matriz de masa y de rigidez [12].

$$C = \propto_i^e M_I^e + \beta_i^e k_I^e + B \ (6)$$

Donde:

 $\propto_j^e$ : Coeficiente de amortiguación proporcional a la masa para el j-ésimo elemento

 $\beta_j^e$ : Coeficiente de amortiguación proporcional de rigidez para j-ésimo elemento

 $M_I^e$ : Matriz de masa del j-ésimo elemento

 $k_I^e$ : Matriz de rigidez del j-ésimo elemento

*B*: Matriz de amortiguación debido al elemento de amortiguación (amortiguador)

#### 2.4. Análisis no lineal Tiempo – Historia 3D

Un estudio lineal equivalente no puede representar con precisión el comportamiento no lineal del suelo al ser inducido a altas deformaciones, debido a que toma una deformación referencial para encontrar sus resultados, además no desarrolla la variación de la curva esfuerzo cortante – deformación angular del suelo, a diferencia de un modelo no lineal que analiza cada una de las deformaciones que ocurren durante el sismo [13].

Un análisis no lineal utiliza un modelo discreto en el dominio del tiempo y ecuaciones constitutivas, es por ello que el modelo tridimensional resuelve la ecuación 5, además puede utilizar el amortiguamiento de Rayleigh, ecuación (6).

#### 2.5. Modelos Constitutivos

La modelación constitutiva es una herramienta matemática utilizada para simular el comportamiento del suelo cuando es sometido a estados de esfuerzos que generan deformación [14].

#### **2.5.1.** Modelo Mohr Coulomb (MC)

El modelo constitutivo Mohr Coulomb es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo. Es un modelo elastoplástico desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla Mohr Coulomb [15].

Este modelo no representa el comportamiento elastoplástico progresivo, sino que es un modelo elástico y luego plástico [16].







Figura 7. Formulación básica del modelo elastoplástico perfecto.

La formulación del modelo exige cinco parámetros básicos de entrada:

Tabla 4. Parámetros del modelo Mohr-Coulomb

Parámetro	Descripción	Origen
с	Cohesión	Ensayo Triaxial
$\varphi$	Ángulo de fricción	Ensayo Triaxial
$\psi$	Ángulo de dilatancia	$\psi = \varphi - 30^*$
Е	Módulo de Young	Ensayo Triaxial
υ	Relación de Poisson	Bibliografía

\*Aproximación al ángulo de dilatancia.

Dado que los ingenieros están por lo general familiarizados con los cinco parámetros mencionados, Mohr Coulomb es el modelo básico más utilizado en la práctica geotécnica a pesar de su incapacidad para reproducir adecuadamente los cambios de rigidez del suelo situaciones donde modelar diferentes y trayectorias de esfuerzos son experimentadas [17].

#### 2.5.2. Modelo Hardening Soil (HS)

Es un modelo avanzado capaz de simular el comportamiento de varios tipos de suelos tanto cohesivos como granulares, este modelo es considerado como una aproximación de segundo orden. La idea básica para la formulación del modelo es la relación hiperbólica entre la deformación axial y el esfuerzo desviador [18].

Los parámetros básicos del modelo constitutivo son:

Tabla 5: Parámetros del modelo de Hardening Soil

Parámetro	Descripción	Origen
с	Cohesión	Ensayo triaxial
arphi	Ángulo de fricción	Ensayo triaxial
$\psi$	Ángulo de dilatancia	$\psi = \varphi - 30^*$
Е	Módulo de Young	Ensayo triaxial
υ	Relación de Poisson	Bibliografía
E <sub>50</sub> <sup>ref</sup>	Rigidez secante en ensayos triaxiales al 50%	$E_{50}^{ref} = \frac{E * \left(2 - R_f\right)}{2}$
E <sub>oed</sub> ref	Rigidez tangente para carga edométrica	$E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$
E <sub>ur</sub> ref	Rigidez en descarga – carga	$3 * E_{50}^{ref}$

m	Potencia de la dependencia tensional de la rigidez	$0.5 \le m \le 1$ (0.5 para suelo rígido, 1 para suelo blando)
$\sigma_{ref}$	Esfuerzo de referencia	100 kPa
K <sub>o</sub> <sup>nc</sup>	Coeficiente de reposo del suelo	$K_o = 1 - \sin \varphi * *$
$R_f$	Coeficiente de rotura	0,9 por defecto
/		

\*Aproximación al ángulo de dilatancia.

\*\*Suelos gruesos normalmente consolidados.

#### 2.5.3. Modelo Ramberg – Osgood (RO)

Ramberg - Osgood resulta lo suficientemente general para englobar el comportamiento lineal y no lineal.

A la vez dicho modelo permite mediante el ajuste de tres parámetros, una variación del módulo cortante con respecto a la amplitud de la deformación angular.

Los parámetros que requiere dicho modelo son:

Tabla 6. Parámetros del modelo Ramberg - Osgood

Parámetro	Descripción	Origen
$G_{m lpha x}$	Módulo de corte	Geofísica
$\gamma_r$	Deformación de referencia	$\gamma_r = \frac{\tau_{mx}}{G_{m\acute{a}x}}$
$h_{m lpha x}$	Máximo amortiguamiento	0.05*

\*Recomendación Manual GTS NX (Anexo 6)

Para determinar el esfuerzo cortante máximo se utilizó la fórmula (10):

$$\tau_{mx} = \left\{ \left[ \frac{(1+k_0)}{2} \sigma_v \sin \Phi + C \cos \Phi \right]^2 - \left[ \frac{(1+k_0)}{2} \sigma_v \right]^2 \right\}^{0.5} (10)$$

Donde:

 $τ_{mx}$ : Esfuerzo cortante máximo (kg/cm<sup>2</sup>)  $σ_v$ : Esfuerzo vertical efectivo (kg/cm<sup>2</sup>)  $k_o$ : Coeficiente de esfuerzo lateral en reposo C: Cohesión (kg/cm<sup>2</sup>) Φ: Ángulo de fricción interna

Para los estratos SM y SP la segunda parte de la ecuación fue omitida puesto que, proporcionaba resultados negativos de esfuerzos cortantes máximos. Se corroboró la validez de estos resultados utilizando la ecuación básica de Mohr Coulomb obteniendo valores similares.

#### 2.6. Desarrollo de los modelos

#### 2.6.1. Modelo de campo libre

Este modelo necesita las propiedades geotécnicas del sitio de análisis, curvas de degradación del módulo cortante v de amortiguamiento, así como la velocidad de onda de corte. Además, se ingresa para cada estrato un valor de amortiguamiento inicial obtenido de las curvas de amortiguamiento respectivas. Para el control del movimiento de entrada se selecciona la opción Within, parámetro que establece la propagación de ondas desde el basamento sísmico hacia la superficie.

Se utilizó diez sismos de entrada por cada nivel de peligrosidad sísmica con un total de 40 acelerogramas ubicados en el basamento sísmico a la profundidad de 61 m.

En la Figura 8. se observan algunos de los datos de entrada solicitados por el programa.

General Iame	MATE	RIAL				D	) Ground Re ynamic Curv	sponse Parameters re Function	
Detail Pa	ameters —	Б	nput Ground	Material Data by Li	ayer				
No	Depth (m)	Thickness (m)	Layer No.	Unit Weight (kgf/m^3)	Vs (m/sec)	G0 (kgf/m <sup>*</sup> 2)	H0	Dynamic Curve Type	Output Motio Type
	1 0.5000	0.50000	1	1600.00000	266.200	1155758	0.00240	1:CL	Within
	2 1.0000	0.50000	2	1700.00000	266.200	1228600	0.00240	1:CL	Within
	3 2.0000	1.00000	3	1700.00000	281.400	1372600	0.00240	1:CL	Within
	4 3.0000	1.00000	4	1700.00000	252.600	1105600	0.02500	2:ML	Within
	5 4.0000	1.00000	5	1700.00000	253.600	1115100	0.02500	2:ML	Within
	5.0000	1.00000	6	1700.00000	287.100	1429000	0.02500	2:ML	Within
	7 6.0000	1.00000	7	1700.00000	245.800	1047300	0.02500	2:ML	Within
	B 7.0000	1.00000	8	1700.00000	302.500	1586100	0.02500	2:ML	Within
	9 8.0000	1.00000	9	1700.00000	269.300	1257400	0.02500	2:ML	Within
1	9.0000	1.00000	10	1800.00000	375.500	2588600	0.00240	3:SM	Within
1	1 10.000	1.00000	11	1800.00000	349.100	2236600	0.00240	3:SM	Within
1	2 11.000	1.00000	12	1800.00000	331.900	2021300	0.00240	3:SM	Within

Figura 8. Datos de entrada, modelo de campo libre.

#### 2.6.2. Modelo bidimensional

Los resultados obtenidos en un análisis de elementos finitos, dependen de la forma y tamaño de los elementos que componen la malla (mallado de forma tetraédrica y cuadrangular, con tamaños en un rango de 2.5 - 4 m.), ver Figura 9.

Se emplearon fronteras transmitentes en los bordes laterales de la malla, puesto que, esta condición se aplica para simular la propagación de la onda superficial en toda la columna y sin ser reflejada, mientras que para los modelos HS y MC se ocupó el módulo de reacción de la subrasante aplicado para simular la continuidad del estrato del suelo figurando un resorte, ante la limitación del programa para configurar fronteras transmitentes. Como condiciones de borde en todos los modelos 2D se aplicaron apoyos fijos en la base. Para configurar el movimiento de entrada se ingresa el sismo escalado, aplicado solamente a la dirección "x" para obtener la respuesta en superficie.



Figura 9. Modelo bidimensional de elementos finitos.

Para calibrar y representar un mejor comportamiento de los modelos HS y MC se incluyó el amortiguamiento de Rayleigh, para lo cual fue necesario identificar los periodos fundamentales de vibración de la columna de suelo, obtenidos para los dos porcentajes mayores de participación de masa modal, a través de un análisis de valores propios (eigenvalue).

A partir de lo mencionado se considera a estos modelos como híbridos con un caso de análisis tiempo – historia lineal directo.

#### 2.6.3. Modelo tridimensional

Al igual que los modelos bidimensionales el tamaño y el mallado es importante para la obtención de resultados óptimos (mallado tipo híbrido, con tamaños entre 2.5 y 4 m.), ilustrado en la Figura 10. En la solución del modelo se utiliza métodos de diferencias finitas.





Para los modelos tridimensionales se requiere del uso de señales de entrada en las direcciones "x" y "y", los cuales deben ser escalados por un factor de manera que el sismo combinado en ambas direcciones resulte el valor de la aceleración máxima del sismo.

Las condiciones de borde usadas en el modelo fueron apoyos fijos, representando la continuidad del suelo bajo este límite, además se crearon resortes en la dirección horizontal. En todos los modelos se utilizó el amortiguamiento de Rayleigh.

#### 2.7. Acelerograma sintético

Encontrar acelerogramas que coincidan con las condiciones geológicas y tectónicas no siempre es posible, es por ello que el uso de acelerogramas sintéticos es una alternativa.

El programa que se utilizó para la obtención de acelerogramas sintéticos es el SeismoArtif, el cual requiere el espectro de respuesta normativo NEC 15, sin ser afectado por el factor de amplificación (Fa) para considerar el sismo en roca, además de datos como distancia epicentral, magnitud sísmica, tipo de fuente, amortiguamiento, intervalo del tiempo y aceleración máxima.

A partir de los acelerogramas sintéticos obtenidos se realizó la comparación con los acelerogramas escalados de la PEER.

#### 3. Resultados y Discusión

Se presentan los resultados obtenidos en la investigación:

# **3.1.** Acelerograma sintético y sismo semilla PEER escalado

A continuación, se muestra una tabla comparativa de la característica de cada sismo.

Tabla 7. Características de	acelerograma, categoría frecuente
-----------------------------	-----------------------------------

Características	Acelerograma sintético	Acelerograma PEER escalado	
PGA (g)	0.17	0.17	
PGV (cm/seg)	34.23	7.90	
PGD (cm)	17.62	3.49	
Intensidad de Arias (m/seg)	0.36	0.20	



Figura 11. Comparación de acelerogramas, categoría Frecuente.

Tabla 8. Características de acelerogramas, categoría ocasional

Características	Acelerograma sintético	Acelerograma PEER escalado
PGA (g)	0.23	0.23
PGV (cm/seg)	44.05	4.76
PGD (cm)	14.77	2.08
Intensidad de Arias (m/seg)	0.70	0.10



Tabla 9. Características de acelerogramas, categoría raro

Características	Acelerograma sintético	Acelerograma PEER escalado
PGA (g)	0.42	0.42
PGV (cm/seg)	101.41	19.53
PGD (cm)	66.10	8.63
Intensidad de Arias (m/seg)	2.21	1.21



Figura 13. Comparación de acelerogramas, categoría raro.

Tabla 10. Características de acelerogramas, categoría muy raro

Acelerograma sintético	Acelerograma PEER escalado
0.51	0.51
90.22	36.45
77.15	663.27
3.45	1.45
	Acelerograma sintético 0.51 90.22 77.15 3.45



Se realizó un análisis con acelerogramas sintéticos basado en el espectro de diseño de la NEC 2015, sin embargo, se descartó su uso dado que existen diferencias marcadas entre los acelerogramas sintéticos y la PEER. Al utilizar los sintéticos se estaría sobreestimando la señal, debido a que, este acelerograma corresponde a todas las envolventes del espectro de respuesta, es decir, la meseta del espectro normativo representa la combinación de los picos de varios acelerogramas, es por ello que, se trabajó con el sismo de la PEER escalado, porque corresponde a una sola señal sísmica.

#### 3.2. Perfil de aceleraciones de modelos 1D, 2D, 3D por categoría de amenaza sísmica

Para la comparación de los modelos se consideró a HS y MC bi y tridimensionales como híbridos.





Figura 15. Perfiles de aceleraciones de las categorías frecuente, ocasional, raro y muy raro, respectivamente.

**Modelo campo libre:** En las cuatro categorías de sismos, la mayor amplificación se encuentra en los primeros estratos, mientras que, para las profundidades de 12 m. a 25 m. existe de – amplificación, se asume la hipótesis de que es producto de la variabilidad de la velocidad de corte a esas profundidades. En las categorías frecuente, raro y muy raro existe amplificación desde la profundidad 30 m. a 50 m., pero después se de – amplifica. En cambio, en la categoría ocasional en esas profundidades presenta intervalos de amplificación y de – amplificación.

**Modelos 2D:** LE en las cuatro categorías presentan una propagación de onda similar al de campo libre, donde la mayor amplificación existe en los primeros 15 metros. Mientras que, HS y

MC en las categorías frecuente y raro mantiene constante la aceleración desde la profundidad 25 m. a 60 m., además, existe de – amplificación cuando alcanza la superficie con respecto a la aceleración que tenía unos metros por debajo, lo que sugiere la limitación de estos modelos para representar el efecto de sitio, puesto que, ese estrato corresponde a suelos blandos y frente a la acción sísmica debe existir una amplificación.

**Modelos 3D:** En las categorías frecuente y ocasional, en los modelos HS y MC se evidencia excesiva amplificación en la superficie en comparación con RO, pero en las categorías raro y muy raro dichos modelos tiene aceleraciones elevadas en la superficie, sin embargo, en raro difieren en su tendencia, puesto que, HS y MC presentan cambios bruscos de aceleraciones a ciertas profundidades y RO tiene solamente amplificación de las aceleraciones y en muy raro RO y MC se amplifican entre las profundidades de 10 m. a 20m. y HS se de – amplifica.

Por lo antes expuesto se desestiman los los modelos HS resultados de V MC, comparándose solamente los modelos de campo libre, 2D LE y 3D RO. Cabe recalcar que RO en categorías raro y muy raro las tienen aceleraciones en superficie mayores que el de campo libre y 2D LE. En la siguiente tabla se muestran las aceleraciones en superficie de dichos modelos:

Tabla 11. Aceleraciones en superficie

Análisis / Categoría	Frecuente (g)	Ocasional (g)	Raro (g)	Muy raro (g)
1D	0.463	0.437	0.814	0.959
2D LE	0.326	0.335	0.526	0.586
3D RO	0.698	0.618	1.811	1.694

#### 3.3. Resultados de desplazamiento en superficie de modelos 1D, 2D, 3D por categoría de amenaza sísmica

En la siguiente tabla se presentan los desplazamientos máximos obtenidos.

Tabla 12. Desplazamientos en superficie

Modelo /	Frecuente	Ocasional	Raro	Muy raro
Categoría	(m)	(m)	(m)	(m)
1D	0.0391	0.0088	0.0970	0.3733
2D LE	0.0381	0.0063	0.0876	0.2381
2D MC	0.0351	0.0219	0.0873	6.632
2D HS	0.0349	0.0220	0.0863	6.632
3D RO	0.0293	0.0187	0.0750	4.675
3D MC	0.0365	0.0155	0.0840	4.689
3D HS	0.0282	0.0156	0.0697	4.689

Para la categoría frecuente el menor desplazamiento se observa en el modelo 3D HS mientras que, el máximo desplazamiento corresponde al de campo libre.

En la categoría ocasional el desplazamiento mínimo corresponde al 2D LE y el máximo se encuentra en el 2D HS.

En la categoría raro, el mínimo desplazamiento corresponde a 3D de HS y el máximo desplazamiento al de campo libre.

Finalmente, para la categoría muy raro se obtuvieron desplazamientos en superficie excesivos, dado que al comparar la frecuencia de vibración de la columna de suelo se aproximó a la frecuencia predominante del sismo en superficie, efecto que tiende a la resonancia. El mínimo desplazamiento corresponde al 2D LE, y el máximo al 2D HS y 2D MC [19].

#### 3.4. Perfil de deformación angular máxima de modelos 1D, 2D, 3D por categoría de amenaza sísmica

A continuación, se presentan los perfiles de deformaciones angulares.





Figura 16. Perfiles de deformación angular máxima de las categoría frecuente, ocasional, raro y muy raro, respectivamente.

En la figura 16., las mayores deformaciones angulares se presentan en el modelo de campo libre alcanzando valores de  $3x10^{-3}$  y las menores deformaciones angulares se observan en los modelos de HS y MC.

Tabla 13. Límites de aplicabilidad de acuerdo al tipo de análisis [19]

Tipo de Análisis	Deformación angular
lineal	1x10 <sup>-5</sup>
lineal equivalente	5x10 <sup>-3</sup>
no lineal	5x10 <sup>-2</sup>

En base a la tabla 13, los modelos de HS y MC quedan excluidos, puesto que sus resultados son superiores al rango de su aplicabilidad, mientras que el lineal equivalente y el no lineal es cercano al límite aplicable, pero no lo supera.

# 3.5. Acelerogramas en superficie de modelos 1D, 2D, 3D por categoría de amenaza sísmica

A continuación, se presentan los acelerogramas en superficie en dirección "x".







Figura 17. Comparación de acelerogramas de superficie de las categorías frecuente, ocasional, raro y muy raro, respectivamente.

En la categoría frecuente se evidencia que los modelos con mayores aceleraciones son: 3D MC, 2D LE y el de campo libre, teniendo sus máximas amplificaciones entre los 6 y 8 segundos.

En la categoría ocasional los modelos con mayor amplitud de aceleración son: 3D MC, 2D MC y el de campo libre, teniendo las máximas amplificaciones entre los 5 a 10 segundos.

En la categoría raro los modelos 3D HS, 2D MC y campo libre son los que tienen mayor amplitud de aceleración entre los 6 y 8 segundos.

Finalmente, en la categoría muy raro los modelos 3D RO, 2D MC y campo libre tienen sus mayores aceleraciones en los primeros segundos.

#### 3.6. Espectro de respuesta de modelos 1D, 2D, 3D por categoría de amenaza sísmica

Se presentan los espectros de respuesta de aceleración en superficie.



Para las categorías frecuente y raro se evidencia que la mayor respuesta espectral de aceleración se encuentra en los modelos 3D, donde el modelo MC alcanza su máxima

respuesta en un periodo de 0.3 segundos, mientras que, HS tiene su máxima aceleración en un periodo cercano a 0.2 segundos y RO tiene su máxima respuesta alrededor de 0.4 segundos. De los modelos 2D la mayor respuesta corresponde a MC, y alcanzándolas entre los periodos de 0.1 a 0.3 segundos. El modelo de campo libre alcanza su máxima respuesta a los 0.2 segundos.

Para la categoría ocasional, se evidencia que la mayor respuesta espectral de aceleración se encuentra en el modelo 3D MC para un periodo de 0.3 segundos. Los modelos de 3D HS, 2D LE y campo libre tienen sus máximas respuestas en el periodo de 0.2 segundos. El modelo RO alcanza su máxima respuesta en un periodo cercano a 0.4 segundos. El modelo 2D MC incrementa aproximadamente 2 veces la respuesta de 2D HS para un periodo de 0.1 segundos.

En la categoría muy raro la mayor respuesta espectral de aceleración se obtiene para 2D MC y 3D HS en los periodos de 0.1 y 0.2 segundos respectivamente. Los modelos RO y 3D MC tienen similar forma de espectro, pero el de mayor aceleración es este último. El modelo 2D HS registra su mayor respuesta en un periodo de 0.1 segundos. Los modelos de campo libre y 2D LE tienen una forma espectral parecida, sin menor respuesta se puede embargo, la contemplar en 2D LE para un periodo de 0.25 segundos.

#### 3.7. Espectros de respuesta de aceleraciones del modelo de campo libre para la categoría Raro con la NEC 2015 y CEC 2000



El valor máximo del espectro de respuesta promedio del modelo 1D es cercano a la meseta del espectro de la normativa CEC 2000, mientras que la meseta del espectro de la NEC 2015 es 2.3 veces menor que el espectro promedio.

Además, al comparar los espectros de respuesta del análisis lineal equivalente, se evidencia que tienen similares picos para periodos entre 0.2 y 0.3 segundos. El modelo RO tiene las mayores aceleraciones entre los períodos de 0.2 a 0.4 segundos.

#### 4. Conclusiones

De acuerdo a los resultados presentados se concluye que:

Los acelerogramas de la base de datos PEER en comparación con los sintéticos difieren en gran medida, puesto que los acelerogramas del PEER corresponden a señales de un solo sismo, que se escalan a valores de aceleración requeridos sin perder la similitud del contenido frecuencial del sismo original, mientras que los acelerogramas sintéticos sobreestiman la señal al originarse a partir de valores normativos (NEC 2015), considerando todas las envolventes que representan el espectro, es por ello que se empleó los acelerogramas escalados de PEER.

La forma del perfil de las aceleraciones máximas no depende solamente de la velocidad de onda de corte, sino también del contenido frecuencial del sismo.

Es coherente obtener valores de aceleraciones y desplazamientos considerables en la superficie, si la frecuencia dominante del sismo coincide con la frecuencia de vibración de la columna del suelo, como sucedió en la categoría muy raro.

El modelo 3D RO al ser un análisis no lineal puede ser aplicado para grandes deformaciones angulares, no obstante, los resultados de los análisis lineales equivalentes también presentaron grandes niveles de deformación angular, alcanzando en las categorías raro y muy raro valores cercanos al límite de su aplicabilidad (5X10^-3). Los modelos de MC y HS al ser modelos elastoplásticos y por ende mantener el módulo de corte constante a lo largo de todo el análisis, pierden su capacidad de analizar deformaciones angulares mayores e ignoran la degradación del módulo de corte del suelo.

Con el ARS realizado se demostró el efecto de los suelos blandos en el sector de la UPS en la parroquia Chillogallo, donde se obtuvieron considerables amplificaciones en términos de aceleración máxima en superficie con respecto a la aceleración en roca. De acuerdo con el perfil de aceleraciones (categoría raro) para el modelo de campo libre se amplificó 2 veces, 2D LE 1.3 veces y para 3D RO 4.3 veces.

Al usar el espectro normalizado de la NEC 15, se puede subestimar el efecto del sitio, puesto que, la norma generaliza valores, en función de "z" y la Vs<sub>30</sub>, mientras que, con los resultados obtenidos en el ARS 3D RO se obtendrían valores de aceleración y espectros más representativos en el sitio.

El 3D RO, fue realizado con un amortiguamiento máximo de 5%, sin embargo, para futuras investigaciones se podría evaluar con valores mayores de amortiguamiento correspondientes a cada estrato de suelo.

#### Referencias

- [1] Universidad de los Andes. «Microzonificación sísmica y estudios generales de riesgos sísmicos para las ciudades de Palmira, Tulúa y Buga,» Centro de estudios sobre desastres y CEDERI. Centro riesgos de Investigación en Materiales y Obras Civiles - CIMOC, Bógota, 2004.
- [2] A. Bustamante Hernan, «Modelaje geoténico por elementos finitos y comprobación instrumenral de la exactitud lograda,» Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela, 2011.
- [3] J. L. Caisapanta Moncayo, «Comparación de dos programas en el

análisis de respuesta de sitio en depósitos con suelos blandos.,» Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2019.

- [4] J. A. Ballesteros Granados, «Análisis del comportamiento en grupos de pilotes ante sismo para el depósitos Lacustre de Bogotá,» Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia, Tunja, 2018.
- [5] D. F. Barrios Carvajal, «Análisis de deformaciones de depósitos de relaves con muros de materia de empréstito sometidos a sismos chilenos,» Universidad de Chile, Chile, 2019.
- [6] J. Valverde, J. Fernández, E. Jiménez, T. Vaca y F. Alarcón, «Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito,» Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, Quito, 2002.
- [7] R. Aguiar Falconí, «Espectros sísmicos de riesgo uniforme para verificar desempeño estructural en países Sudamericanos,» Escuela Politécnica del Ejército, Caracas, 2004.
- [8] H. Parra, M. B. Benito y J. M. Gaspar Escribano, «Seismic hazard assessment in continental Ecuador,» Springer Science+ Business, 2016.
- [9] F. A. Flores, J. C. Ayes, O. Vargas y A. Vázquez, «Análisis de respuesta de sitio: Una comparación practica entre diferentes enfoques dimensionales,» Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, México, 2014.
- [10] Midas GTS NX, «Capítulo: Algorithm,» MidaSoft, 2019.
- [11] J. Soto Huamán, J. E. Alva Hurtado y C. E. Ortiz Salas, «Evaluación de Espectros de Respuesta mediante el Análisis Unidimensional de Respuesta de Sitio en la Ciudad de Lima,» COBRAMSEG, Brasil, 2018.
- [12] M. Suárez Alfaro, «Modelos de Comportamiento dinámico para arcillas

de Bogotá,» Universidad de los Andes, Bogotá, 2004.

- [13] C. Miragall y A. Samartín, «Respuesta sísmica de suelos estratificados en régimen no lineal,» Revista de Obras Públicas, 1983.
- [14] Universidad de los Andes, «Revisión e implementación de modelos constitutivos para suelos,» Universidad de los Andes, Bogotá, 2011.
- [15] A. Nieto Leal, J. F. Camacho Tauta y E. F. Ruiz Blanco, «Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos,» Revista de ingenierías de la Universidad de Medellin, Medellin, 2009.
- [16] C. Vintimilla Avila, «Análisis de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los suelos del Sector las Orquideas de la Ciudad de Cuenca, Ecuador,» Universidad

Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, 2016.

- [17] D. Arguello Romero y L. Calderón Goyeneche, «Estado del arte del uso del ensayo SPT-T y las correlaciones obtenidas para los parámetros del modelo Mohr Coulomb,» Universidad Católica de Colombia. Facultad Ingenieria Civil, Bogota D.C., 2014.
- [18] C. Gomez de Santos, «Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compastados, respuesta a cargas estáticas y dinámicas,» Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2019.
- [19] Midas GTS NX, «Análisis lineal equivalente 2D,» MidaSoft, 2019.

#### Anexos



Registros sísmicos obtenidos del PEER



#### Anexo 2.

Registros sísmicos escalados obtenidos del PEER









#### Anexo 3.

Espectro de respuesta de cada categoría de amenaza sísmica del modelo campo libre







#### Anexo 4.

Valores de módulo de elasticidad empleados en la investigación

Profundidad	E(Kg/cm <sup>2</sup> )	SUCS	
0.50	3025.60		
1.00	3025.60	CL	
2.00	3404.40		
3.00	2942.50		
4.00	2960.20		
5.00	3279.30	М	
6.00	2576.10	MIL	
7.00	4055.30		
8.00	3415.70		
9.00	6229.30		
10.00	5777.30		
11.00	5686.20		
12.00	5864.20		
13.00	7565.50	SM	
14.00	7570.50	51/1	
15.00	7226.50		
16.00	7139.50		
17.00	6454.20		
18.00	6673.10		
19.00	8784.20		
20.00	9257.90	SD	
21.00	9355.00	SP	
22.00	9087.30		
23.00	9493.35		
24.00	9909.60		
25.00	10334.56		
26.00	10768.25		
27.00	11210.63	SM	
28.00	11661.71	5171	
29.00	12121.46		
30.00	12589.87		
31.00	13066.94		
32.00	13552.64		

Tabla 14. Valores de módulo de elasticidad empleados en la investigación

33.00	14046.97	
34.00	14549.91	
35.00	15061.45	
36.00	15581.57	
37.00	16110.28	
38.00	16647.54	
39.00	17193.35	
40.00	17747.69	
41.00	18310.56	
42.00	18881.94	
43.00	19461.82	
44.00	20050.18	
45.00	20647.01	
46.00	21252.31	
47.00	21866.05	
48.00	22488.22	
49.00	23118.82	
50.00	23757.82	
51.00	24405.22	
52.00	25061.00	
53.00	25725.15	
54.00	26397.66	
55.00	27078.51	
56.00	27767.70	
57.00	28465.20	
58.00	29171.01	
59.00	29885.12	
60.00	30607.50	
61.00	30607.50	

#### Anexo 5.

Comparación de resultados del modelo de campo libre con acelerograma sintético y acelerograma de la PEER escalado, para categoría raro.



#### Comentario:

Se puede observar que las aceleraciones en superficie son muy cercanas para el modelo con acelerograma escalado de la PEER y con el sintético, sin embargo, durante la propagación de las ondas se evidencian cambios marcados, como sucede desde la profundidad 20 m a 10 m, en la cual el acelerograma de PEER se de – amplifica en lugar de amplificarse.

El espectro resultante del modelo de campo libre que uso el acelerograma de la Peer, presenta un período de 0.2 segundos, para la máxima aceleración, mientras que el sintético tiene un periodo cercano a 0.7 segundos. para la máxima aceleración.

#### Anexo 6.

Recomendación del software Midas GTS NX, con respecto al amortiguamiento máximo del modelo Ramberg Osgood.

Parameter	Description	Reference
G <sub>o</sub>	Initial Shear Modulus	
Υr	Reference Strain	$\gamma_r = \frac{\tau}{Go}$
h <sub>max</sub>	Maximum Damping	0.05 (for soil), $h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}$
Shear Only	Check : Consider shear modulus for each direction separately (Gxy, Gyz, Gzx) Uncheck : Consider equivalent shear modulus (Geq)	

#### Comentario:

El manual del software Midas GTS NX, recomienda la utilización de un amortiguamiento máximo para el modelo de Ramberg Osgood del 5%, sin embargo, para futuras investigaciones se podría analizar este modelo con valores de amortiguamiento mayores correspondientes al tipo de suelo en la columna estratigráfica, esperando resultados de aceleraciones más pequeños de los obtenidos.