

Análisis de la respuesta dinámica de sitio en cárcavas con relleno antrópico Analysis of the dynamic response of the site in gullies with anthropic filling

Nydia Liliana González Pinzón¹, Carlos Javier Sainea Vargas² & Omar Javier Jiménez Jiménez³

¹ Estudiante de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia, nydia.gonzalez@uptc.edu.co

² Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia, carlos.sainea@uptc.edu.co

³ Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia, omar.jimenez@uptc.edu.co

ABSTRACT: A dynamic response to seismic events has different behaviors depending on the properties of the materials and the geometry of the area. When there are heterogeneous geotechnical zones such as gullies, the dynamic response can be difficult to determine. For this reason, a dynamic response analysis of gullies with anthropic filling was carried out, considering different cross section widths, soil shear wave velocity and seismic events. This research presents the relationship between the variables and the dynamic response caused in terms of acceleration and displacement. In order to carry out the analyses, dynamic Finite Element Method (FEM) modeling was used. The dynamic response was tracked at three points on the cross section of each model, corresponding to the center of the fill, the edge of the fill and the surface. The results are presented in the form of graphs of maximum acceleration and maximum displacement. It is evident that, in gullies with a smaller width, the acceleration and displacement are greater. Likewise, it was discovered that the cutting speed of the materials and the seismic event affect the dynamic response.

RESUMEN: La respuesta dinámica ante eventos sísmicos, tiene diferentes comportamientos en función de las propiedades de los materiales y la geometría de la zona. Cuando se tienen zonas geotécnicas heterogéneas como cárcavas, la respuesta dinámica puede ser difícil de determinarse. Por esto, se realizó un análisis de respuesta dinámica de cárcavas con relleno antrópico, teniendo en cuenta diferentes anchos de sección transversal, velocidades de onda de corte del suelo y eventos sísmicos. Esta investigación presenta la relación entre estas variables y la respuesta dinámica en términos de aceleración y desplazamiento. Para determinar la respuesta dinámica se hizo uso de la modelación dinámica mediante el Método de Elementos Finitos (FEM). La respuesta dinámica se determinó en tres puntos de la sección transversal, correspondiente al centro del relleno, el borde del relleno y la superficie. Los resultados se presentan en forma de graficas de aceleración máxima y desplazamiento máximo. Se evidencio que, en cárcavas con menor ancho, la aceleración y desplazamiento son mayores. Así mismo, se estableció que la velocidad de corte de los materiales y el evento sísmico, afectan la respuesta dinámica.

KEYWORDS: Respuesta dinámica de suelos, método de elementos finitos, cárcavas con rellenos, efecto de sitio.

1 INTRODUCCIÓN

La respuesta dinámica de los suelos ante la ocurrencia de eventos sísmicos, está ligada a las propiedades físicas, mecánicas y dinámicas de los materiales de los cuales está compuesto (Ishihara, 1996; Kramer, 1996; Yoshida, 2015). Este proceso se manifiesta como una amplificación de la respuesta dinámica, que puede ocasionar daños considerables a las estructuras que allí se encuentren.

Por otro lado, en terrenos heterogéneos, la respuesta dinámica de los suelos ante la ocurrencia de sismos puede presentar variaciones importantes con respecto a la de los materiales que se consideran homogéneos. Tal es el caso de las cárcavas, las cuales presentan variaciones considerables, ya que son materiales muy susceptibles a la meteorización.

Estas estructuras geotécnicas, en algunas ocasiones son intervenidas mediante rellenos, como es el caso de las cárcavas de la ciudad de Tunja (Álvarez Pineda & Ramírez, 2011; Carrillo Hurtado & Ramírez, 2011). Las variaciones propias de las características de las cárcavas y los rellenos, ocasionan que, el análisis de la respuesta dinámica de estas zonas represente un reto.

Así mismo, el cambio en las propiedades de los materiales y del avance de los procesos de erosión, ocasiona además que se presenten diversas secciones transversales para una misma cárcava, pudiendo ser rectangulares, trapezoidales o triangulares (Ospina Lozano, 2005). Estas variaciones en la sección transversal de las cárcavas influyen en la respuesta dinámica ante la ocurrencia de eventos sísmicos (Gatmiri & Amini-baneh, 2014; Gatmiri & Foroutan, 2012). De esta manera se puede llegar a tener un gran rango de respuestas dinámicas a lo largo de una misma cárcava.

Estas diferencias en las condiciones geométricas de las cárcavas y las condiciones geotécnicas, ocasionan modificaciones del movimiento sísmico, en términos de aceleración y desplazamientos. Estas modificaciones reciben el nombre de efecto de sitio.

En esta investigación, para determinar la respuesta dinámica de los suelos de cárcavas que han sido intervenidos con rellenos antrópicos, se hizo el análisis de modelos de respuesta dinámica bidimensionales (2D) basados en el método de elementos finitos (FEM).

2 MÉTODO

2.1 Determinación de la geometría transversal de la sección

Con el fin que la geometría sea representativa para la zona de estudio, se desarrolló una revisión bibliográfica de la información sobre las características geométricas de estas estructuras. Esta revisión bibliográfica se llevó a cabo en diferentes trabajos de investigación, inventarios de cárcavas, registros cartográficos y herramientas SIG (Ospina Lozano, 2005); (Álvarez Pineda & Ramírez, 2011; Carrillo Hurtado & Ramírez, 2011); (Alarcón et al., 2021).

De esta manera se recopilaron, tabularon, organizaron y analizaron los siguientes datos de trabajos de investigación, inventarios y registros cartográficos como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Ancho de diferentes cárcavas situadas en la Ciudad de Tunja

Nombre de la cárcava	Máximo (m)	Mínimo (m)	Promedio (m)
Triunfo	154.4	7.8	46.9
Libertadores	161.0	4.8	72.2
Calle 16	114.3	6.6	41.8
Milagro	184.7	7.1	58.7
Cojines	96.5	8.8	47.6
San Lázaro	185.1	7.2	55.3
Norte	119.1	21.0	45.0
Occidente	178.0	30.0	72.6
Centro-Oriente	160.0	22.0	60.9
Sur 1	81.0	16.0	38.9
Sur 2	111.0	31.0	67.0
Oriente	212.0	58.0	118.2

Se pueden observar variaciones importantes, de manera que se procedió a descartar algunos valores del ancho. El primer criterio fue retirar los anchos mayores a 100 m, ya que estos valores son propios de zonas con poca profundidad, de manera que la geometría de la sección transversal no es válida para la modelación, al obtenerse zonas con rellenos insignificantes. Por otro lado, se descartaron los valores que tuvieran anchos menores a 6.0 m, ya que corresponden a ramificaciones y expansiones de las cárcavas actuales, lo que representa una sección sin relleno, debido a su poca edad.

Por otra parte, se tuvo en consideración los anchos promedios que se obtuvieron y con el fin de obtener una sección que posteriormente no implique modelos demasiado robustos para la complejidad de la situación. En este sentido, se adoptaron los

anchos indicados en la Tabla 2 para la determinación de los modelos.

Tabla 2. Anchos establecidos para la modelación

Sección	Ancho (m)
Sección 1	20.0
Sección 2	40.0
Sección 3	60.0

También se tomó una sección trapezoidal con taludes 1:1 con variaciones del ancho para realizar las modelaciones. A continuación, en la Figura 1 se muestra la sección empleada en la modelación y la nomenclatura que se estableció para identificar los diferentes escenarios.

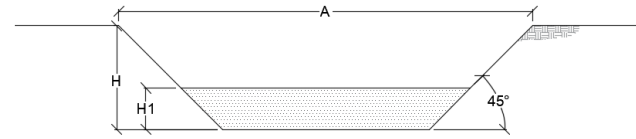


Figura 1. Perfil transversal de las secciones

Dado que la profundidad del relleno tiene ciertas variaciones, se adoptó una profundidad de 4.0 m, que obedece a un valor que tiene similitudes con lo presentado en condiciones reales. Igualmente, se evidenció que la profundidad de las cárcavas se encuentra entre 2.0 m y 20.0 m, así que se adoptó una profundidad de 10.0 m, al representar un valor medio.

Tomando en cuenta lo anteriormente descrito, se emplearon tres secciones típicas con las características geométricas que se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3. Características geométricas de las secciones

Sección	Ancho (m)	H1 (m)	H (m)
Sección 1	20.0	4.0	10.0
Sección 2	40.0	4.0	10.0
Sección 3	60.0	4.0	10.0

2.2 Determinación de las características de los materiales

Con el fin de tener representatividad en las características del material de relleno y de la base rocosa, se buscó en diferentes fuentes bibliográficas la velocidad de onda de los rellenos de suelos de cárcavas. Teniendo en cuenta la heterogeneidad de los rellenos, que pueden ser escombros de construcción, materia orgánica o residuos comunes.

Pudo evidenciarse que se han registrados valores de velocidad de onda del relleno desde 50 m/s hasta 400 m/s, no obstante, este último valor se consideró demasiado alto, teniendo en cuenta que en la ciudad de Tunja registra valores de velocidad de onda de corte

de máximo 188 m/s y módulo de corte máximo G_{max} de 55.0 MPa, parámetros que se tomarán como constantes para las modelaciones.

Ahora bien, teniendo en cuenta la naturaleza de los materiales habituales en las cárcavas de la ciudad de Tunja, se adoptaron las características mostradas en la Tabla 4 para tres materiales in situ. Tomar en cuenta estos valores ayuda a determinar la influencia de los materiales en la respuesta dinámica.

Así mismo, se encontró que el suelo natural presenta peso unitario promedio de 18.0 KN/m³, por esta razón, se adoptó este valor como constante para cada una de las modelaciones.

Tabla 4. Características de los materiales de suelo natural

Escenario	V_s (m/s)	G_{max} (MPa)
Escenario 1	100.0	45.8
Escenario 2	150.0	68.7
Escenario 3	250.0	114.6

Agregando a lo anterior, para establecer las características del material rocoso, se tomó en consideración las características mencionadas en el Título A del reglamento NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) para la determinación de las características de la base rocosa a emplear.

Así pues, tomando como referencia que Tunja está situada sobre la Formación Bogotá (Tb) y Formación Tilatá (Tst), las cuales en las zonas de cárcavas se presentan como rocas blandas, se tomó velocidad de onda del estrato rocoso como 360 m/s y G_{max} de 355 MPa.

Por otro lado, en esta revisión bibliográfica se reportaron algunos valores de peso unitario del relleno que varían entre 22.0 KN/m³ a 14.0 m³, en este sentido, se consideró que 22.0 KN/m³ es un valor alto ya que se encontró en rellenos mayormente conformados por escombros de concreto. De esta manera se tomaron valores medios a este rango de valores.

2.3 Identificación de fuentes sísmicas

Teniendo presente que la geología de Tunja y Bogotá presentan grandes similitudes, se realizó una revisión a la microzonificación de la capital del país (Fondo de prevención y atención de emergencia, 2010). En este sentido, se determinó que las señales que se aplicaran pueden corresponder a señales producidas por sismos locales, regionales y de subducción según se indica en la Tabla 5.

Tabla 5. Señales empleadas

Fuente	Nombre	A_{max} (g)
Local	Coyote Lake	0.088
Regional	Hyogo-Ken Nanbu (Kobe)	0.080
Subducción	México	0.033

2.4 Modelación numérica

Como se mencionó con anterioridad, se empleó el Método de Elemento Finitos (FEM), y para el mallado se empleó el algoritmo de Grid, el cual genera mallas complejas basadas en el algoritmo de cuadrícula modificado. Los tipos de elementos empleados son el triangular y el cuadrilátero.

En primera instancia se determinó la altura de los elementos de la malla según la velocidad de onda de cada material, empleando la siguiente expresión:

$$\frac{T*Vs}{10} < \lambda < \frac{T*Vs}{5} \quad (1)$$

En esta expresión, λ corresponde al tamaño máximo del elemento, T al periodo de la señal sísmica y V_s a la velocidad de onda de corte de los diferentes materiales. Teniendo en cuenta el rango anterior, se seleccionó el mayor tamaño, ya que brinda buenos resultados sin generar sobreconsumo de recursos informáticos.

En este orden de ideas, el tamaño de los elementos se resume en la Tabla 6:

Tabla 6. Tamaño de los elementos

Material	λ (m)
Relleno	1.5
Suelo 1	1.0
Suelo 2	1.5
Suelo 3	2.5
Roca	3.6

Para realizar las modelaciones se empleó el software MIDAS GTS NX. Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado, en la Figura 2 se muestra un ejemplo de los modelos empleados para realizar el análisis dinámico de la presente investigación.

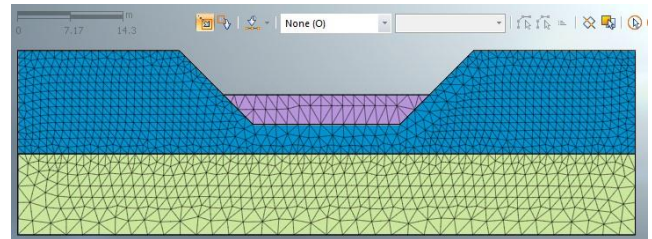


Figura 2. Representación ilustrativa del FEM.

3 VARIACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA

Para brindar mayor claridad a los resultados hallados, se implementó la nomenclatura indicada en la Tabla 7. Así mismo, se

muestran las combinaciones que se realizaron para determinar la influencia de las variables de estudio. Cabe aclarar que cada una de las combinaciones fue analizada con las tres señales sísmicas descritas con anterioridad.

Tabla 7. Nomenclatura de los modelos

Nomenclatura	Ancho (m)	Vs (m/s)
A1VS1	20.0	100.0
A1VS2	20.0	150.0
A1VS3	20.0	250.0
A2VS1	40.0	100.0
A2VS2	40.0	150.0
A2VS3	40.0	250.0
A3VS1	60.0	100.0
A3VS2	60.0	150.0
A3VS3	60.0	250.0

La lectura de los valores de desplazamiento y aceleración se realizó en tres puntos de cada sección, como se muestra en la Figura 3. Lo anterior, teniendo en cuenta que debido a la diferencia de materiales de suelo natural y de relleno se espera que la respuesta obtenida presente diferencias.

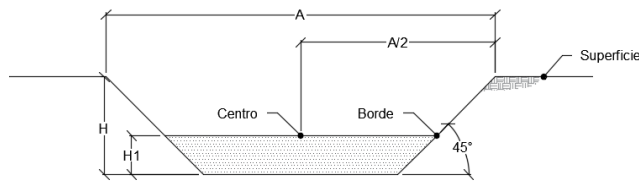


Figura 3. Puntos de lectura

3.1 Determinación de la respuesta dinámica para el Sismo Coyote Lake

Con la señal de fuente local de Coyote Lake, se estableció la variación de la aceleración con el tiempo como se aprecia en la Figura 4. De esta manera, se presentaron las mayores aceleraciones en un rango de periodo de 0.25 s a 0.5 s, y después de los 0.5 s, la aceleración tiende a estabilizarse.

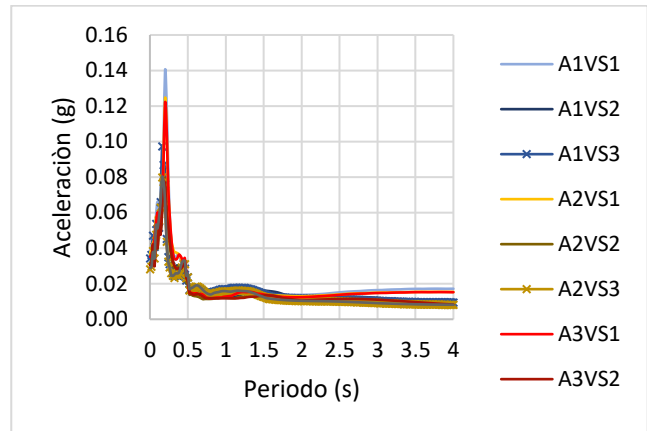


Figura 4. Variación de la aceleración con la señal de Coyote Lake

Por otro lado, se determinó que la máxima aceleración se presenta en superficie, lo cual se ilustra en la Figura 5. Así mismo, la aceleración obtenida en el centro del relleno presenta valores medios y la aceleración obtenida en el borde del relleno es la menor. Esto evidencia la ocurrencia de los efectos de sitio, ya que se están presentando valores mayores en superficie que los presentados en las zonas más cercanas al estrato rocoso.

Complementando lo anterior, para un mismo valor de ancho de la sección, se tuvieron aceleraciones en superficie mayores con menores velocidad de onda de corte. No obstante, esta tendencia cambia cuando se realizan lecturas en las zonas de centro y borde del relleno. En este sentido, para un mismo valor de ancho de sección, se registran aceleraciones menores con una menor velocidad de onda de corte para lecturas realizadas en el centro y borde del relleno.

Por otra parte, las mayores aceleraciones se presentaron en secciones menor ancho, de esta manera los máximos valores se presentan para las secciones de 20.0 m de ancho.

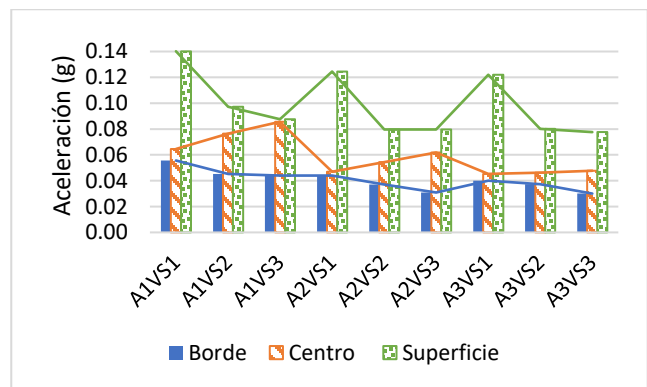


Figura 5. Aceleración máxima para la señal de Coyote Lake

Además de lo anterior, al determinar los máximos desplazamientos se observó una tendencia similar a la registrada para las aceleraciones máximas lo cual se observa en la Figura 6. En este sentido, los mayores desplazamientos se registraron en la superficie, seguido de la zona del borde del relleno y los menores

desplazamiento se tiene en el centro del relleno. Sumado a lo anterior, los desplazamientos para el centro del relleno y borde del relleno, presentan orden de magnitud similar.

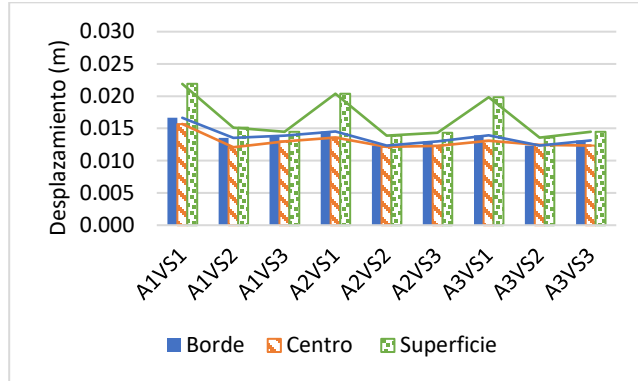


Figura 6. Desplazamiento máximo para la señal de Coyote Lake

Se observa que los mayores desplazamientos se tienen para secciones de menor ancho. Por esta razón, los mayores desplazamientos se presentan en la sección de 20.0 m.

Así mismo, para un ancho de sección determinado se tienen mayores desplazamientos a menores velocidades de onda, esto se debe a que la velocidad de onda de corte está estrechamente relacionada con la rigidez de los materiales, ocasionando que los desplazamientos sean mayores con menores velocidad de onda de corte.

3.2 Determinación de la respuesta dinámica para el Sismo Kobe

Para la señal de fuente regional de Kobe, se estableció la variación de la aceleración con el tiempo como se ve en la Figura 7, de esta manera, se presentaron las mayores aceleraciones en un rango de periodo de 0.1 s a 0.4 s, así mismo, luego de 1.0 s, la aceleración tiende a estabilizarse.

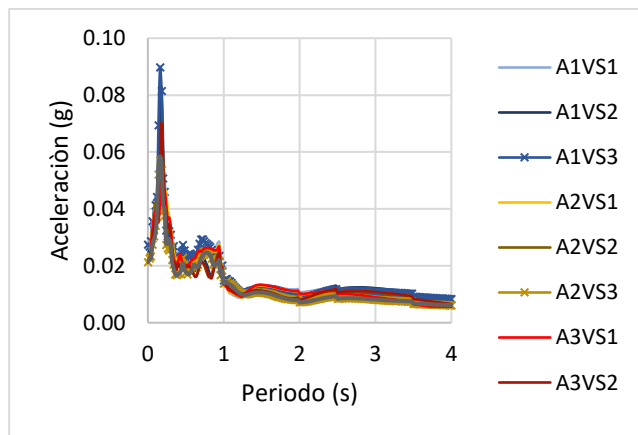


Figura 7. Variación de la aceleración con la señal de Kobe

Se determinó que la máxima aceleración se presenta en superficie como se ilustra en la Figura 8. Así mismo, la aceleración obtenida en el centro del relleno y en el borde del relleno, en termino generales tienen magnitudes similares, excepto las

presentadas para el ancho de 20.0 m y velocidad de onda de corte de 250 m/s.

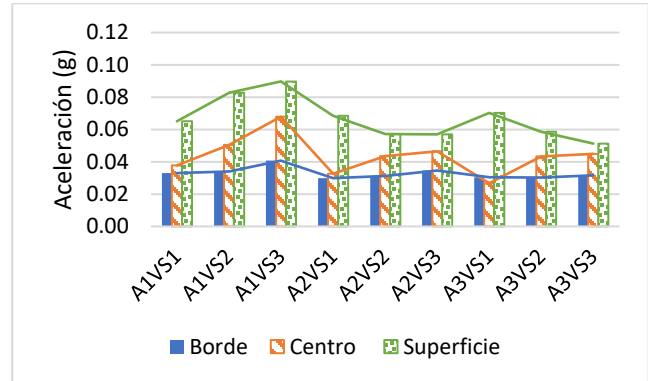


Figura 8. Aceleración máxima para la señal de Kobe

Complementando lo anterior, para el ancho de 20.0 m se presentan aceleraciones crecientes con la velocidad de onda, situación que es similar a los demás anchos empleados. Por lo que se refiere al ancho de 40.0 m y 60.0 m, se tienen tendencias similares, ya que las aceleraciones máximas se presentan en modelos con velocidad de onda menor. Sin embargo, los valores de máximas aceleraciones no muestran variaciones de la misma magnitud que los casos anteriormente expuestos.

Con respecto a los máximos desplazamientos obtenidos presentado en la Figura 9, se determinó que en la superficie se presentan los mayores valores, independiente del ancho de la sección o la velocidad de onda de corte. Además de esto, para un ancho de sección determinado, se tienen menores desplazamientos con mayores velocidades de onda de corte. Como se mencionó anteriormente, esta tendencia se debe en gran medida a la rigidez de los materiales.

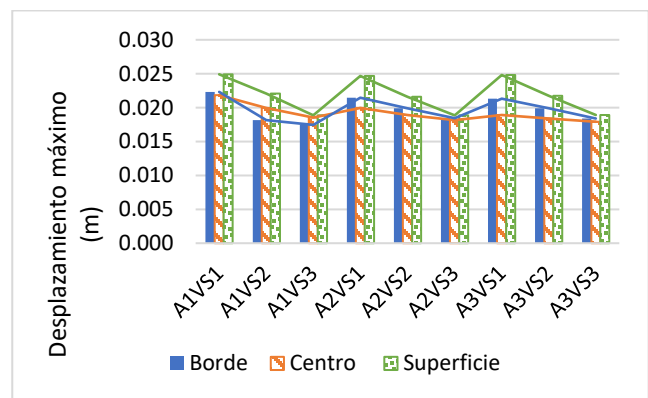


Figura 9. Desplazamiento máximo para la señal de Kobe

3.3 Determinación de la respuesta dinámica para el Sismo México

Para la señal de fuente de subducción de México, se estableció la variación de la aceleración con el tiempo como se muestra en la Figura 10, de esta manera, se presentaron las mayores

aceleraciones en un rango de periodo de 0.1 s a 1.0 s, así mismo, luego de 2.0 s, la aceleración tiende a estabilizarse.

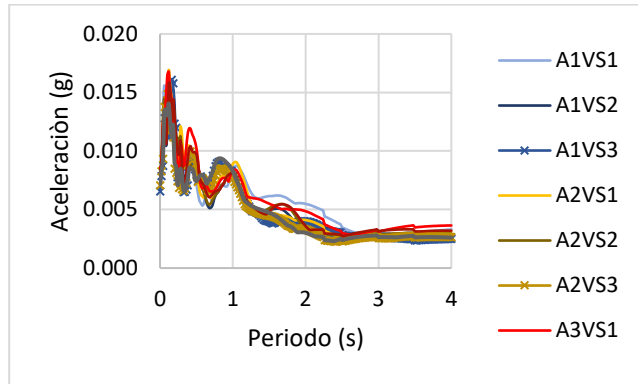


Figura 10. Variación de la aceleración con la señal de México

De manera similar que lo ocurrido con las señales anteriormente analizadas, con la señal de fuente de subducción de México, se determinó que la máxima aceleración se presenta en superficie, como se muestra en la Figura 11. Igualmente, la aceleración obtenida en el centro del relleno presenta valores medios y la aceleración obtenida en el borde del relleno es la menor.

Complementando lo anterior, para un mismo valor de ancho de la sección, se tuvieron aceleraciones en superficie mayores con menores velocidad de onda de corte. Sumado a lo anterior, se puede observar que la aceleración es inversamente proporcional para los anchos de 40.0 m y 60.0 m. No obstante, y de manera diferente que, a las aceleraciones de las señales anteriormente analizadas, para un ancho de 20.0 m, las aceleraciones son menores a las obtenidas para los anchos mayores.

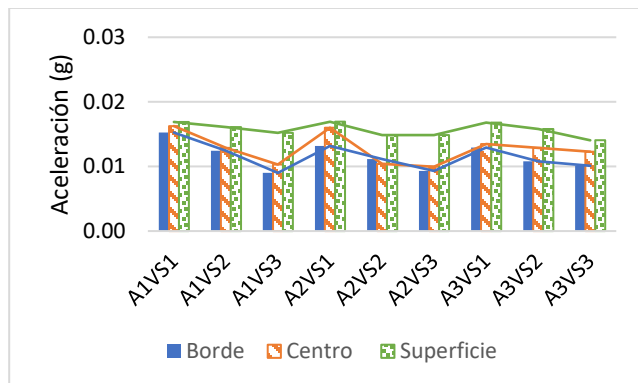


Figura 11. Aceleración máxima para la señal de México

Con respecto a los máximos desplazamientos obtenidos, como se muestra en la Figura 12 y como se ha evidenciado en los casos anteriormente presentados, se determinó que en la superficie se presentan los mayores valores. Además de esto, para un ancho de sección determinado, se tienen menores desplazamientos con mayores velocidades de onda de corte. Sin embargo, para esta señal, se presenta un cambio y es que los desplazamientos son mayores para la sección de 40.0 m, seguidos de los desplazamientos en la sección de 60.0 m y finalmente, los desplazamientos menores se encuentran para la sección de 20.0 m.

Lo anterior se debe en parte a que en esta sección se tienen las aceleraciones más bajas.

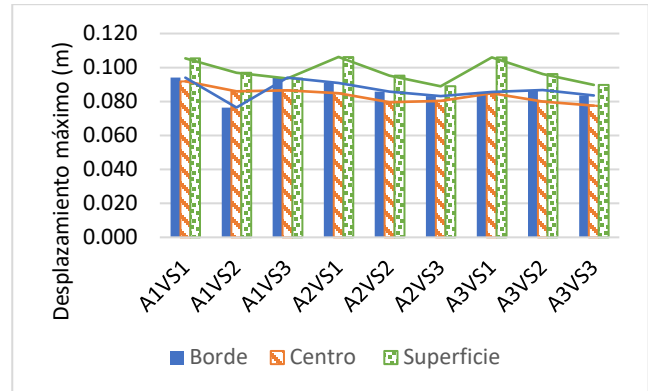


Figura 12. Desplazamiento máximo para la señal de México

3.4 Variación de la respuesta dinámica por señal sísmica

Al comparar los resultados de aceleración obtenidos para cada una de las señales en los diferentes puntos de centro, borde y superficie, como se muestra en la Figura 13, se evidencia que la señal sísmica de Coyote Lake ocasiona las magnitudes mayores y rangos más amplios. En este sentido, la señal sísmica de Coyote produce valores de aceleración entre 0.14 g y 0.03 g para todos los anchos de sección y velocidad de onda de corte.

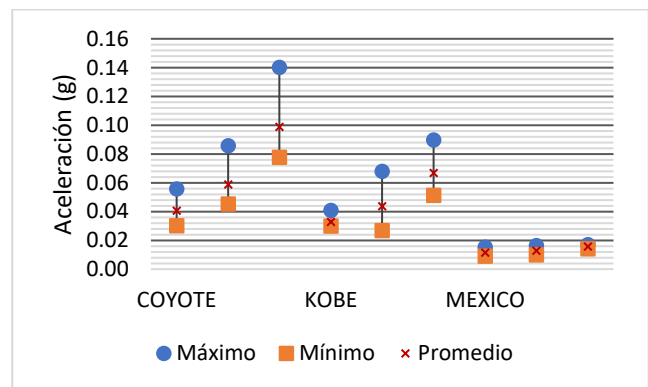


Figura 13. Aceleración por señal

Por otra parte, la señal sísmica de Kobe provoca los valores intermedios de aceleración. Así pues, se obtienen aceleraciones entre 0.09 g y 0.03 g. De esta forma, y para la señal sísmica de México, se presentaron los menores valores de aceleración, con un rango de entre 0.02 g y 0.01 g. Por esta razón, se pudo evidenciar que la señal sísmica de Kobe y Coyote Lake producen aceleraciones relativamente cercanas.

Ahora bien, al analizar los valores de desplazamientos obtenidos lo cual se ilustra en la Figura 14, se observa que la señal sísmica de Kobe genera los mayores desplazamientos, con valores entre 0.017 m y 0.025 m para la totalidad de las secciones estudiadas.

Así mismo, la señal sísmica de Coyote Lake ocasiona valores intermedios de desplazamiento, puesto que toma valores en un rango de 0.022 m a 0.012 m. Finalmente, la señal sísmica de México presentó los menores valores de desplazamiento, ya que se encuentran entre 0.011 m y 0.008 m. Por esta razón se puede establecer que las señales de Kobe y Coyote Lake, produjeron desplazamientos similares, mientras que el desplazamiento ocasionado por la señal de México es inferior a las dos anteriores.

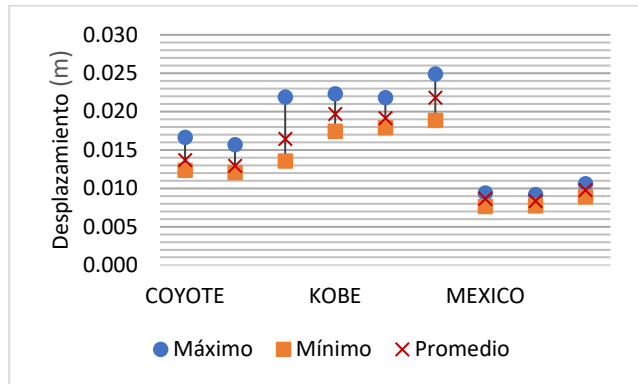


Figura 14. Desplazamiento por señal

3.5 Variación de la respuesta dinámica por sección

Al realizar una comparación de los resultados de aceleración obtenidos para cada una de las secciones analizadas según se observa en la Figura 15, se evidencia que la sección de 20.0 m de ancho presentó las mayores aceleraciones, puesto que se encuentran entre 0.14 g y 0.01 g. Así mismo, la sección de 40.0 m presenta valores intermedios de aceleración, ya que esta se encuentra entre 0.12 g y 0.01 g. Además de esto, la sección de 60.0 m presenta valores menores de aceleración, ya que se encuentra entre 0.12 g y 0.01 g.

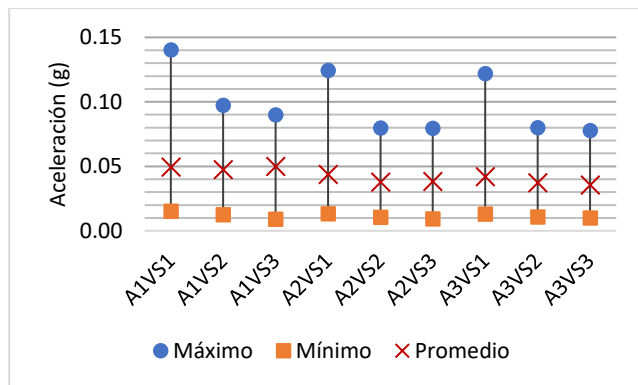


Figura 15. Aceleración por sección

Complementando lo anterior, se debe recalcar que el valor mínimo de aceleración obedece a las que se presentaron por la señal sísmica de México. Lo cual, como se dijo en la sección anterior, provocó aceleración sustancialmente diferente con respecto a las otras señales sísmicas.

Adicionalmente, al analizar la variación del desplazamiento ocasionado lo cual se observa en la Figura 16, se pudo establecer

que la sección con menor ancho, la cual corresponde a 20.0 m, presentó los mayores desplazamientos, ya que, este se encuentra entre 0.0249 m y 0.0081 m. Por otra parte, la sección de 40.0 m presentó desplazamientos entre 0.0247 m y 0.008. Finalmente, la sección de 60.0 m, presentó desplazamientos entre 0.0244 m y 0.008 m.

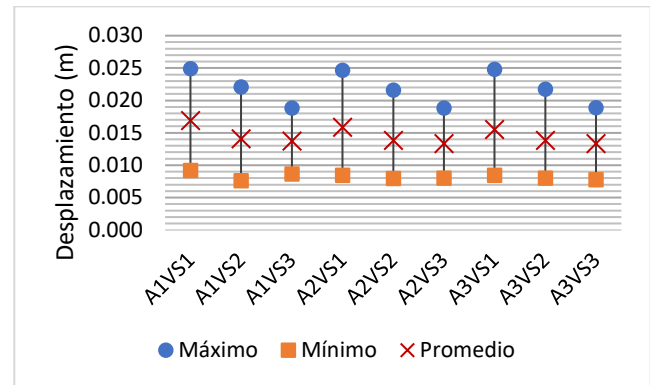


Figura 16. Desplazamiento por sección

De manera similar que el análisis presentado para la aceleración, el valor mínimo de desplazamiento obedece a las que se presentaron por la señal sísmica de México.

4 CONCLUSIONES

En cárcavas con relleno antrópico, la respuesta dinámica ante la ocurrencia de eventos sísmicos, es mayor para la superficie que para el relleno para una sección determinada. Además de esto, dentro del relleno la respuesta dinámica es mayor en el centro del relleno que en el borde. En otras palabras, la respuesta dinámica es mayor, cuanto más alejado se esté del centro de la cárcava.

La sección de la cárcava juega un papel importante en la respuesta dinámica ante la ocurrencia de eventos sísmicos, ya que se pudo evidenciar que las secciones con ancho menor generaron las mayores aceleraciones y desplazamientos.

La velocidad de onda de corte está estrechamente ligada a la respuesta dinámica de las cárcavas con relleno, ya que para una sección determinada las menores aceleraciones y desplazamientos se produjeron a mayor velocidad de onda de corte. Esta relación se debe a que la velocidad de onda de corte está a su vez relacionada con la rigidez del material y el módulo de corte.

El evento sísmico influye la respuesta dinámica del terreno, ya que se obtuvieron diferentes aceleraciones y desplazamientos según la señal sísmica aplicada. Para el caso de rellenos antrópicos con características de la ciudad de Tunja, la señal sísmica de Coyote Lake produjo una respuesta dinámica mayor, en oposición a lo anterior, la señal sísmica de México produjo una menor respuesta dinámica.

A pesar de las variaciones en la respuesta dinámica teniendo en cuenta todas las configuraciones realizadas, se puede establecer que la aceleración y desplazamiento presentados, se encuentran en un rango relativamente cercano entre sí.

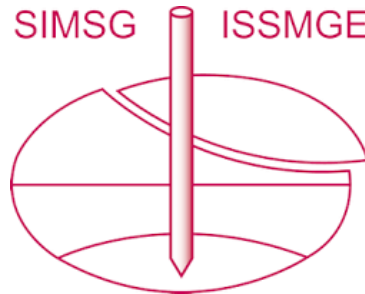
3 AGRADECIMIENTOS

La autora desea agradecer al coautor e ingeniero Carlos Javier Sainea Vargas por su acompañamiento en el proceso de redacción y construcción del presente documento investigativo. Además, quiere agradecer al ingeniero Miguel Ángel Sánchez Salinas por su valiosa ayuda en el manejo del software y sus comentarios en el mismo. Finalmente, la autora desea agradecer a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y al Grupo de Investigación GHSAG, por haber contribuido en la formación como profesional y como investigadora.

4 REFERENCIAS

- Alarcón, J. J., Jiménez Jiménez, O. J., Peña Ramírez, N. H., Rodríguez González, J. L., & Vasquez Guerrero, W. S. (2021). *Historia del desarrollo urbano de Tunja mediante un SIG*.
- Alvarez Pineda, F. L., & Ramírez, Ó. (2011). *Inventario de cárcavas del costado occidental de Tunja y análisis de vulnerabilidad de construcciones aledañas*. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat01462a&AN=uptc.316325&site=eds-live>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Título A Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente*.
- Carrillo Hurtado, J. P., & Ramírez, Ó. (2011). *Inventario de cárcavas del costado oriental de Tunja y análisis de vulnerabilidad de construcciones aledañas*. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat01462a&AN=uptc.304403&site=eds-live>
- Fondo de prevención y atención de emergencia. (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones*.
- Garzón Cubides, J. C. (2022). *Evaluación de los efectos de las ondas sísmicas en la respuesta dinámica local en la cuenca norte de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.
- Gatmiri, B., & Amini-baneh, D. (2014). Impact of geometrical and mechanical characteristics on the spectral response of sediment-filled valleys. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 233–250. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.10.003>
- Gatmiri, B., & Foroutan, T. (2012). New criteria on the filling ratio and impedance ratio effects in seismic response evaluation of the partial filled alluvial valleys. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.005>
- Ishihara, Kenji. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*.
- Ospina Lozano, S. E. (2005). *Respuesta dinámica de los rellenos antrópicos en cárcavas en la ciudad de Tunja*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Yoshida, N. (2015). *Seismic Ground Response Analysis*. <http://www.springer.com/series/6011>

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.