

## INTERACCIÓN SÍSMICA ENTRE ESTRUCTURAS ELEVADAS Y SUBTERRÁNEAS EN CIUDADES DENSAMENTE POBLADAS

JUAN MANUEL MAYORAL VILLA,  
LEONARDO RAMÍREZ GUZMÁN,  
DANIEL DE LA ROSA ARENAS  
Y JOSÉ MAURICIO ALCARAZ BARRANCO

Actualmente, el Laboratorio de Modelado Numérico Avanzado e Instrumentación, **Geo-sim**, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, desarrolla la línea de investigación sobre la interacción sísmica entre puentes y edificios típicos de la Ciudad de México, (CDMX), con infraestructura urbana subterránea, a fin de evaluar la interacción benéfica y adversa, delimitando, con base en los resultados de modelos numéricos y sitios clave instrumentados en CDMX, el área de influencia y la relevancia de esta interacción en el desempeño

sísmico de las estructuras aledañas para producir recomendaciones normativas de diseño. Este fenómeno ha sido estudiado tanto en suelos blandos como en rígidos típicos de la CDMX (i.e. Mayoral *et al.*, 2020; Mayoral y Mosqueda, 2020 y 2021). La evaluación de la resiliencia sísmica de infraestructura estratégica (ej. edificios, pasos elevados, y túneles) en zonas urbanas densamente pobladas ante eventos naturales extremos (ej. sismos, hundimiento progresivo e inundaciones) requiere estudiar las interdependencias del riesgo entre cada subsistema (Mayoral *et al.*, 2020; Mayoral y Mosqueda, 2020; Román *et al.*, 2019; Chungsik, 2012), incluyendo la revisión de la compleja interacción entre las ondas sísmicas incidentes, reflejadas y difractadas en las estructuras subterráneas, además de las generadas por la vibración de las estructuras superficiales, como se ilustra en la Figura 1. Aunque diversos grupos de investigación han estudiado la interacción entre estructuras superficiales (ej., Isbilibroglu *et al.*, 2015), en todos los casos han considerado principalmente edificios que suponen propiedades lineales para el suelo (ej., Podestá *et al.*, 2019), y no toman en cuenta la interacción con obras subterráneas. La razón fundamental de esta simplificación es la complejidad implícita del fenómeno, por lo que a menudo su importancia es soslayada en la práctica. Lo anterior, conlleva a diseños de estructuras potencialmente costosas y en algunos casos inseguras.

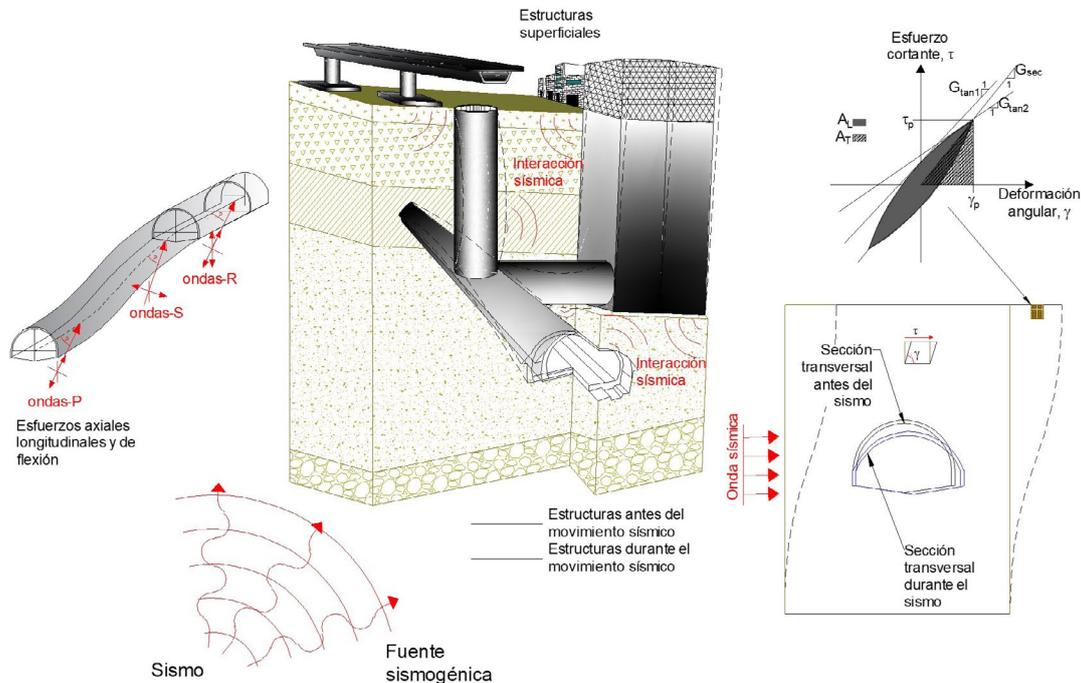
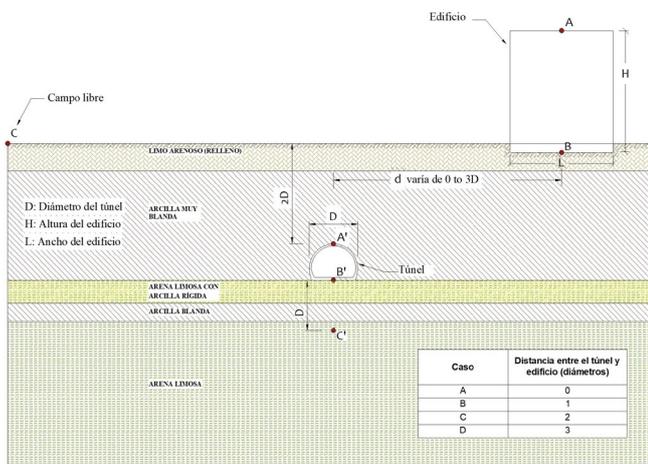


Figura 1. Interacción sísmica entre obras superficiales y subterráneas (Mayoral *et al.*, 2020)

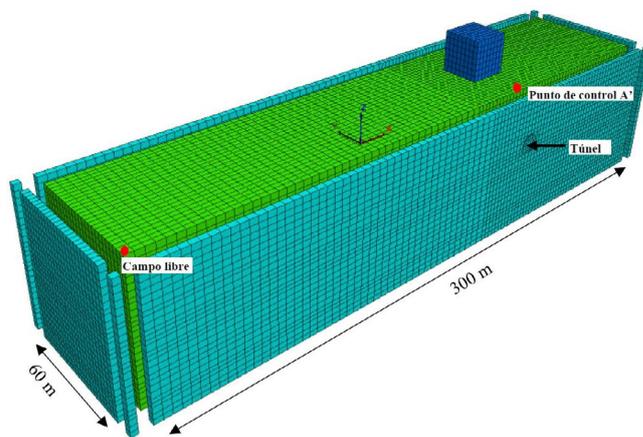
## Sistema túnel-suelo-edificio

Para suelos blandos, se consideró la tipología presentada esquemáticamente en la Figura 2a, a partir de la cual, se generaron modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas desarrollados con el programa FLAC<sup>3D</sup> (Figura 2b). Se hicieron análisis paramétricos variando la distancia entre el túnel y el edificio (*i.e.*, de 0 a 3 veces el ancho del túnel  $D$ ) considerando cuatro casos

(ver Figura 2a). La profundidad del túnel se mantuvo constante e igual a dos veces el ancho del túnel (*i.e.*, 22 m). Para el caso de suelos rígidos se consideró el sistema túnel-suelo-edificio y el modelo numérico presentados en la Figura 3, el cual corresponde a un sitio que se ha instrumentado como se indica en la Figura 3a, como parte de los alcances de esta investigación.

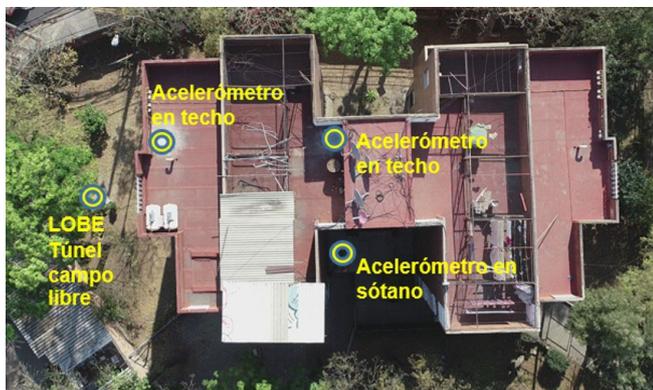


a)

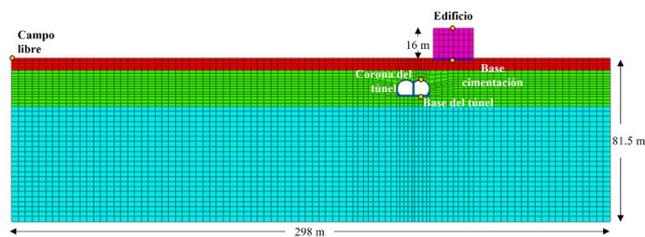


b)

Figura 2. a) Representación esquemática del problema idealizado, y b) modelo numérico tridimensional de diferencias finitas para suelos blandos



a)



b)

Figura 3. a) Instrumentación y tipología de edificio considerada y b) modelo numérico tridimensional de diferencias finitas para suelos rígidos

## Interacción puente-edificio-túnel

Se desarrollaron modelos numéricos del sistema puente-edificio-túnel (Figura 4) variando la posición del túnel (*i.e.* debajo del puente, del edificio, y a la mitad entre el edificio y el puente), así como la ubicación del puente (de 1 a 3 diámetros

del edificio), tanto para suelos blandos como rígidos; actualmente, se llevan a cabo los análisis paramétricos correspondientes en las estaciones de trabajo de alto rendimiento del **Geo-sim** del II-UNAM.

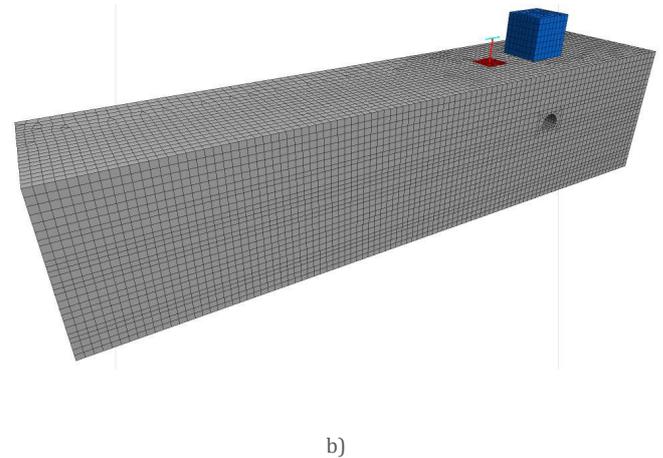
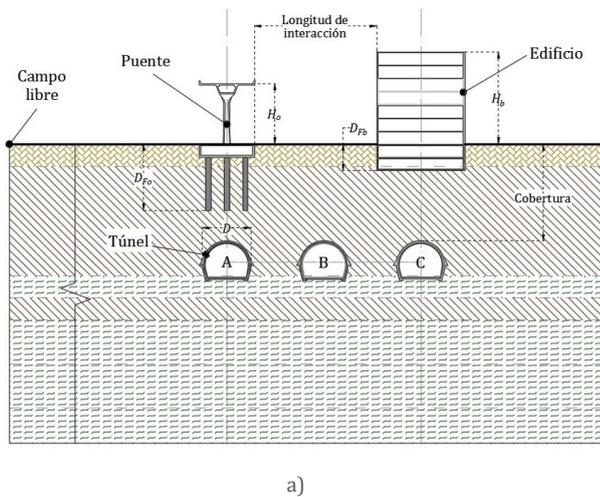


Figura 4. a) Representación esquemática del problema idealizado del sistema puente-edificio-túnel para suelos blandos, y b) modelo numérico tridimensional de diferencias finitas

## Resultados parciales

Para estudiar el efecto del túnel en la interacción sísmica túnel-suelo-edificio, los resultados se presentaron en términos del factor del túnel-edificio,  $T_{fb}$ , que se define como la función de transferencia calculada entre la azotea y la cimentación sin el túnel,  $TF_{R-F}$  dividido entre la función de transferencia entre la azotea y la cimentación con la presencia del túnel,  $TF_{R-F_T}$ . Estos resultados se muestran para suelos blandos en la Figura 5a para el caso A, para la componente transversal.  $T_{fb}$  permite mostrar claramente el efecto del potencial de amplificación y la distribución de energía dentro del contenido de frecuencias de interés. Existe una clara amplificación (*i.e.*, interacción perjudicial) en el edificio debido a la presencia del túnel para el rango de frecuencia de interés (*i.e.*, de 0.7 Hz a 1.2 Hz), que incluye el período fundamental de la estructura,  $T_f = 1.01$  s, y el período

característico del sitio elástico del suelo,  $T_{pe} = 0.85$  s, donde se alcanzan valores de  $T_{fb}$  inferiores a uno para este intervalo de frecuencias. El efecto mencionado es más importante para el caso A, (*i.e.*, cuando el túnel está debajo del edificio), y reduce gradualmente su impacto cuando el túnel se aleja del edificio. Esta amplificación está de acuerdo con la intensidad espectral de Housner,  $SI(\xi)$ , calculada para cada escenario, como se muestra en la Figura 5b. Es interesante que hay un claro potencial de atenuación (*i.e.*, interacción beneficiosa) en el edificio debido a la presencia del túnel de 0.4 Hz a 0.7 Hz, que abarca el período característico no lineal del sitio,  $T_{pnl} = 2$  s (0.5 Hz) y el segundo período no lineal 1.73 s (0.58 Hz). Los resultados presentados son parte de una investigación en proceso, y se puede consultar parcialmente en Mayoral y Mosqueda (2020, 2021).

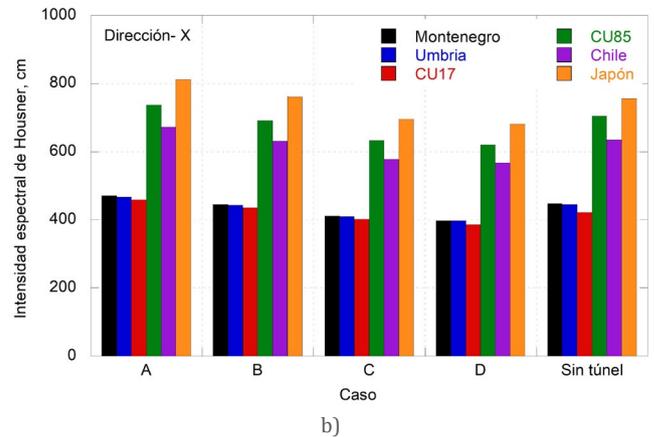
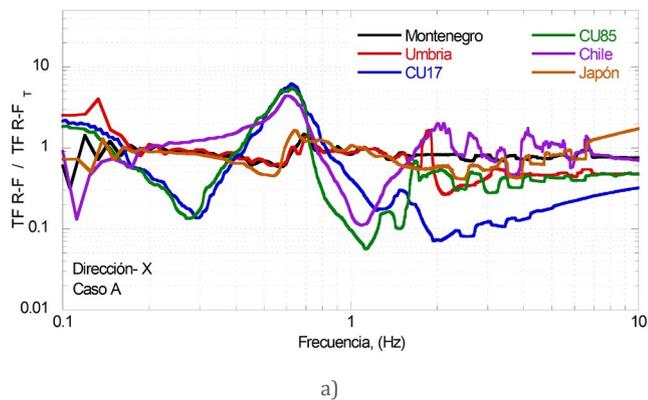


Figura 5. a) Amplitud relativa de las funciones de transferencia entre la Azotea y la Cimentación, con y sin túnel, para la dirección transversal (X) y b) Intensidad de Housner calculada en la azotea

## Conclusiones

Para los casos específicos analizados, existe amplificación (*i.e.*, interacción perjudicial) en el edificio debido a la presencia del túnel, aumentando las aceleraciones máximas calculadas en la azotea del edificio. Este efecto es más importante para el caso A (*i.e.*, túnel debajo del edificio), y reduce su impacto gradualmente cuando el túnel se aleja del edificio. Asimismo, existe una interacción benéfica túnel-cimentación al nivel de la cimentación, donde se atenúan las aceleraciones máximas calculadas. Con respecto al campo libre, también, existe un claro potencial de atenuación (*i.e.*, interacción benéfica) en la respuesta del suelo debido a la presencia del túnel para eventos de subducción, este efecto benéfico prevalece para distancias de hasta tres veces el diámetro del túnel. Sin embargo, esta interacción depende del contenido de frecuencias, por lo que se observa una interacción perjudicial importante para las frecuencias bajas en eventos de falla normal. Este hecho debe ser considerado para estimar adecuadamente la demanda sísmica en las estructuras circundantes a obras subterráneas. |

## Referencias

- Chungsik, Y. 2012. Interaction between tunneling and bridge foundation – A 3D numerical investigation. *Computers and Geotechnics* 49:70-78.
- Isbiliroglu, Y.; Tabora, R. y Bielak, J. (2015). Coupled soil-structure interaction effects of building clusters during earthquakes. *Earthquake Spectra*, 31(1), 463–500. <https://doi.org/10.1193/102412EQS315M>
- Mayoral, J. M. y Mosqueda, G. 2020. Seismic interaction of tunnel-building systems on soft clay. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 139 (2020) 106419.
- Mayoral, J. M. y Mosqueda, G. 2021. Foundation enhancement for reducing tunnel-building seismic interaction on soft clay. *Tunn. Und. Space Tech.* 115 104016.
- Mayoral, J. M.; Mosqueda, G.; De La Rosa, D. y Alcaraz, M. 2020. Tunnel Performance during the Puebla-Mexico September 19, 2017. *Earthquake Spectra* 2020, Vol. 36(S2) 288–313.
- Podestá, L.; Sáez, E.; Yáñez, G. y Leyton, F. (2019). Geophysical Study and 3-D Modeling of Site Effects in Viña del Mar, Chile. *Earthquake Spectra*, 35(3), 1329–1349.
- Román, A.; Mayoral, J. M.; Hutchinson, T.; Candia, G.; Montgomery, J. y Tepalcapa, S. (2019). Assessment of fragility models based on the Sept 19th, 2017 earthq observed damage. *Soil Dyn. Earth Eng.* 125.2019.105707.