



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**VALIDACIÓN DE PROGRAMAS 1D (DEEPSOIL, CYCLIC 1D Y MIDAS GTS-
NX), QUE REALIZAN ESTUDIOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS CON EL
USO DE LA BASE DE DATOS SISMOLÓGICA DE JAPÓN (NIED), EN
“COLUMNAS DE SUELOS” INSTRUMENTADAS EN EL TOPE Y LA BASE
DEL DEPÓSITO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero e Ingeniera Civil

AUTORES: Luis Fernando Pilaguano Toaquiza
Pamela Mishel Reinoso Lema

TUTOR: José Domingo Alviar Malabet

Quito-Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Luis Fernando Pilaguano Toaquiza con documento de identificación N° 0503135915 y Pamela Mishel Reinoso Lema con documento de identificación N° 1725909384; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 07 de febrero del 2022

Atentamente,



Luis Fernando Pilaguano Toaquiza
0503135915



Pamela Mishel Reinoso Lema
1725909384

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Luis Fernando Pilaguano Toaquiza con documento de identificación N° 0503135915 y Pamela Mishel Reinoso Lema con documento de identificación N° 1725909384; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Validación de programas 1D (Deepsoil, Cyclic 1D y Midas GTS-NX), que realizan estudios de propagación de ondas con el uso de la base de datos sismológica de Japón (NIED), en “columnas de suelos” instrumentadas en el tope y la base del depósito”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero e Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 07 de febrero del 2022

Atentamente,



Luis Fernando Pilaguano Toaquiza

0503135915



Pamela Mishel Reinoso Lema

1725909384

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Domingo Alviar Malabet con documento de identificación N° 1757837602, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: VALIDACIÓN DE PROGRAMAS 1D (DEEPSOIL, CYCLIC 1D Y MIDAS GTS-NX), QUE REALIZAN ESTUDIOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS CON EL USO DE LA BASE DE DATOS SISMOLÓGICA DE JAPÓN (NIED), EN “COLUMNAS DE SUELOS” INSTRUMENTADAS EN EL TOPE Y LA BASE DEL DEPÓSITO, realizado por Luis Fernando Pilaguano Toaquiza con documento de identificación N° 0503135915 y Pamela Mishel Reinoso Lema con documento de identificación N° 1725909384, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 07 de febrero del 2022

Atentamente,



Ing. José Domingo Alviar Malabet, PhD

1757837602

VALIDACIÓN DE PROGRAMAS 1D (DEEPSOIL, CYCLIC 1D Y MIDAS GTS-NX), QUE REALIZAN ESTUDIOS DE PROPAGACIÓN DE ONDAS CON EL USO DE LA BASE DE DATOS SISMOLÓGICA DE JAPÓN (NIED), EN “COLUMNAS DE SUELOS” INSTRUMENTADAS EN EL TOPE Y LA BASE DEL DEPÓSITO

VALIDATION OF 1D PROGRAMS (DEEPSOIL, CYCLIC 1D AND MIDAS GTS-NX), WHICH PERFORM WAVE PROPAGATION STUDIES USING THE JAPANESE SEISMOLOGICAL DATABASE (NIED), ON "SOIL COLUMNS" INSTRUMENTED AT THE TOP AND BASE OF THE LITOLOGICAL PROFILE

Luis Pilaguano-Toaquiza¹, Pamela Reinoso-Lema²

Resumen

Este trabajo de investigación se basa en el estudio de propagación de ondas mediante el uso de los programas 1D Deepsoil, Cyclic, y Midas GTS NX en estaciones japonesas instrumentadas en el tope y la base del depósito, a fin de seleccionar el programa que mejor se adapte a las respuestas espectrales medidas en superficie. Para ello se ha caracterizado el perfil litológico atendiendo a la información bibliográfica consultada. Se hace una clasificación de las columnas litológicas de la red sismológica en NIED-JAPÓN (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience). De las estaciones en las cuales se tenía información geotécnica y registros sismológicos se optó por seleccionar 21 estaciones: 5 superficiales, 7 intermedias y 9 profundas, con aceleraciones instrumentales

comprendidas entre 0.1 a 0.2 g, 0.2 a 0.3 g, 0.3 a 0.4 g, 0.4 a 0.5 g y 0.5 a 0.7 g, con distancias epicentrales cercanas, menores a 10 Km, intermedias, de 40 a 60 Km y lejanas, mayores o iguales a 100 Km.

Para la verificación de los programas se utilizó la comparación del modelado de espectros de respuesta obtenidos en superficie con los registros instrumentales reales ocurridos en el tope del depósito. Con la finalidad de que este estudio contemple en presentar un análisis de respuesta de sitio y encontrar el mejor programa 1D (Deepsoil, Cyclic y Midas GTS-NX) de simulación de ondas que sea de fácil manejo y acceso en sus datos, que ayudarán para el diseño de futuras estructuras y recomendaciones en su planeación y proyección.

¹ Departamento de Ingeniería Civil-Universidad Politécnica Salesiana-Quito, Ecuador
Autor para correspondencia: lpilaguanot@est.ups.edu.ec

² Departamento de Ingeniería Civil-Universidad Politécnica Salesiana-Quito, Ecuador
Autor para correspondencia: preinosol@est.ups.edu.ec

Pilaguano y Reinoso/ Validación De Programas 1d (Deepsoil, Cyclic 1d Y Midas Gts-Nx), Que Realizan Estudios De Propagación De Ondas Con El Uso De La Base De Datos Sismológica De Japón (NIED), En “Columnas De Suelos” Instrumentadas En El Tope Y La Base Del Depósito

Palabras clave: Validación de programas, Propagación de ondas, Deepsoil, Midas GTS-NX, Respuesta de sitio, Espectros de Respuesta, Espectro suavizado, Estación sismológica instrumentada.

Abstract

This research work is based on the study of wave propagation using the 1D Deepsoil, Cyclic, and Midas GTS NX programs in Japanese stations instrumented at the top and base of the profile, in order to select the program that best suits the spectral responses measured at the surface. For this purpose, the lithological profile has been characterized according to the bibliographic information consulted. A classification of the lithological columns of the seismological network in NIED-JAPAN (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience) is made. Of the stations for which geotechnical information and seismological records were available, 21 stations were selected: 5 shallow, 7 intermediate and 9 deep, with instrumental accelerations between 0.1 to 0.2 g, 0.2 to 0.3 g, 0.3 to 0.4 g, 0.4 to 0.5 g and 0.5 to 0.7 g, with epicentral distances of less than 10 km, intermediate distances, of 40 to 60 km and distant distances, greater than or equal to 100 km.

For the verification of the programs, we used the comparison of the modeling of response spectra obtained at surface with the real instrumental records that occurred at the top of the deposit. The purpose of this study is to present a site response analysis and to find the best 1D program (Deepsoil, Cyclic and Midas GTS-NX) for wave simulation that is easy to use and access in its data, which will help for the design of future structures and recommendations in its planning and projection.

Keywords: Program validation, Wave propagation, Deepsoil, Midas GTS-NX, Site

response, Response spectra, Smoothed spectra, Instrumented seismic station.

1. INTRODUCCIÓN

Japón está ubicada en la zona móvil del circum-Pacífico donde ocurren constantemente actividades sísmicas y volcánicas. Aunque el país cubre solamente un área equivalente al 0,25% del área de tierra del planeta, el número de terremotos y la distribución de volcanes activos es muy alta. Además, debido a condiciones geográficas, topográficas y meteorológicas el país está sujeto a desastres frecuentes como tifones, lluvias torrenciales, tormentas de nieve y terremotos.

Para la determinación de la demanda sísmica en estructuras es necesario conocer el efecto local de sitio. Hay dos parámetros que son usados generalmente para cuantificar este efecto. Estos parámetros son: el período predominante del suelo y la velocidad de propagación de la onda de corte en los 30 primeros metros superficiales, como es en el caso de la norma Norteamericana, Europea y Chilena actualmente [1].

Este trabajo de investigación se evalúan las formas espectrales de respuesta, realizando comparaciones de la simulación obtenida con 3 programas 1D con respecto a las componentes horizontales medidas en estaciones de la NIED-JAPÓN (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience). El cual consiste en analizar un sistema de matriz vertical como se muestra en la figura 1, que consta de sismógrafos de superficie y de fondo de pozo en el mismo lugar. Se conoce los datos del tipo de suelo con profundidad y el perfil de velocidad de las ondas S/P [2].

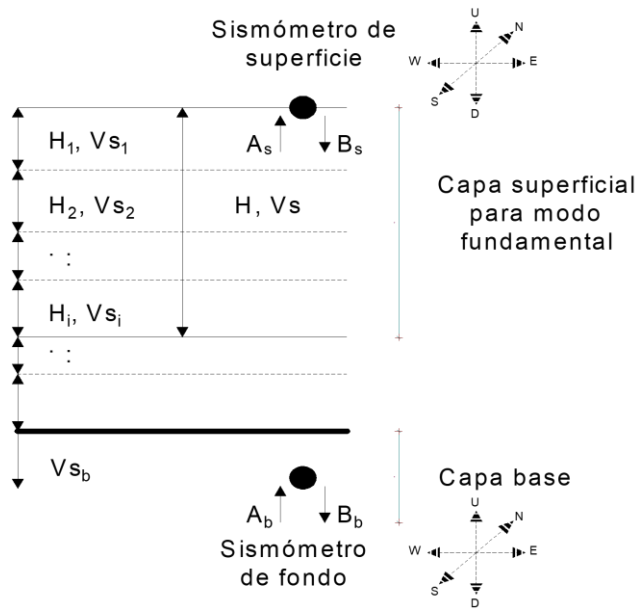


Figura 1. Matriz vertical KiK-net que consta de un par de sismógrafos tridimensionales en la superficie del suelo y la capa base [2].

Para el análisis unidimensional de un depósito de suelo, los parámetros dinámicos de los estratos son muy importantes en el cálculo de la respuesta del perfil de suelo que se desea analizar. Para la realización del presente estudio se cuenta con la referencia [3], donde se presentan las curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento asignados a los tipos de suelos existentes en Japón, los cuales fueron obtenidos de diferentes fuentes experimentales consultadas en la literatura, por tipo de suelo, que mejor simularan la respuesta espectral medida en superficie, luego de realizar estudios de propagación o de respuesta de sitio en arreglos instrumentados en el tope y base del depósito en la red sismológica japonesa.

Las curvas de degradación y amortiguamiento utilizados en el presente estudio se muestran en el Anexo (B, B1) [4], los cuales están influenciadas por el tipo de suelo, confinamiento y plasticidad.

El valor establecido de magnitudes para este estudio está comprendido entre 6 a 8,5, el cual plantea procesar una gran cantidad de datos,

para determinar los espectros de respuesta de cada estación derivados del estudio de propagación de ondas, con parámetros geomecánicos que caracterizan al depósito de suelo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Objetivo

Comparar los espectros de respuesta de las componentes horizontales, en columnas estratigráficas de suelos de Japón, instrumentados en el tope y base del depósito, empleando los programas unidimensionales Deepsoil, Cyclic 1d y Midas GTS-NX, con el fin de seleccionar cuál de ellos realiza la mejor simulación de propagación de ondas, optando por valores de aceleración máxima similares al mapa de zonificación sísmica de Ecuador, para tener una herramienta que permita realizar estudios de respuesta de sitio.

2.2. Metodología

A partir de la base de datos de la NIED, se hace una clasificación con respecto a las estaciones sismológicas ver Anexo (A), de acuerdo con los registros proporcionados para la generación de los espectros de respuesta. Para proceder a clasificar la serie de los registros instrumentales de las bases de datos usadas es necesario conocer cómo varían las velocidades de onda de corte con la profundidad desde la superficie del terreno hasta el nivel de roca ($V_s \geq 650$ m/s) [3], con el fin de lograr una tipificación de las columnas de suelo de las estaciones sismográficas anteriormente mencionadas, en esta clasificación se hace referencia a las siguientes profundidades de cada estrato por encima de la roca; superficial (S) ≤ 8 m de profundidad, intermedia (I) $8 < I \leq 30$ m, profundas (P) > 30 m de profundidad.

La clasificación por compacidad o consistencia que usa Elgamal [5] para las

columnas instrumentales de suelo se presenta en la siguiente Tabla 1 y la figura 2:

Tabla 1. Tipificación de las columnas de suelo por compacidad o consistencia

Compacidad o Consistencia	Símbolo	Vs (m/s)
Suelta o Blanda	S	≤ 185
Media	M	185 - 250
Dura o Densa	D	≥ 250

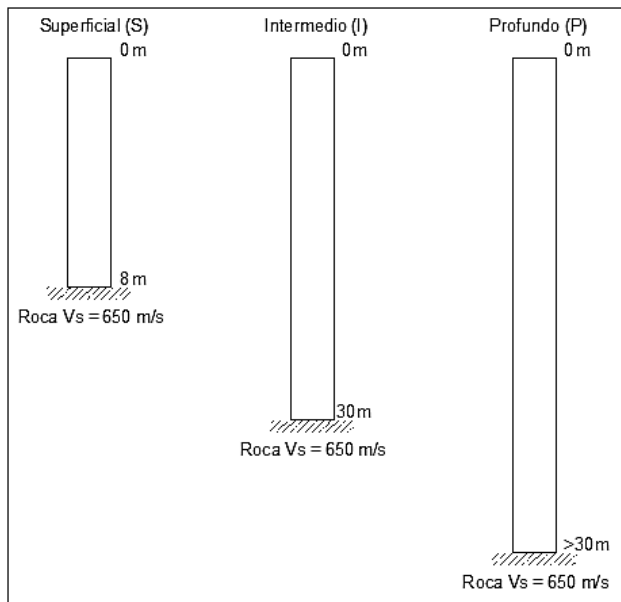


Figura 2. Tipificación de las columnas de suelo por profundidad. Elaborado por: Los Autores.

- SS: Columna de suelo superficial suelta.
- SM: Columna de suelo superficial media.
- SD: Columna de suelo superficial densa.
- IS: Columna de suelo intermedia suelta
- IM: Columna de suelo intermedia media.
- ID: Columna de suelo intermedia densa.
- PS: Columna de suelo profunda suelta.
- PM: Columna de suelo profunda media.
- PD: Columna de suelo profunda densa.

2.2.1. Corrección por línea base

Para el ingreso de los registros sísmicos en cada uno de los programas mencionados anteriormente, se realizó la corrección instrumental por línea base, el principal beneficio de aplicar la corrección a los registros es obtener con la mayor precisión posible la autenticidad de la aceleración, velocidad y desplazamiento del movimiento del suelo causado por el sismo [6], esto puede ser por fallas en la nivelación de los sismógrafos, o porque hace que los datos se desvíen de la línea base generada por el sistema de registro.

2.2.2. Obtención de parámetros geomecánicos y dinámicos

Para obtener los pesos específicos de los estratos de suelo de cada perfil litológico, se utilizó correlaciones con respecto al número de golpes (N) y la velocidad de onda de corte (Vs).

De las ecuaciones propuestas por [7]- [8]- [9], para determinar el número de golpes (N) con respecto a la velocidad de onda de corte en suelos granulares.

$$V_s = 61.4 * N^{0.5} \quad (1)$$

$$V_s = 22 * N^{0.77} \quad (2)$$

$$V_s = 130 + 7.5 * N \quad (3)$$

Tabla 2. Consistencia y parámetros de resistencia relacionados para suelos granulares según el Eurocódigo 1997-3/B1 [DYS 01]. Traducido [10].

Consistencia	$\gamma \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \right)$	$N \left(\frac{\text{blows}}{\text{ft}} \right)$	$\phi' \left(^\circ \right)$	$\phi' \left(^\circ \right)$	E (MPa)
Muy suelto	11-16	0-4	26-30	20-32	< 10
Suelto	14-18	5-10	28-34	32-35	10-20
Medio	17-20	11-24	30-40	35-37	20-30
Denso	17-22	25-50	33-46	37-40	30-60
Muy Denso	20-23	50-100	40-50	40-42	60-90

De las ecuaciones 1, 2 y 3, se determinó el valor del número de golpes N, se estableció el promedio de las ecuaciones para cada estrato,

posteriormente de la tabla N° 2, se interpoló los datos de la columna número de golpes N, para así obtener la consistencia y el peso específico del suelo de cada estrato.

Ecuación para determinar el Peso Específico en Suelos Cohesivos [11].

$$V_s = 44 * N^{0.48} \quad (4)$$

Tabla 3. Consistencia y parámetros de resistencia relacionados para suelos cohesivos según la AASHTO [SAB 02, p.110]. Traducido [10].

Consistencia	$\gamma \left(\frac{kN}{m^3} \right)$	Su (kPa)	N $\left(\frac{blows}{ft} \right)$
Muy suave	< 14	0-25	0-1
Suave	14-16	25-50	2-4
Medio	16-18	50-100	5-8
Rígido	18-20	100-200	9-15
Muy rígido	20-22	200-400	16-30
Duro	22-23	>400	30-250

De la ecuación 4 se determinó el valor del número de golpes N, posteriormente de la tabla N° 3, se interpoló los datos de la columna número de golpes N, para así obtener la consistencia y el peso específico del suelo de cada estrato.

Peso específico o peso unitario de la roca

Tabla 4. Valores típicos del peso específico de diferentes tipos de rocas [12, p. 128].

Tipo de Roca	Rango de Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Rocas Ígneas		
Granito	2516-2809	2667
Andesita	2200-2350	2350
Cuarzo	2680-2960	2806
Toba	1900-2300	2300
Diabasa	2900	2900
Basalto	2700-2900	2900
Roca Arcillosa	2200	2200
Rocas Sedimentarias		
Arenisca	2170-2700	2700
Lutitas	2060-2660	2660
Arena	1920-1930	1930
Rocas Metamórficas		
Gneis	2590-3060	2703
Esquisto	2700-3030	2790
Pizarra	2720-2840	2810

Coefficiente de Poisson

Para la mayoría de las rocas, el coeficiente de Poisson varía entre 0,25 y 0,33. Se presenta la siguiente tabla 5 con valores para diferentes tipos de roca.

Tabla 5. Valores típicos de coeficientes de Poisson de diferentes tipos de rocas [12, p. 164]

Tipos de Roca	Coefficiente de Poisson (v)
Rocas Ígneas	
Granito	0.1-0.4
Andesita	0.23-0.32
Cuarzo	0.33
Toba	0.24-0.29
Diabasa	0.28
Basalto	0.19-0.38
Roca Arcillosa	0.33
Rocas Sedimentarias	
Arenisca	0.1-0.4
Lutita	0.25-0.29
Arena	0.33
Rocas Metamórficas	
Gneis	0.08-0.40
Esquisto	0.01-0.31
Pizarra	0.33

Coefficiente de Presión Lateral del Suelo En Reposo (K₀) [13].

$$K_0 = \frac{v}{(1-v)} \quad (5)$$

Donde v es el coeficiente de Poisson.

Módulo de cizallamiento máximo [14].

$$G_0 = \rho * V_s^2 \quad (6)$$

Donde ρ es la densidad del suelo y V_s es la velocidad de las ondas sísmicas.

3. Aplicación de los programas 1D

3.1. Uso del programa DeepSoil

El estudio de respuesta de sitio del programa DeepSoil se basa en el desarrollo de diferentes análisis como: análisis de dominio de tiempo no lineal 1D (No Lineal) y análisis de

dominio de tiempo lineal 1D de frecuencia (Equivalente Lineal).

3.1.1. Frecuencia máxima en Deepsoil

De acuerdo con el Manual de Deepsoil, se recomienda que la frecuencia de vibración de cada capa de suelos debe tener un mínimo de 30 Hz, se muestra como ejemplo en la figura 3 de la estación EHMH02 de este mismo estudio. Para que la frecuencia tienda a tener valores más altos se debe disminuir el espesor de cada capa.

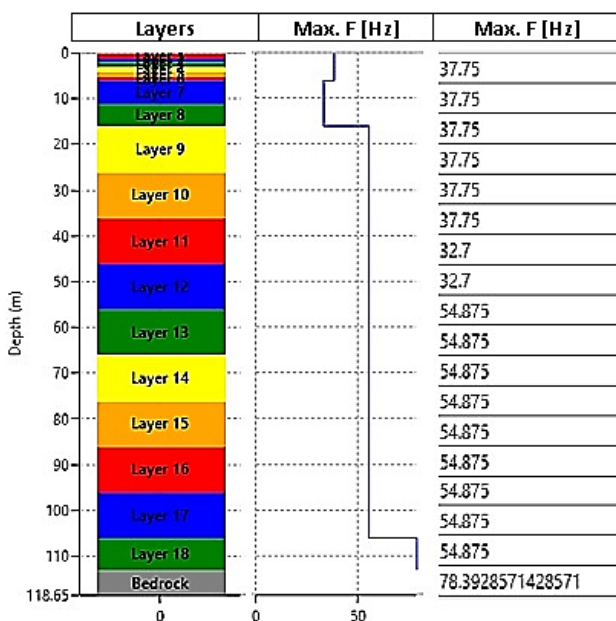


Figura 3. Perfil de frecuencia máxima correspondiente a la estación EHMH02 (NIED). Elaborado por: Los Autores.

3.2. Uso del programa Cyclic 1D

El estudio de respuesta de sitio del programa Cyclic 1D es un programa de elementos finitos No Lineal en el que se puede simular los distintos modelos con respecto a la deformación permanente y amortiguamiento.

Para tener un análisis más detallado, la profundidad de cada perfil se lo divide para el máximo número de elementos que hay en el programa.

3.3. Uso del programa Midas GTS-NX

MIDAS GTS-NX considera el estudio no lineal 1D en el análisis de campo libre, que puede llevar mucho tiempo para sistemas no lineales complejos porque se realizan cálculos repetidos, en donde podemos encontrar la respuesta del suelo frente a una carga sísmica aplicada, la aceleración del suelo, la tensión cortante y la tensión con la profundidad.

3.4. Proceso de la investigación

En cada uno de los programas, para el análisis de respuesta de sitio se tomaron dos tipos de registro de aceleración, el primero es un registro medido en superficie y el segundo medido en pozo. Atendiendo a los parámetros geo-mecánicos previamente indicados en el punto 2.2.2., la columna de suelo fue modelada desde la profundidad donde se ubica el sismógrafo de pozo hasta la superficie. En cada una de las columnas, fue aplicada en la base del depósito el registro de aceleraciones medido, lo cual permitió hacer la simulación de propagación de ondas para comparar el espectro de respuesta derivado de la simulación, con el espectro de respuesta obtenido en superficie en la estación sismológica.












4. Resultados y discusión

Con los datos extraídos de cada programa 1d, se elaboraron gráficas que relacionan las aceleraciones espectrales (g) con el periodo (s), conjuntamente con los espectros de respuesta obtenidos con los registros de la NIED.

A partir de la combinación de los 46 registros de sitio seleccionados para el análisis, las cuales fueron introducidas en cada modelo de acuerdo con las velocidades de onda de corte (V_s) y la profundidad desde la superficie del terreno hasta el nivel de roca ($V_s \geq 650$ m/s), se obtuvieron como resultado 276 gráficas en total de espectros de respuesta del suelo en roca, superficie, no lineal y equivalente lineal.

De las cuales se realizó el promedio de los resultados, obteniendo 21 gráficas finales (superficiales, intermedias y profundas), con rango de aceleración (menor a 0.15 g, 0.15 g a 0.30 g y mayor a 0.30 g) en cada tipo de suelo.

Posteriormente, para representar de mejor manera la respuesta espectral, se realiza los espectros suavizados en superficie y los resultados finales de cada programa, con el objetivo de comparar el ajuste de los espectros de respuesta a partir de los parámetros empleados en cada programa.

- | | | |
|---|---------------|--|
|  | E.R. POZO | Espectro de Respuesta de Pozo. |
|  | E.R. EST.SUP. | Espectro de Respuesta de Superficie, en Estación Japonesa. |
|  | E.R. DS-EQL | Espectro de Respuesta Deepsoil Equivalente Lineal. |
|  | E.R. DS-NOL | Espectro de Respuesta Deepsoil No Lineal. |
|  | E.R. CY-NOL | Espectro de Respuesta Cyclic No Lineal. |
|  | E.R. MI-NOL | Espectro de Respuesta Midas GTX-NS No Lineal. |
|  | E.S. EST.SUP. | Espectro Suavizado de Superficie, en Estación Japonesa. |
|  | E.S. DS-EQL | Espectro Suavizado Deepsoil Equivalente Lineal. |
|  | E.S. DS-NOL | Espectro Suavizado Deepsoil No Lineal. |
|  | E.S. CY-NOL | Espectro Suavizado Cyclic No Lineal. |
|  | E.S. MI-NOL | Espectro Suavizado Midas GTX-NS No Lineal. |

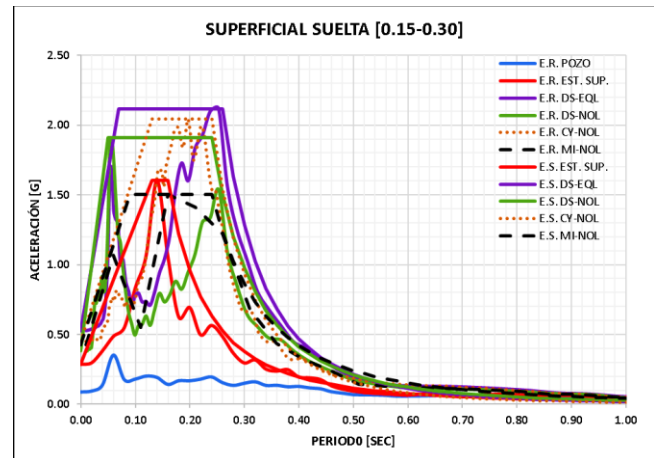


Figura 5. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (0.15-0.30g). Tipo de perfil SS.

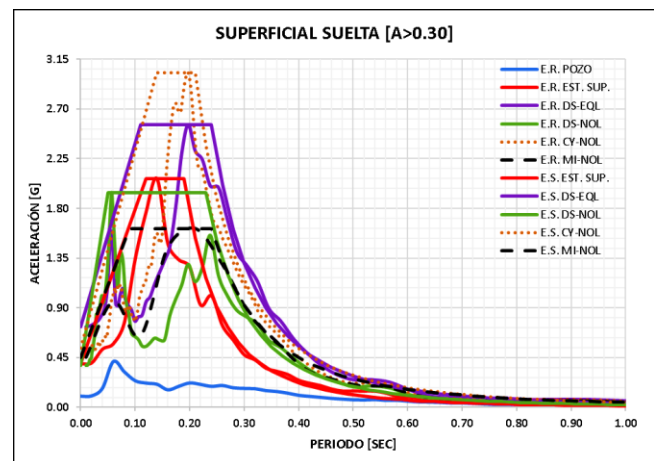


Figura 6. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (> 0.30g). Tipo de perfil SS.

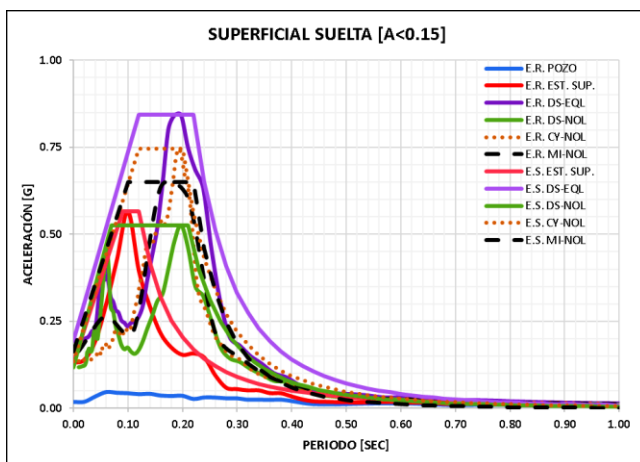


Figura 4. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (< 0.15g). Tipo de perfil SS.

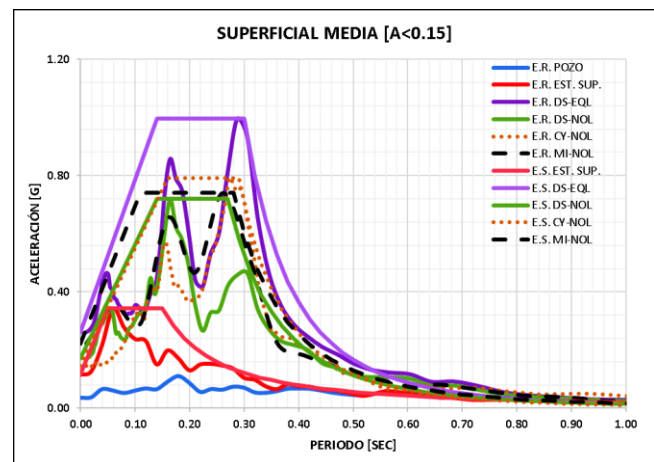


Figura 7. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (< 0.15g). Tipo de perfil SM.

Pilaguano y Reinoso/ Validación De Programas 1d (Deepsoil, Cyclic 1d Y Midas Gts-Nx), Que Realizan Estudios De Propagación De Ondas Con El Uso De La Base De Datos Sismológica De Japón (NIED), En “Columnas De Suelos” Instrumentadas En El Tope Y La Base Del Depósito

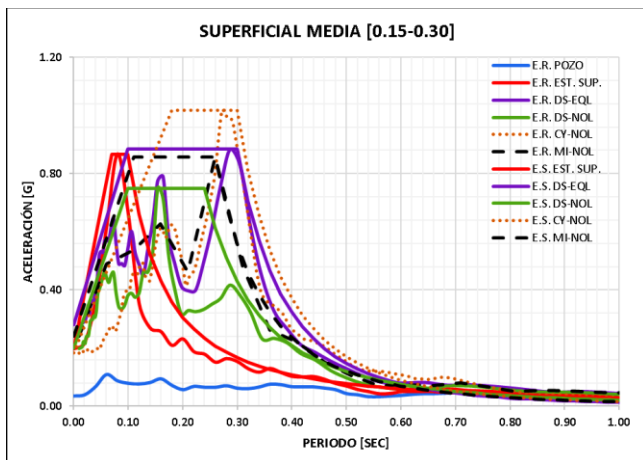


Figura 8. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (0.15-0.30g). Tipo de perfil SM.

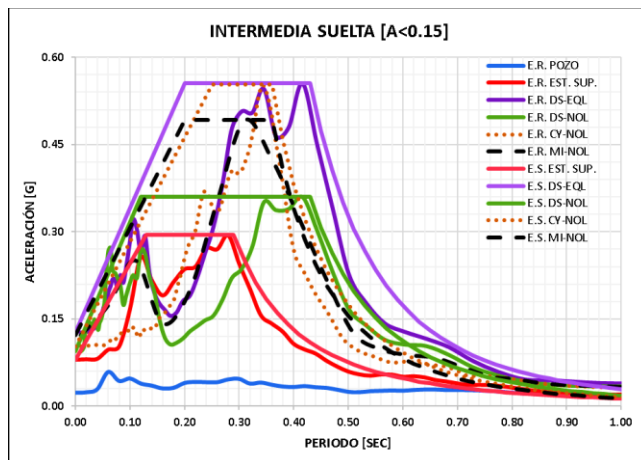


Figura 11. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (< 0.15g). Tipo de perfil IS.

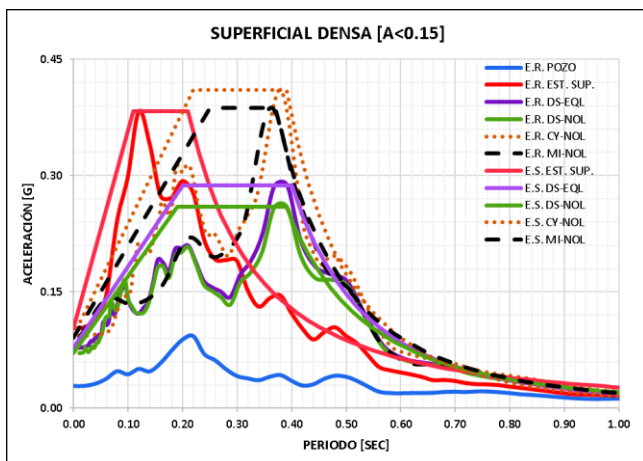


Figura 9. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (< 0.15g). Tipo de perfil SD.

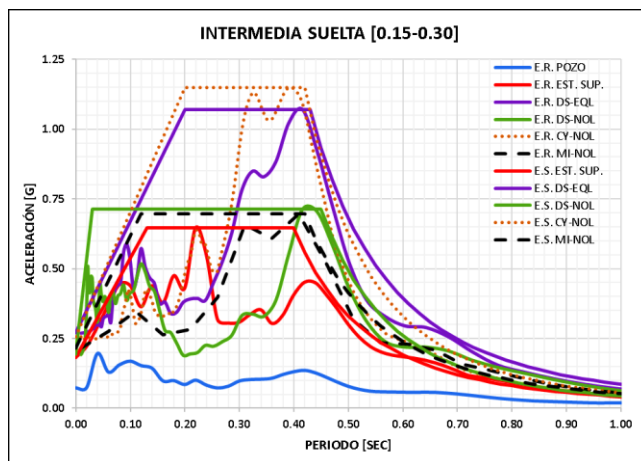


Figura 12. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (0.15-0.30g). Tipo de perfil IS.

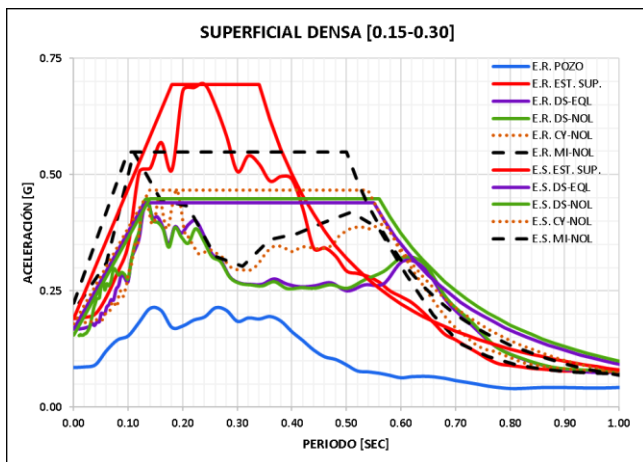


Figura 10. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (0.15-0.30g). Tipo de perfil SD.

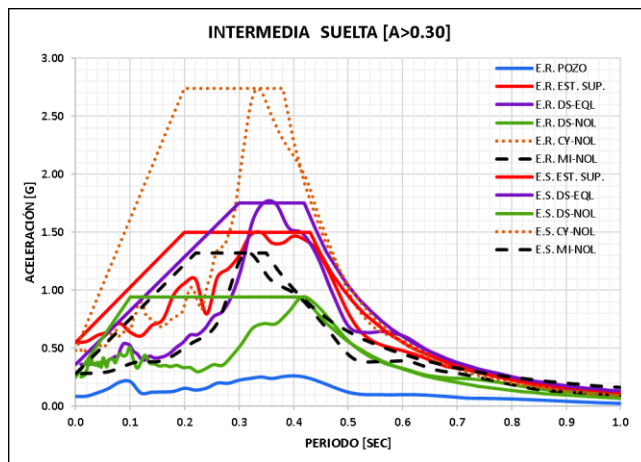


Figura 13. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (>0.30g). Tipo de perfil IS.

Pilaguano y Reinoso/ Validación De Programas 1d (Deepsoil, Cyclic 1d Y Midas Gts-Nx), Que Realizan Estudios De Propagación De Ondas Con El Uso De La Base De Datos Sismológica De Japón (NIED), En “Columnas De Suelos” Instrumentadas En El Tope Y La Base Del Depósito

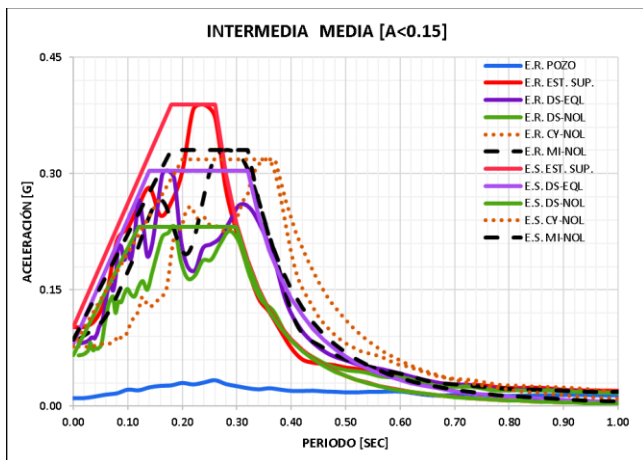


Figura 14. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración ($< 0.15g$). Tipo de perfil IM.

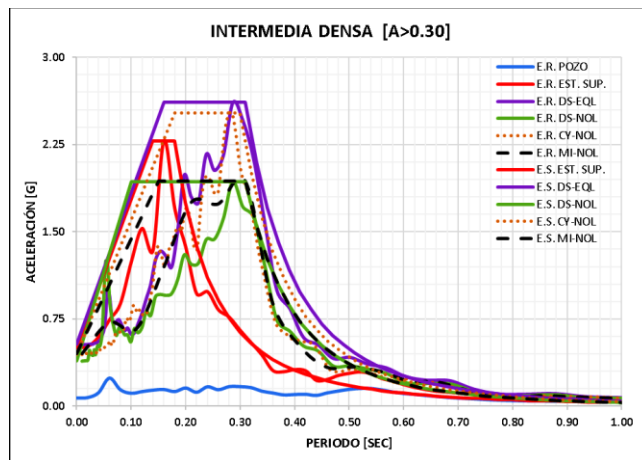


Figura 17. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración ($> 0.30g$). Tipo de perfil ID.

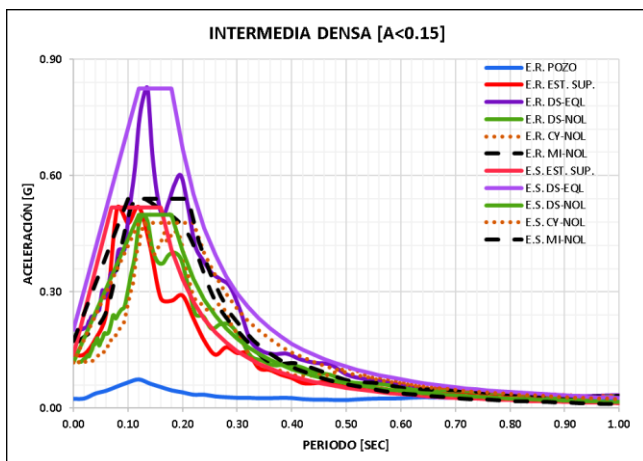


Figura 15. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración ($< 0.15g$). Tipo de perfil ID.

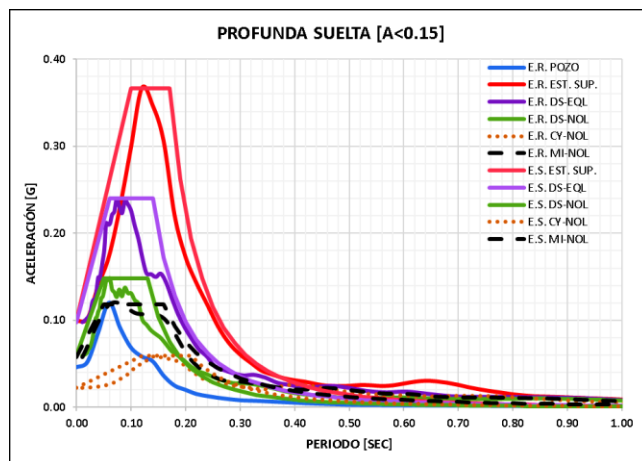


Figura 18. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración ($< 0.15g$). Tipo de perfil PS.

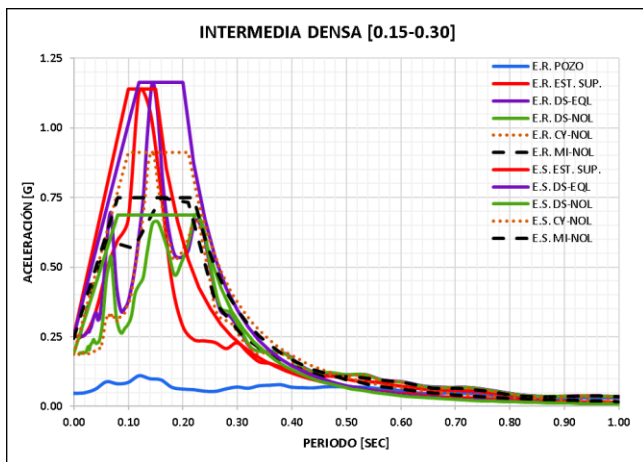


Figura 16. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración ($0.15-0.30g$). Tipo de perfil ID.

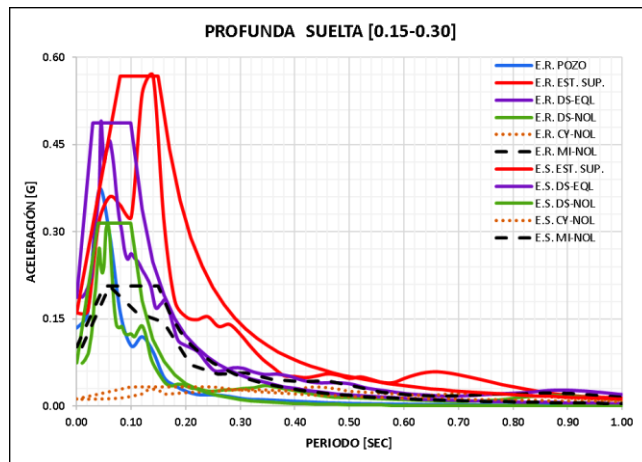


Figura 19. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración ($0.15-0.30g$). Tipo de perfil PS.

Pilaguano y Reinoso/ Validación De Programas 1d (Deepsoil, Cyclic 1d Y Midas Gts-Nx), Que Realizan Estudios De Propagación De Ondas Con El Uso De La Base De Datos Sismológica De Japón (NIED), En “Columnas De Suelos” Instrumentadas En El Tope Y La Base Del Depósito

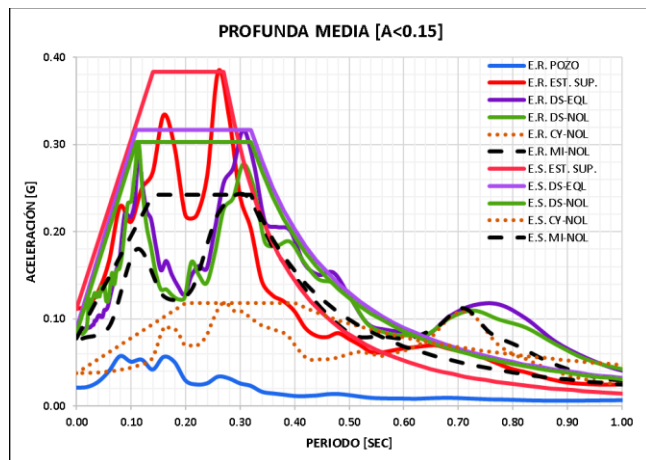


Figura 20. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (< 0.15g). Tipo de perfil PM.

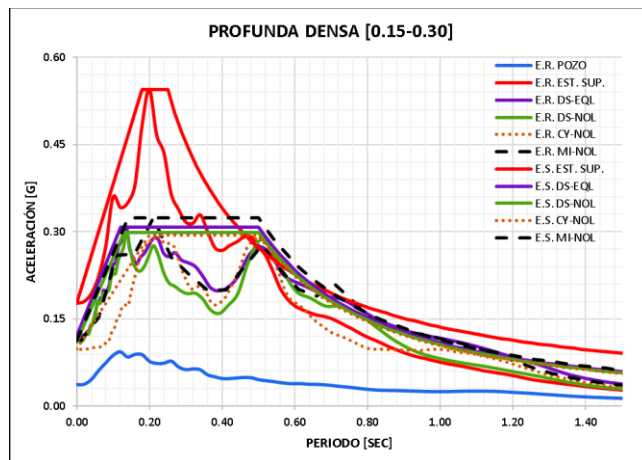


Figura 23. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (0.15-0.30g). Tipo de perfil PD.

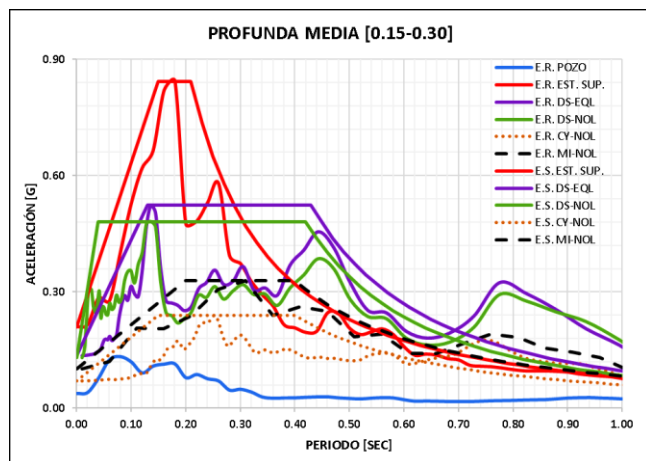


Figura 21. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (0.15-0.30g). Tipo de perfil PM.

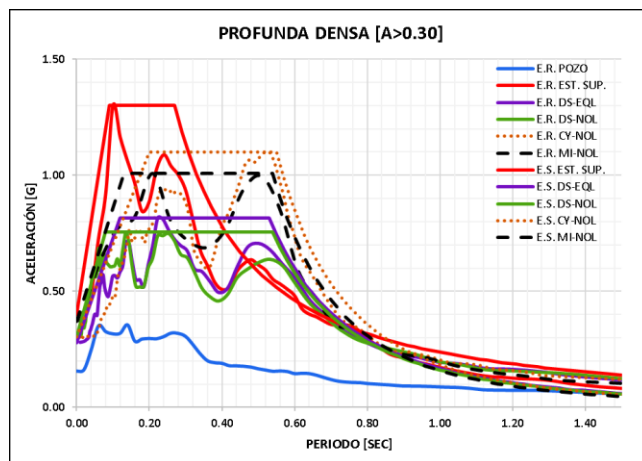


Figura 24. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (> 0.30g). Tipo de perfil PD.

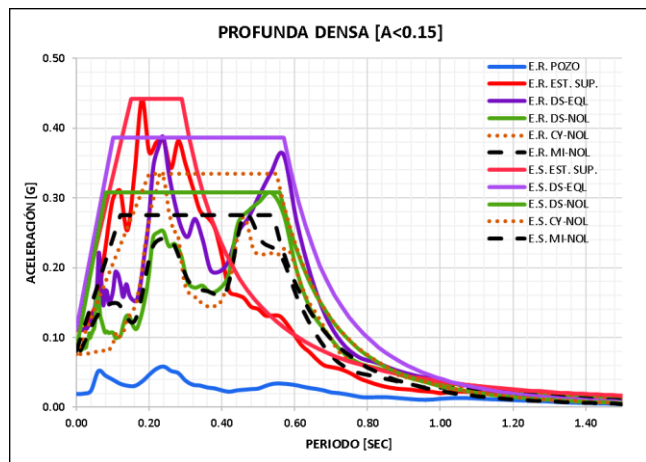


Figura 22. Comparación de espectros de respuesta y espectros suavizados, con aceleración (< 0.15g). Tipo de perfil PD.

Tabla 6. Resultado final en porcentaje de efectividad de cada programa.

Clasificación de Gráficas						
Tipo de suelo	Aceleración	Programas				
		Deepsoil No Lineal	Deepsoil Equi. Lineal	Cyclic	Midas GTS-NX	Ninguno
Superficial Suelta	< 0.15g	1				
Superficial Suelta	0.15g-0.30g				1	
Superficial Suelta	>0.30 g	1				
Superficial Media	< 0.15g	-----	-----	-----	-----	Sobreestimada
Superficial Media	0.15g-0.30g		1		1	
Superficial Densa	< 0.15g			1	1	
Superficial Densa	0.15g-0.30g				1	
Intermedia Suelta	< 0.15g	1				
Intermedia Suelta	0.15g-0.30g	1			1	
Intermedia Suelta	>0.30 g		1		1	
Intermedia Media	< 0.15g		1	1	1	
Intermedia Densa	< 0.15g	1		1	1	
Intermedia Densa	0.15g-0.30g		1			
Intermedia Densa	>0.30 g	1	1	1	1	
Profunda Suelta	< 0.15g	-----	-----	-----	-----	Subestimada
Profunda Suelta	0.15g-0.30g		1			
Profunda Media	< 0.15g	1	1			
Profunda Media	0.15g-0.30g	-----	-----	-----	-----	Subestimada
Profunda Densa	< 0.15g		1			
Profunda Densa	0.15g-0.30g	-----	-----	-----	-----	Subestimada
Profunda Densa	>0.30 g			1	1	
Total		7	8	5	10	30
Porcentaje (%)		23	27	17	33	

Elaborado por: Los autores

- 1 Programa que mejor simula el espectro de respuesta obtenido de la estación en superficie.
- Ninguno de los programas simula el espectro de respuesta obtenido de la estación en superficie.

Haciendo una comparación entre los espectros de respuesta que se derivan de la simulación con respecto a los medidos en las estaciones sismológicas se destacan los siguientes aspectos:

De color morado se puede observar al espectro de respuesta del análisis realizado (Deepsoil- equivalente lineal), de color verde el

espectro de respuesta (Deepsoil- No lineal), de color naranja el espectro de respuesta (Cyclic 1D- No lineal) y de color negro el espectro de respuesta (Midas GTS-NX). Donde, al realizar las simulaciones se generan las amplificaciones y deamplificaciones a largo del perfil, haciendo que las datas originales de superficie queden por encima o debajo con respecto al espectro de simulación.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 7, para los suelos superficiales, intermedios y profundos se puede apreciar que el programa Midas GTS-NX con un porcentaje del 33 % y el programa Deepsoil equivalente lineal

Pilaguano y Reinoso/ Validación De Programas 1d (Deepsoil, Cyclic 1d Y Midas Gts-Nx), Que Realizan Estudios De Propagación De Ondas Con El Uso De La Base De Datos Sismológica De Japón (NIED), En "Columnas De Suelos" Instrumentadas En El Tope Y La Base Del Depósito

con un porcentaje del 27 %, son los más adecuados, para simular espectros de respuesta, debido a que existe mayor similitud con los espectros de respuesta medidos en la estación.

En el análisis no lineal y equivalente lineal de Deepsoil respectivamente, resultó que el análisis equivalente lineal se encuentra por encima del análisis no lineal, esto quiere decir que el método lineal equivalente muestra amplificaciones mayores a los resultados de los métodos de análisis no lineales debido a una mayor degradación en los parámetros de este último modelo.

Se observa una sobrestimación en las columnas de suelo superficial media, con aceleración menor a 0.15g, de las estaciones HRSH09 Y FKSH07, con estratos de suelo de arena y grava. Es decir, existe una amplificación a lo largo del perfil, haciendo que la data original de superficie quede por debajo del espectro de respuesta derivado de la simulación.

Se observa subestimaciones en las columnas de suelo profunda suelta, con aceleración menor a 0.15g, de las estaciones AICH12 y KYTH05, con estratos de suelo de arena media. Columna de suelo profunda media, con aceleración entre 0.15g-0.30g, de la estación KGWH02, con estrato de suelo de arenas arcillosas. Para las columnas de suelos profunda densa, con aceleración entre 0.15g-0.30g, de las estaciones SZOH35, OKYH01, NIGH12, HYGH01 y HRSH07, con estratos de suelo de arena, grava, guijarro y arcilla. Es decir, existe deamplificaciones a lo largo del perfil, haciendo que la data original de superficie quede por encima del espectro de respuesta derivado de la simulación, esto podría deberse a que las curvas de degradación y amortiguamiento no representan el tipo de suelo presente particularmente en las estaciones o podría existir una calibración errada del sismógrafo en la estación.

5. Conclusiones

Es interesante observar que en la mayoría de los casos los espectros de respuesta obtenidos con los diferentes programas unidimensionales mostraron resultados coherentes con los registrados en las estaciones sismológicas.

Dado los resultados se puede concluir que para el análisis realizado en la presente investigación que Midas GTS-NX y DeepSoil equivalente lineal fueron los programas que más semejanza tuvieron con los espectros de respuesta medidos en las estaciones.

Los programas 1d Midas GTS-NX y DeepSoil pueden ser utilizados para realizar estudios de respuesta de sitio siempre y cuando se cuente con la caracterización dinámica de los suelos y rocas que conforman el perfil litológico.

En algunas estaciones se obtuvieron subestimaciones o sobrestimaciones importantes en los espectros de respuesta con respecto a la medida en la estación, se atribuye este hecho a que las curvas de degradación y amortiguamiento no representan el tipo de suelo presente o ya sea una calibración errada del sismógrafo, por tanto, es recomendable ubicar registros o redes sismológicas instrumentadas en tope y base del depósito donde se conozcan las curvas de degradación y amortiguamiento de cada uno de los estratos a fin de realizar la simulación numérica.

Los picos que se aprecian en cada una de las gráficas espectrales atendiendo al tipo de suelo podrían deberse al efecto de resonancia en el que coinciden el periodo vibración de la columna de suelo con la frecuencia predominante del registro sísmico.

Las aceleraciones espectrales seleccionadas de la base de datos de la NIED se corresponden con los valores del mapa de amenaza sísmica de Ecuador.

Plantear nuevas investigaciones con diferentes registros sísmicos y con distinta base de datos a fin de ampliar la base de datos en los que se cuente con registros en pozo y superficie y se conozcan las curvas de degradación y amortiguamiento de los suelos que conforman el perfil litológico.

6. Recomendaciones

Se recomienda ampliar el número de registros con diferente base de datos, tomando en cuenta varias fuentes de información, donde se analizará el comportamiento y la influencia del suelo, sometidos a diferentes propiedades que permitan mejorar criterios de análisis de respuesta de sitio, con la finalidad de obtener más información de las ondas sísmicas que producen estos eventos, y hacer estudios que aporten al diseño sismo-resistente de las estructuras.

Nuestro país debería contar con una base de datos de registros tanto en pozo como en superficie, además de tener caracterizada la columna de suelo (curvas de degradación y amortiguamiento de cada uno de los estratos) a fin de garantizar tanto la utilización de una metodología apropiada como el correcto análisis de la información.

Cabe indicar que, en el caso de sobreestimación para el tipo de suelo superficial media SM, con aceleración menor a 0.15g, el programa que mejor resultado dio a la simulación con respecto a la data original en superficie es el programa Midas GTS-NX, sin embargo, estuvo muy alejada de la reportada en la estación, donde se muestra una amplificación importante en el espectro de respuesta. Por esta razón, es importante contar con matrices de fondo y pozo y las curvas de degradación y amortiguamiento de los estratos que conforman la columna litológica, a fin de realizar simulaciones y

seleccionar el programa que se adapte mejor en estos casos.

Cabe indicar que, en el caso de subestimación, para los tipos de suelo profunda suelta PS, con aceleración menor a 0.15g, profunda media PM, con aceleración entre 0.15g-0.30g y profunda densa, con aceleración entre 0.15g-0.30g, los programas que mejor simulan los resultados a la simulación con respecto a la data original en superficie son; DeepSoil (equivalente lineal) y Midas GTS-NX, donde se muestra una deamplificación importante en el espectro de respuesta. Por ello, es importante contar con las curvas de degradación y amortiguamiento de los estratos que conforman la columna litológica, además de matrices de fondo y pozo, a fin de realizar simulaciones y seleccionar el programa que se adapte mejor en estos casos.

Pilaguano y Reinoso/ Validación De Programas 1d (Deepsoil, Cyclic 1d Y Midas Gts-Nx), Que Realizan Estudios De Propagación De Ondas Con El Uso De La Base De Datos Sismológica De Japón (NIED), En “Columnas De Suelos” Instrumentadas En El Tope Y La Base Del Depósito

7. Referencias

- [1] D. O. G. Iturriaga, «Generación de espectros de respuesta con sismos chilenos para suelos en función de su período fundamental y nivel de amplificación.» Facultad de ciencias físicas y matemáticas., p. 6, 14 Marzo 2017.
- [2] T. Kokusho y K. Sato, «Surface-to-base amplification evaluated from KiK-net vertical array,» Soil Dynamics and Earthquake Engineering, p. 708, 2008.
- [3] S. L. Kramer , Geotechnical earthquake engineering., New Jersey., Upper Saddle River: Prentice Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series., 1996., p. 653.
- [4] P. Anbazhagan, A. Prabhakaran, H. Madhura, S. S. R. Moustafa y N. S. N. Al-Arifi, «Selection of representative shear modulus reduction and damping curves for rock, gravel and sand sites from the KiK-Net downhole array,» vol. 88, Cairo 11421, Seismology Department, National Research Institute of Astronomy and Geophysics (NRIAG): Springer Science+Business Media B.V. 2017, 17, p. 1741–1768.
- [5] . A. Elgamal, Z. Yang y J. Lu, «Cyclic1D Seismic Ground Response. User’s Manual,» Department of Structural Engineering, May 2015.
- [6] A. K. Chopra, Dynamics of Structures, Cuarta ed., Pearson Educación, 2014.
- [7] H. B. Seed y I. M. Idriss, «Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes,» ASCE National Convention (M0), pp. 81-544, 1981.
- [8] M. Jafari, «North Seismic Zone report from the point of view of the site.,» International Institute Sismology and Earthquake Engineering, 2002.
- [9] R. Kumar, «Estimation of Engineering Properties of Soils from field SPT using random number generation,» Springer, 2016.
- [10] J. C. Verbrugge y C. Schroeder, «Geotechnical Correlations for Soils and Rocks,» vol. 3, 1988.
- [11] U. Dikmen, «Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils,» Journal Of Geophysics And Engineering, 28 January 2009.
- [12] L. I. González de Vallejo, L. Ortuño, C. Oteo y M. Ferrer, Ingeniería Geológica, I. Capella, Ed., Madrid: Pearson Educación, 2002.
- [13] Cyclic1D, «User’s Manual,» May 2015.
- [14] M. Rodríguez Segurado, «Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos,» 2005.
- [15] S. Otani, «Japanese Seismic Design Of High-Rise Reinforced Concrete Buildings An Example Of Performance-Based Design Code And State Of Practices,» 13th World Conference on Earthquake Engineering, August 2004.
- [16] G. N. MIDAS, «GTS NX On-line Manual,» 01 Agosto 2014. [En línea]. Available: [http://manual.midasuser.com/en_common/GTS %20NX/150/GTX.htm](http://manual.midasuser.com/en_common/GTS%20NX/150/GTX.htm). [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [17] Deepsoil, «Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns,» Department of Civil and Environmental Engineering, 26 11 2020.

Pilaguano y Reinoso/ Validación De Programas 1d (Deepsoil, Cyclic 1d Y Midas Gts-Nx), Que Realizan Estudios De Propagación De Ondas Con El Uso De La Base De Datos Sismológica De Japón (NIED), En “Columnas De Suelos” Instrumentadas En El Tope Y La Base Del Depósito

8. Anexos

Estaciones Utilizadas con clasificación y profundidad de acelerómetro Anexo (A).

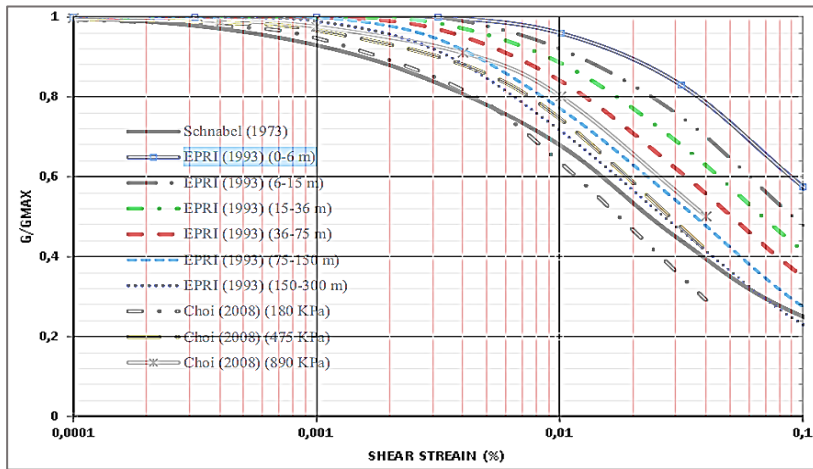
Código de Sitio	Clasificación	Latitud UTM	Longitud UTM	Profundidad del Acelerómetro (m)
EHHM02	SS	33.8650	133.1840	110
HRSH09	SM	34.7016	132.9524	115
FKSH07	SM	37.0103	139.3755	200
YMNH09	SD	35.4327	138.3325	158
SMNH10	SD	35.5579	133.3004	200

Código de Sitio	Clasificación	Latitud UTM	Longitud UTM	Profundidad del Acelerómetro (m)
SMNH04	IS	35.0918	132.5308	101
GIFH17	IM	35.9514	136.8732	100
MYZH15	IM	32.3654	131.5893	200
EHHM05	ID	33.7112	132.8032	134
OKYH09	ID	35.1809	133.6765	100
SMNH08	ID	34.8801	132.4208	100
HRSH05	ID	34.5566	133.4179	200

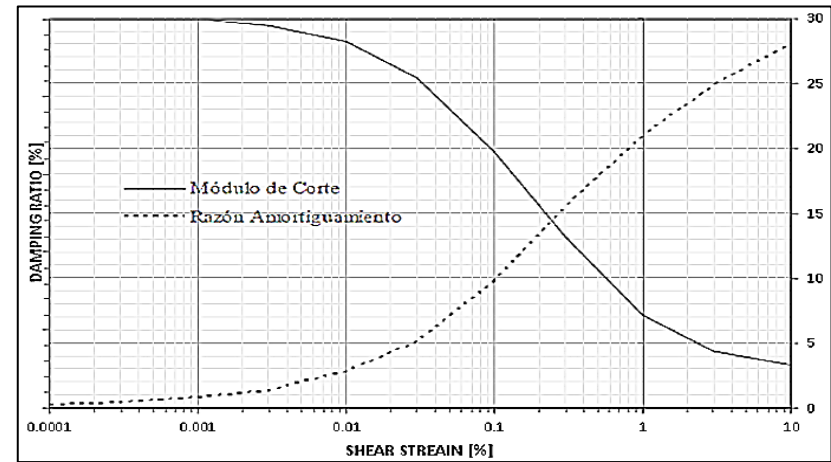
Código de Sitio	Clasificación	Latitud UTM	Longitud UTM	Profundidad del Acelerómetro (m)
AICH12	PS	34.7884	137.1057	401
KYTH05	PS	35.6814	135.0268	150
KGWH02	PM	34.1980	133.7081	200
SZOH35	PD	34.9467	139.0855	300
EHHM04	PD	33.9023	133.0658	200
OKYH01	PD	34.5070	133.8905	201
NIGH12	PD	37.2239	138.9821	110
HYGH01	PD	34.2937	134.7941	102
HRSH07	PD	34.2883	132.6411	102

Curvas Representativas de Reducción del Módulo de Corte y Amortiguamiento para sitios de roca [4] Anexo (B)

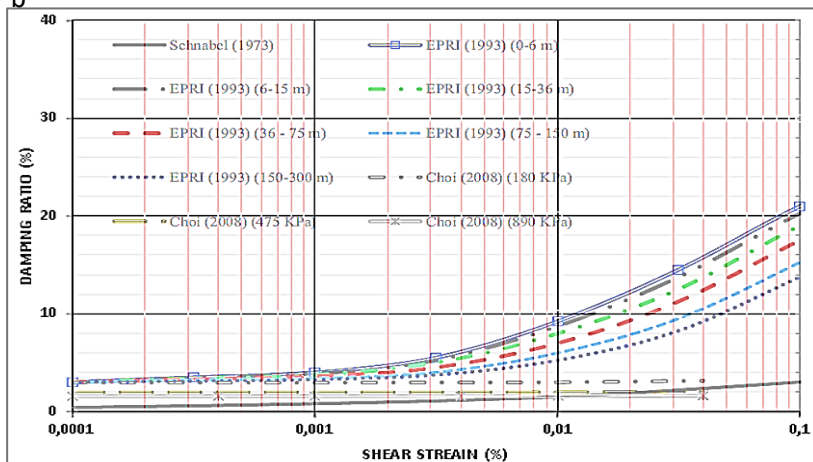
a



Curva de reducción de módulo de corte y variación de la razón de amortiguación con el nivel de deformación de corte para una arcilla blanda [15] Anexo (B1).



b



Variación del módulo de corte (a) y amortiguación (b) con esfuerzo cortante para roca.