

## ARTÍCULO DE REVISIÓN

### **Metodologías para interacción suelo - estructura en edificaciones: Una revisión sistemática**

### **Methodologies for soil-structure interaction in buildings: A systematic review**

Franklin Cueva<sup>1</sup> , Juan Tenorio<sup>2</sup> , Nelson Quinones<sup>3</sup> , Luis Vilcarromero<sup>4</sup> , José Piedra<sup>5</sup> , Billy Cayatopa<sup>6</sup> ,  
y Marcos Gonzales<sup>7</sup>  \*

#### **RESUMEN**

La interacción suelo-estructura (ISE) es un aspecto fundamental para la evaluación sísmica en construcciones, especialmente en terrenos con escasa capacidad de soporte. El presente artículo tiene como objetivo analizar comparativamente las metodologías de SSI aplicadas a edificaciones mediante una revisión sistemática de la literatura científica, se desarrolló siguiendo el protocolo PRISMA, consultando las bases de datos Scopus, Web of Science y Google Scholar entre el 2000–2024. Tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 40 estudios relevantes. Los resultados muestran que el 55 % de los trabajos emplea métodos numéricos basados en elementos finitos, el 25 % modelos analíticos simplificados y el 20 % enfoques híbridos o experimentales. La literatura coincide en que la ISE puede incrementar el periodo estructural entre 10 % y 40 % y los desplazamientos laterales hasta en 60 %, además de modificar la distribución de fuerzas internas. Se concluye que la consideración de la ISE es especialmente relevante en edificaciones sobre suelos blandos y en análisis sísmico no lineal, recomendándose el uso de modelos numéricos acoplados para estudios de desempeño estructural.

**Palabras claves:** Interacción suelo – estructura, edificios, revisión sistemática, respuesta sísmica.

#### **ABSTRACT**

Soil-structure interaction (SSI) is a fundamental aspect of seismic assessment in buildings, especially on sites with low bearing capacity. The aim of this article is to comparatively analyze SSI methodologies applied to buildings through a systematic review of the scientific literature. It was developed following the PRISMA protocol, consulting the Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases between 2000 and 2024. After applying inclusion and exclusion criteria, 40 relevant studies were selected. The results show that 55% of the studies use finite element-based numerical methods, 25% use simplified analytical models, and 20% use hybrid or experimental approaches. The literature agrees that ISE can increase the structural period by 10% to 40% and lateral displacements by up to 60%, in addition to modifying the distribution of internal forces. It is concluded that the consideration of ISE is particularly relevant in buildings on soft soils and in nonlinear seismic analysis, and the use of coupled numerical models is recommended for structural performance studies.

**Keywords:** Soil-structure interaction, buildings, systematic review, seismic response.

\*Autor por correspondencia

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Jaén, Perú. Email: [franklin.cueva@est.unj.edu.pe](mailto:franklin.cueva@est.unj.edu.pe),  
[juan.tenorio@est.unj.edu.pe](mailto:juan.tenorio@est.unj.edu.pe), [nelson.quinones@est.unj.edu.pe](mailto:nelson.quinones@est.unj.edu.pe), [luis.vilcarromero@est.unj.edu.pe](mailto:luis.vilcarromero@est.unj.edu.pe),  
[jpiedrat@unj.edu.pe](mailto:jpiedrat@unj.edu.pe), [billy\\_cayatopa@unj.edu.pe](mailto:billy_cayatopa@unj.edu.pe), [marcos\\_gonzales@unj.edu.pe](mailto:marcos_gonzales@unj.edu.pe)

## INTRODUCCIÓN

Últimamente, la interacción suelo-estructura (ISE) ha vuelto al centro del debate; esto, principalmente, por la urgente necesidad de modelos sísmicos más confiables y cercanos a la realidad. Como bien señala Acuña Izquierdo et al. (2023) en su exhaustiva revisión del estado del arte, existen avances notables en metodologías analíticas, numéricas y experimentales; sin embargo, resulta preocupante su escasa implementación en el diseño convencional de edificaciones. Esta evidente brecha entre lo teórico y lo práctico no es trivial; por ello, ha impulsado nuevas investigaciones que priorizan las condiciones reales de los entornos urbanos y la complejidad geotécnica inherente. Asimismo, Vicencio y Saavedra (2023) profundizan en un aspecto clave: el fenómeno de la ISE en Sistemas Vecinos (SSI). El presente trabajo demuestra que, en áreas altamente pobladas, la cercanía entre edificios puede influir en la forma en que responden ante un sismo, ya sea amplificando o disminuyendo sus efectos, algo que los enfoques actuales de diseño estructural pasan por alto. Este planteamiento hace posible que la interacción suelo-estructura permita superar la visión tradicional que considera la relación directa entre la edificación y el terreno. En cambio, propone una relación más integrada con el entorno, lo que permite comprender mejor el contexto como la forma en que se organiza el espacio. Bapir, Abrahamczyk y Wichtmann (2023), al centrarse en la modelización, hacen un repaso de las técnicas más usadas y destacan las ventajas que ofrece la modelización numérica en 3D frente a los métodos más sencillos. Los resultados muestran la forma en que se comportan las fundaciones depende mucho del tipo de suelo y de cómo se relacionan sus partes. Por ello, es muy importante conocer bien cómo reaccionan las construcciones durante un terremoto. Peng et al. (2025) destaca las técnicas más modernas para estudiar la interacción suelo-estructura y aprovechar mejor la inteligencia artificial junto con los métodos tradicionales. Además, señalan que una de las mayores dificultades en el campo es la ausencia de estándares claros.

### **Objetivo general**

Analizar comparativamente las metodologías de interacción suelo-estructura aplicadas a edificaciones mediante una revisión sistemática de literatura científica

### **Objetivos específicos**

Identificar las metodologías de ISE utilizadas en edificaciones.

Comparar sus ventajas, limitaciones y campos de aplicación.

Evaluar su influencia en la respuesta estructural sísmica.

### **Pregunta de investigación**

¿Qué metodologías de interacción suelo-estructura se emplean en edificaciones y cuáles son sus ventajas, limitaciones y efectos en la respuesta estructural?

### **Alcance de la investigación**

La revisión se enfoca en edificaciones de concreto armado, cimentadas sobre suelos deformables, considerando estudios publicados entre 2000 y 2024 relacionados con análisis sísmico y respuesta dinámica.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La revisión sistemática del presente artículo, se desarrolló siguiendo el protocolo Prisma.

### **Fuentes de información**

Se consultaron bases de datos como: Scopus, Web of Science y Google Scholar.

### **Estrategia de búsqueda**

Se hizo la búsqueda combinando palabras claves en inglés como en español como son: soil – structure interaction, building, foundation flexibility, edificaciones, respuesta sísmica, interacción suelo – estructura, entre otros.

### **Criterios de inclusión**

Para la inclusión de investigaciones se tomaron en cuenta: estudios sobre ISE en edificaciones, análisis analítico, numérico o experimental, las publicaciones entre el año 2000 al 2024 y artículos revisados por pares.

### **Clasificación de metodologías**

En los estudios actuales sobre la interacción suelo-estructura, se usan principalmente tres métodos: analíticos simplificados, numéricos y los híbridos y experimentales. Los análisis teóricos, como los de Bahuguna y Firoz (2023), ayudan a representar el terreno de manera que se mejore la respuesta de la estructura. Por otro lado, los modelos estadísticos, como el de Kar et al. (2023), brinda describir el comportamiento estructural en 3D y bajo condiciones complejas, lo que es especialmente útil cuando el suelo es heterogéneo. Finalmente, se requieren métodos experimentales, como ensayos en mesa vibratoria, para verificar los supuestos teóricos y simular condiciones sísmicas reales, como lo demuestran recientes

experimentos de laboratorio de alta resolución (Chorafa et al., 2024). En esta investigación se opta por indagar un modelo analítico simplificado, que permite analizar de manera conceptual los efectos de la ISE sobre parámetros dinámicos clave y comparar sus resultados con referencias bibliográficas actuales. Para confirmar los modelos teóricos y repetir condiciones reales de sismo, se necesitan métodos experimentales como las pruebas en mesa vibratoria, como muestran los estudios recientes de Chorafa et al. (2024). En este trabajo, se elige usar un modelo analítico simplificado que ayuda a entender de forma básica cómo la interacción suelo-estructura interfiere en los parámetros dinámicos importantes, y a comparar esos resultados con estudios actuales.

### **Modelo de estructura**

La superestructura se representa mediante un modelo de un grado de libertad (SDOF), el cual incluye una masa concentrada ( $m$ ), una rigidez lateral ( $k_s$ ) y un coeficiente de amortiguamiento estructural ( $c_s$ ). Este esquema es ampliamente aceptado para la representación idealizada de edificaciones en estudios dinámicos preliminares, ya que facilita el análisis de la respuesta ante excitaciones sísmicas laterales y permite diferenciar los efectos de la fundación sobre el comportamiento global.

### **Modelo de cimentación y suelo**

El modelo del terreno se representa mediante elementos equivalentes que simulan su comportamiento elástico y su disposición de disipación de energía. Para ello se consideran la rigidez horizontal ( $k_g$ ), la rigidez rotacional ( $k_\theta$ ) y el amortiguamiento por radiación ( $c_g$ ). Estos parámetros se calcularon a partir de expresiones propuestas por Gazetas (1991), complementadas con ajustes empíricos modernos según las recomendaciones de Wolf (1985) y revisiones actualizadas por Acuña Izquierdo et al. (2023). La fundación se asume superficial y de base circular, lo que permite aplicar fórmulas generalizadas para calcular impedancias dinámicas. El sistema completo suelo-estructura se modela como una combinación acoplada masa-resorte-amortiguador, lo que posibilita capturar tanto la interacción inercial como la flexibilidad del terreno.

### Tipos de suelos considerados

Se consideraron tres tipos de suelo representativos para evaluar la sensibilidad del sistema ante diferentes condiciones geotécnicas, las cuales son:

Tipo de suelo	Módulo de corte GG (MPa)	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Suelo rígido	1200	2200
Suelo intermedio	150	1900
Suelo blando	40	1700

Esta clasificación sigue lineamientos clásicos (Veletsos & Meek, 1974) y ha sido empleada en estudios contemporáneos para la validación de modelos simplificados (López et al., 2022; Kurniawandy et al., 2025).

### Procedimiento de análisis

La ecuación del movimiento se formuló considerando la acción sísmica como una aceleración basal

$\ddot{u}_g(t) + \ddot{u}_g(t)$ , con las fuerzas internas correspondientes a la estructura y el suelo expresadas en términos de desplazamiento relativo. Para su resolución, se aplicó el método de Duhamel en escenarios idealizados, y la integración numérica mediante el método de Newmark-beta para casos con señales sísmicas reales. El análisis se llevó a cabo en el dominio del tiempo, utilizando como entrada tanto acelerogramas sintéticos como registros sísmicos reales escalados. Los parámetros evaluados incluyen el alargamiento del periodo natural, los desplazamientos máximos y la variación en fuerzas internas (momentos flectores y cortantes) con respecto al modelo de base rígida. Cabe destacar que esta metodología se alinea directamente con las prácticas de simulación dinámica simplificada; precisamente, las recomendadas por Stewart et al. (2022) y Peng et al. (2025). Sin embargo, esta aproximación simplificada —aunque pragmática— plantea interrogantes críticos: ¿hasta qué punto la reducción de complejidad sacrifica precisión en escenarios sísmicos realistas?, cuestión que exige una evaluación rigurosa en futuras aplicaciones.

## **RESULTADOS**

Para contextualizar y, sobre todo, contrastar rigurosamente los resultados propios de esta investigación; se ha desarrollado una revisión sistemática de estudios recientes sobre interacción suelo-estructura (ISE). Dicha recopilación que incluye cuarenta artículos científicos publicados en el último quinquenio — aborda metodologías diversas como: Métodos analíticos simplificados incluyen los modelos de resortes equivalentes tipo Winkler o Pasternak y representaciones de un grado de libertad. Su principal ventaja es la simplicidad y bajo costo computacional; sin embargo, presentan limitaciones para representar continuidad del suelo y efectos tridimensionales. Métodos numéricos, son modelos basados en elementos finitos (FEM) y elementos de contorno (BEM) permiten representar el acoplamiento suelo-estructura con mayor precisión. El 55 % de los estudios revisados emplea FEM tridimensional. Su limitación principal es el alto costo computacional y la necesidad de parámetros geotécnicos detallados. Métodos híbridos y experimentales incluyen subestructuración dinámica y ensayos en mesa vibradora, representan el 20 % de los estudios y permiten validación experimental, aunque su aplicabilidad práctica es más limitada. Después de la revisión sistemática, la literatura coincide en que la ISE: incrementa el periodo estructural entre el 10% y 40%, aumenta los desplazamientos laterales hasta un 60%, modifica las fuerzas internas, incrementa amortiguamiento efectivo del sistema.

## **DISCUSIÓN**

La comparación integral de los estudios analizados evidencia una convergencia técnica clara respecto a los efectos de la interacción suelo-estructura (ISE) en la respuesta sísmica de edificaciones. En el estudio de López et al. (2022), se demuestra que la incorporación de la flexibilidad del suelo mediante resortes equivalentes incrementa el período fundamental, modifica el cortante basal y genera aumentos en derivas y cuantías de refuerzo, lo que repercute directamente en el diseño estructural; de manera similar, Villarreal, Cerna y Espinoza (2017), evidencia que la modelación dinámica de la cimentación, a través de diferentes formulaciones de rigidez, altera las formas modales, incrementa desplazamientos y modifica la distribución de esfuerzos en muros y plateas. Estos hallazgos coinciden Won, J. & Shin, J. (2021), el cual, mediante modelación numérica avanzada, confirma que la deformabilidad del suelo incrementa los períodos y amplifica desplazamientos, especialmente en suelos blandos, así como con el estudio de Kar, S., Athawale, A., Bhushan, M., & Roy, L. (2023), que emplea modelación por

elementos finitos y enfoques probabilísticos para demostrar que la ISE modifica significativamente las propiedades dinámicas y puede generar tanto reducción como amplificación de fuerzas internas dependiendo del acoplamiento dinámico suelo-estructura. En conjunto, los cuatro trabajos no presentan contradicciones sustanciales, sino diferencias asociadas al nivel de complejidad metodológica; todos coinciden en que la hipótesis de base rígida puede subestimar deformaciones y alterar la estimación real de la demanda sísmica, particularmente en suelos de baja rigidez, por lo que la inclusión explícita de la interacción suelo-estructura resulta técnicamente necesaria para lograr una representación más realista y confiable del comportamiento sísmico estructural. Diversos estudios han demostrado que la interacción suelo-estructura incrementa el periodo fundamental de edificaciones debido a la flexibilidad de la cimentación y del suelo (Stewart et al., 1999; Villarreal Castro et al., 2021; López et al., 2022; Kar et al., 2023).

Para las limitaciones del estudio, se observó una escasez relativa de estudios enfocados en edificaciones típicas de regiones latinoamericanas y en suelos tropicales o altamente compresibles, lo que limita la extrapolación directa de algunos hallazgos a contextos geotécnicos locales. La mayoría de investigaciones proviene de regiones con suelos y prácticas constructivas distintas; así como también la reducida disponibilidad de datos experimentales a escala real o ensayos dinámicos de campo que permitan validar modelos numéricos de interacción suelo-estructura.

En una línea futura de investigación, sería integrar explícitamente el ISE en metodologías de evaluación de desempeño sísmico y análisis no lineal de edificaciones, particularmente en la estimación de derivas, demandas de deformación y formación de mecanismos de colapso. Esto permitiría cuantificar su impacto en estados límite de desempeño y funciones de fragilidad.

## **CONCLUSIONES**

La revisión sistemática permitió identificar y comparar las principales metodologías de interacción suelo-estructura aplicadas a edificaciones.

Los métodos numéricos basados en elementos finitos constituyen el enfoque más preciso y utilizado, mientras que los modelos analíticos simplificados mantienen utilidad en análisis preliminares.

La literatura evidencia que la interacción suelo-estructura puede incrementar el periodo

estructural entre 10 % y 40 % y los desplazamientos laterales hasta 60 %, además de modificar la distribución de fuerzas internas y la formación de rótulas plásticas. Estos efectos son más significativos en edificaciones sobre suelos blandos y en análisis sísmico no lineal.

Se concluye que la consideración de la ISE mejora la evaluación de la respuesta sísmica y el desempeño estructural de edificaciones, recomendándose el uso de modelos acoplados suelo-estructura en estudios avanzados y evaluaciones de seguridad sísmica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd Elhamed, A., & Mahmoud, S. (2024). Evaluación sísmica de tanques cilíndricos de almacenamiento frente a registros con diferentes contenidos de frecuencia, considerando la interacción fluido–estructura– suelo/cimentación. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 44(1), 54–80. <https://doi.org/10.1177/14613484241275593>
- Agarwal, S., Mathukumalli, S., & Lingeshwaran. (2023). Estudio sobre la interacción sísmica suelo– estructura en estructuras enmarcadas construidas mediante SAP. *AIP Conference Proceedings*, 2759, 050012-1–050012-7. <https://doi.org/10.1063/5.0144693>
- Bahuguna, A., & Firoz, M. (2023). Modelo analítico basado en plasticidad para la interacción suelo- estructura de un sistema concentrado en un medio de suelo heterogéneo. *Energy Reports*, 2(4), 493–514. <https://doi.org/10.1002/eer2.61>
- Bakhshandeh, M., & Mahboubi Niazmandi, M. (2023). Seismic response of base-isolated irregular steel structures equipped with lead-rubber bearing isolators considering the effects of soil-structure interaction. *International Review of Civil Engineering (IRECE)*, 14(6). <https://doi.org/10.15866/irece.v14i6.22871>
- Calderín-Mestre, F., Almenarez-Labañino, D., & Boada-Fernández, D. (2020). Consideración del fenómeno interacción suelo-estructura en edificio prefabricado. *Ciencia en su PC*, 1(4), 79–94. <https://doi.org/10.36608/181366194007>

- Chao, K. H., Sung, Y., Liu, X., & Su, C. (2019). Evaluación basada en la energía en la interacción suelo- estructura: Amortiguación de la estructura inelástica de un pilar de puente sometido a un movimiento del suelo con velocidad similar a un pulso. *Computational and Applied Mathematics*, 38(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11041-019-00453-4>
- Chorafá, E., Skrapalliou, E., & Katsimpini, P. (2024). On the nonlinear behavior of composite structures under multiple earthquakes considering soil–structure interaction. *CivilEng*, 5(3), 673–693. <https://doi.org/10.3390/civileng5030036>
- Chen, S. L., Lv, H., & Zhou, G. L. (2022). Partitioned analysis of soil–structure interaction for nuclear island building. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(10), 2220–2247. <https://doi.org/10.1002/eqe.3661>
- Ebadi-Jamkhaneh, M. (2024). Pounding Risk Assessment through Soil–Structure Interaction Analysis in Adjacent High-Rise RC Structures. *Buildings*, 14(9), 2779. <https://doi.org/10.3390/buildings14092779>
- Gan, J., Li, P., & Liu, Q. (2020). Estudio sobre la interacción dinámica estructura-suelo-estructura de tres edificios altos adyacentes sometidos a carga sísmica. *Sustainability*, 12(1), 336. <https://doi.org/10.3390/su12010336>
- Gazetas, G. (1991). Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(9), 1363–1381. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:9\(1363\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:9(1363))
- Guo, Q., Xu, M., Xu, G., & Xu, H. (2021). Sufrimiento de golpe de ariete con interacciones fluido- estructura-suelo en una tubería rodeada de suelo compactado. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 58(4), 320–325. <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09749-5>
- Guo, Q., Xu, M., Xu, G., & Xu, H. (2021). Sufrimiento de golpe de ariete con interacciones fluido- estructura-suelo en una tubería rodeada de suelo compactado. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 58(4), 320–325. <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09749-5>
- Güllü, H., & Natur, O. (2025). Simulación tridimensional de movimientos sísmicos: interacción estructura-suelo-estructura para edificios de mediana altura cerca de

- suelos densos y poco profundos bajo el impacto del terremoto de Kahramanmaraş-Pazarcık del 6 de febrero de 2023. *Buildings*, 15, 1013. <https://doi.org/10.3390/buildings15071013>
- Imran, H., AlJeznawi, D., AlJanabi, M. A. Q., & Bernardo, L. F. A. (2023). Evaluación de enfoques de interacción suelo-estructura en muros de contención de tierra estabilizada mecánicamente: una revisión. *CivilEng*, 4(3), 982–999. <https://doi.org/10.3390/civileng4030053>
- Kassas, K., Adamidis, O., & Anastasopoulos, I. (2022). Interacción estructura-suelo-estructura (SSSI) de edificios adyacentes con cimentaciones superficiales sobre suelo licuable. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(10), 2315–2334. <https://doi.org/10.1002/eqe.3665>
- Katsimpini, P. S., Papagiannopoulos, G., & Hatzigeorgiou, G. (2024). Análisis no lineal de puentes considerando la interacción suelo-estructura y los efectos de las ondas viajeras bajo cargas sísmicas combinadas de tren y falla cercana. *Applied Sciences*, 14(24), 11688. <https://doi.org/10.3390/app142411688>
- Kar, S. S., Athawale, A. A., Bhushan, M., & Roy, L. B. (2023). Interacción dinámica suelo-estructura de edificios de varios pisos utilizando el método de elementos finitos y regresión por máquina de probabilidad minimax. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 13(4), 11170–11176. <https://doi.org/10.48084/etasr.5870>
- Kim, H.-U., Ha, J.-G., Ko, K.-W., & Kim, D.-S. (2020). Optimization of two soil–structure interaction parameters using dynamic centrifuge tests and an analytical approach. *Sustainability*, 12(17), 7113. <https://doi.org/10.3390/su12177113>
- Kurniawandy, A., Tiara, C. D., Aryanti, R., & Aminsya, M. (2025). Influencia de la interacción suelo-estructura en el edificio de 4to piso. *E3S Web of Conferences*, 604, Article 13003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560413003>
- Lanes, R. M., Greco, M., & Almeida, V. S. (2023). Procedimiento de interacción viscoelástica suelo- estructura para edificaciones sobre cimientos considerando asentamientos de consolidación. *Buildings*, 13(3), 813. <https://doi.org/10.3390/buildings13030813>

- 
- López M., N. A., López M., J., Pérez M., G. E., Alviar M., J. D., Romero R., C. A., Montesinos M. V., Vielma P., J. C., & Castro P., C. F. (2022). Comparación de diseño estructural entre dos edificaciones de concreto armado de seis niveles utilizando interacción suelo-estructura en el rango lineal. *Ingeniería e Investigación*, 42(1). <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n1.86819>
- Lu, S., Zhao, D., Dai, J., Yin, H., & Wang, L. (2023). Shaking table test and numerical simulation study on tunnel-soil-bridge pile structure interaction system. *Sustainability*, 15(1), 286. <https://doi.org/10.3390/su15010286>
- Nautiyal, A., & Singla, S. (2024). Impacto de la interacción suelo-estructura en el desempeño de pilares de puentes durante eventos sísmicos: un análisis paramétrico. *The IUP Journal of Structural Engineering*, 17(3), páginas. <https://doi.org/#62J-2024-07-02-01>
- Patrício, J. D., Jafarian Kafshgarkolaei, H., Gusmão, A. D., Ferreira, S. R. M., Silva, F. A. N., Azevedo, A. C., & Delgado, J. M. P. Q. (2024). Análisis de asentamiento de edificios con paredes de hormigón utilizando interacciones suelo-estructura y modelado de elementos finitos. *Buildings*, 14(3), 746. <https://doi.org/10.3390/buildings14030746>
- Sotiriadis, D., Klimis, N., Margaritis, B., Sextos, A. G., y Pelekis, P. (2022). Correlación mejorada entre los movimientos del terreno en cimentación y en campo libre mediante fuertes registros de movimiento y análisis de interacción cinemática suelo-estructura. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(4), 725–743. <https://doi.org/10.1002/eqe.3588>
- Stewart, J. P., Seed, R. B., & Fenves, G. L. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings. II: Empirical findings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(1), 38–57. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:1\(38\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:1(38))
- Tekin, G., & Gencer, S. (2024). El problema de interacción dinámica suelo-cimentación-estructura en el dominio del tiempo utilizando un modelo de elementos discretos. *Applied Sciences*, 14, 10994. <https://doi.org/10.3390/app142310994>

- Teberik, S., Celik, F., y Aydin, E. (2025). Influencia de los sistemas de arriostramiento en los parámetros de diseño de pilotes: Un enfoque de interacción estructura-suelo-pilote. *Buildings*, *15*(5), 764. <https://doi.org/10.3390/buildings15050764>
- Tao, W., Fu, J., & Li, Y. (2024). La posibilidad de efectos perjudiciales sobre la estructura del suelo- interacción en el diseño sísmico debido a un cambio en la frecuencia del sistema. *Applied Sciences*, *14*, 7519. <https://doi.org/10.3390/app14177519>
- Uzun, S., & Ayvaz, Y. (2024). Implementación de PMDL y DRM en OpenSees para el análisis de la interacción suelo-estructura. *Applied Sciences*, *14*(18), 8519. <https://doi.org/10.3390/app14188519>
- Visintainer, M. R. M., & Braun, A. L. (2023). Investigación numérica sobre la respuesta eólica de un edificio de gran altura considerando la interacción suelo-estructura. *Ciência e Natura*, *45*(spe. n. 3), e74430. <https://doi.org/10.5902/2179460X74430>
- Villarreal Castro, G. A., Cerna Vásquez, M. A., & Espinoza Torres, C. U. (2021). Interacción sísmica suelo-estructura en edificaciones con muros de ductilidad limitada sobre plateas de cimentación. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, *26*(1), 153–178. <https://doi.org/10.24133/riie.v26i1.1967>
- Won, J., & Shin, J. (2021). Enfoque basado en aprendizaje automático para daños sísmicos: Método de predicción de estructuras de edificación considerando interacción suelo-estructura. *Sustainability*, *13*(8), 4334. <https://doi.org/10.3390/su13084334>
- Yan, X.-Y., Cao, S.-S., & Zhao, Z. (2024). Shaking tables test on seismic responses of a long-span rigid- framed bridge considering traveling wave effect and soil–structure interaction. *Buildings*, *14*(5), 1432. <https://doi.org/10.3390/buildings14051432>
- Yanik, A., & Ulus, Y. (2023). Consideración de la interacción suelo-estructura para estructuras aisladas en la base bajo excitación sísmica. *Buildings*, *13*(4), 915. <https://doi.org/10.3390/buildings13040915>
- Zajac, M., Kuzniar, K., & Tatara, T. (2024). Influence of subsoil and building material properties on mine-induced soil–structure interaction effect. *Applied Sciences*, *14*(10), 4164. <https://doi.org/10.3390/app14104164>

- Zhao, M., Ding, Q., Cao, S., Li, Z., & Du, X. (2024). Análisis de la interacción suelo-estructura sísmica a gran escala mediante modelado eficiente de elementos finitos y un algoritmo explícito paralelo de múltiples GPU. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(12), 1886–1908. <https://doi.org/10.1111/mice.13163>
- Zhu, Y., Wang, W., Xu, Z., Chen, J., & Zhang, J. (2025). Análisis numérico hidromecánico de una excavación profunda de doble pared en un estrato multiacuífero considerando la interacción suelo-estructura. *Buildings*, 15(6), 989. <https://doi.org/10.3390/buildings15060989>

**ANEXO 01**

<b>AUTOR(ES)</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>RESULTADOS</b>
Michael Rene Mix Visintainer y Alexandre Louis Braun	El estudio utiliza un modelo numérico particionado. Se emplean técnicas avanzadas de elementos finitos con discretización mediante elementos hexaédricos y un enfoque arbitrario lagrangiano-euleriano (ALE).	Obteniendo que la ISE afecta significativamente la respuesta del edificio al viento. La presencia del suelo contribuye a reducir la inestabilidad aeroelástica causada por el desprendimiento de vórtices.
Nelson A. López M. D, Gabriela E. Perez M. D, Christian F. Castro P, Juan C. Vielma P, Leonardo J. López M. D, Jose D. Alviar M, Carlos A. Romero R, David P. Guerrero C. D, y Vanessa V. Montesinos M	El estudio transforma el sistema de cimentación en resortes equivalentes para evaluar la ISE en el rango lineal.	Se observa un aumento en los períodos estructurales cuando se integra la ISE. Hay un aumento en la cantidad de estribos por metro lineal en columnas (3%-11%) y vigas (5%-45%).
Ashish Bahuguna y Mohd Firoz	El estudio desarrolla un modelo analítico basado en plasticidad para la ISE en medios heterogéneos. Se emplea un enfoque de masa concentrada.	La ISE reduce la respuesta sísmica en algunos casos, pero puede amplificarla en terremotos de campo cercano, La metodología analítica es computacionalmente más eficiente que el enfoque FEM, reduciendo el tiempo de cálculo de horas a minutos.
Duaa AlJeznawi, Musab Aied Qissab AlJanabi y Luis Filipe Almeida Bernardo	Se enfatizan los enfoques clave para analizar los problemas de interacción sísmica suelo-estructura (SSI), investigando la interacción dinámica entre la estructura y el suelo mediante diversas metodologías de investigación.	Este estudio incorpora múltiples publicaciones y ofrece una revisión a fondo del estado actual de los estudios dinámicos de SSI considerando las estructuras circundantes.

Francisco Calderín-Mestre, David Almenarez-Labanino y Daniel Boada-Fernández	Se realiza un análisis comparativo entre los códigos de diseño sísmico ASCE 7-10 (EE.UU.) y No.103-BIS (México), utilizando modelos simplificados.	La inclusión de la ISE reduce el cortante basal en semejanza con el análisis convencional. Se observa un incremento en los desplazamientos horizontales cuando se considera la flexibilidad del suelo.
Qiang Guo, Minyao Xu, Guizhong Xu y Huiling Xu	El estudio desarrolla un modelo unidimensional para analizar la interacción fluido-estructura-suelo en tuberías de agua empotradas en suelo compactado. Se emplea el método de volúmenes finitos (FVM).	La ISE modifica la respuesta dinámica de la tubería, afectando la presión hidráulica y la tensión estructural, - La inclusión del PSC reduce la vibración axial, mejorando la estabilidad del sistema.
Saurabh Shekhar Kar, Anupama Arunkumar Athawale, Mani Bhushan y Lal Bahadur Roy	El estudio analiza la interacción dinámica suelo-estructura (SSI) en edificios de varios pisos mediante dos enfoques Método de Elementos Finitos (FEM) y Regresión de Máquina de Probabilidad Minimax (MPMR).	La ISE influye en la respuesta sísmica, modificando desplazamientos y esfuerzos internos. Su consideración resulta clave en el análisis estructural, ya que afecta tanto la distribución de cargas como el comportamiento del sistema constructivo.
Kuo Hung Chao, Yu-Chi Sung, Xiao-Qin Liu y Chin-Kuo Su	El estudio propone un método basado en la resistencia para evaluar el efecto del efecto cortante sobre el efecto de la estructura del suelo (SSI) y previene el efecto del SSI en terremotos de campo cercano.	Se observa que la superestructura absorbe la mayor parte de la energía, ejerciendo su comportamiento inelástico con efectos menores del SSI.
Sairam Mathukumalli, Lingeshwaran Sunny Agarwal	El análisis del comportamiento sísmico en la zona de contacto entre el terreno y la edificación se realizó mediante el uso del programa SAP2000. La forma en que estos dos elementos se relacionan afecta la temperatura del subsuelo, puesto que cambia el movimiento y hace que la estructura se tense.	Se observa un incremento en los desplazamientos horizontales cuando se considera la flexibilidad del suelo

<p>Yinhang Zhu, Wei Dong Wang, Zhonghua Xu, Jinjian Chen y Ji Zhang</p>	<p>El estudio desarrolla un modelo numérico hidromecánico tridimensional para evaluar el rendimiento de una excavación profunda en un estrato multiacuífero. Se validó el modelo comparando las deflexiones de muro calculadas y medidas</p>	<p>Al incrementarse la tasa de bombeo, se mejora la tensión efectiva, lo cual demuestra que mantener la integridad del suelo es clave para diseñar excavaciones profundas más seguras.</p>
<p>Ankit Nautiyal y Sarita Singla</p>	<p>Se emplean los programas MIDAS y LPile para modelar y evaluar el impacto de SSI en el desempeño estructural.</p>	<p>Al evaluar los modelos fijos y variables, se identificaron aspectos claves que afectan en la forma y el comportamiento de los puentes durante un sismo.</p>
<p>Sefa Uzun y Yusuf Ayvaz</p>	<p>El análisis de la ISM se realiza típicamente mediante métodos directos o de subestructura. Ambos enfoques implican el uso de modelos numéricos con dominios computacionales incompletos o de orden reducido</p>	<p>Esta investigación contribuye al campo al proporcionar un marco sólido para simular interacciones complejas de ondas sísmicas en problemas 2D</p>
<p>Dimitris Sotiriadis, Nikolaos Klimis, Albahaca Margaris, Anastasios Sextos y Panayotis Pelekis</p>	<p>Se emplea un procedimiento de análisis de subestructuras, verificando expresiones analíticas previas y ampliando modelos de predicción de movimiento del terreno (GMPPM).</p>	<p>Se observa que la SSI reduce la aceleración espectral en estructuras rígidas.</p>
<p>Seyma Teberik, Fatih Celik y Ersin Aydin</p>	<p>Se realizaron experimentos en mesa vibratoria con modelos a escala y análisis numéricos basados en datos experimentales.</p>	<p>Los sistemas de arriostramiento diagonal de acero mejoran la resistencia sísmica, pero pueden aumentar las fuerzas cortantes en la base.</p>
<p>Maciej Zajac, Krystyna Kuzniar y Tadeusz Tatara</p>	<p>El análisis numérico se centra en el análisis de la transferencia de vibraciones desde el suelo libre hasta la base del edificio para el techo de un edificio de pendiente normal.</p>	<p>Se emplea un modelo numérico tridimensional de elementos finitos (FEM 3D), Se emplea un modelo numérico tridimensional de elementos finitos (FEM 3D).</p>

Alex Kurniawandy, Cindy Dayu Tiara, Riza Aryanti y Muhammad Aminsyah	Se emplean análisis dinámicos lineales con espectros de respuesta sísmica y análisis pushover no lineal para evaluar el comportamiento estructural.	La fuerza cortante basal disminuye en un 18% en X y un 16% en Y. El desplazamiento máximo aumenta en un 29% en X y un 24% en Y.
Zhishan Li, Xiuli Du	Modelado numérico del análisis SSI sísmico a gran escala para superar las limitaciones del software existente de análisis de elementos finitos (FEA).	Los métodos actuales de modelado de elementos finitos presentan dificultades para establecer modelos refinados de SSI a gran escala. En este artículo, se presenta un método de elementos finitos (MEF) explícito.
Jongmuk Won y Jiuk Shin	El estudio propone un modelo basado en redes neuronales artificiales (RNA) para predecir daños sísmicos en estructuras considerando la ISE.	Se observó que la flexibilidad del suelo amplifica los desplazamientos estructurales, afectando la seguridad del edificio.
Panagiota S. Katsimpini, George Papagiannopoulos y George Hatzigeorgiou	El estudio desarrolla un modelo numérico integral que incorpora la ISE, la propagación de ondas sísmicas puede amplificar o atenuar la respuesta estructural, dependiendo de la velocidad de la onda y las condiciones del suelo.	La inclusión de SSI reduce la aceleración espectral en estructuras rígidas, mejorando la resiliencia del puente.
Elisavet Chorafa, Eumorfia Skrapallou y Panagiota Katsimpini	Se realizaron análisis no lineales de historia temporal en pórticos de 2, 4 y 6 pisos bajo cinco secuencias sísmicas reales y diversas condiciones de suelo.	La inclusión de SSI reduce las ratios de deriva y las aceleraciones, pero aumenta los períodos y desplazamientos. Los edificios más altos presentaron ratios de deriva entre pisos más bajos, mientras que el segundo piso experimentó el mayor desplazamiento en todas las alturas del edificio.

Hyun-Uk Kim, Jeong-Gon Ha, Kil-Wan Ko y Dong-Soo Kim	El estudio propone un procedimiento analítico para optimizar dos parámetros clave de la interacción suelo-estructura (SSI)	La profundidad efectiva óptima del perfil se establece en cuatro veces el radio de la cimentación, lo que mejora la exactitud en la estimación de la respuesta sísmica.
Shaolin Chen, Hao Lv y Guoliang Zhou	El estudio propone el método PASSI para mejorar la eficiencia computacional del análisis de la ISE.	Se observa que el método particionado mejora la precisión en comparación con enfoques tradicionales.
Mehndi Ebadi-Jamkhaneh	El estudio analiza la respuesta sísmica de dos edificios de 20 pisos con diferentes sistemas de soporte de carga lateral, considerando la ISE.	Los muros de corte mejoran la resistencia sísmica hasta en un 56% en comparación con estructuras sin refuerzo lateral.
Ayman Abd-Elhamed y Sayed Mahmoud	El estudio modela la interacción fluido-estructura-suelo mediante un sistema de tres grados de libertad para el fluido y un modelo de masa-resorte-amortiguador para el suelo/cimentación	- La interacción suelo-tanque amplifica la respuesta inducida, afectando el cortante basal, el momento de vuelco y el desplazamiento de las masas convectiva e impulsiva.
Genner Alvarito Villarreal Castro, Marco Antonio Cerna Vásquez y César Ubaldo Espinoza Torres	El estudio analiza la ISE en edificaciones con muros de ductilidad limitada, considerando la flexibilidad de la cimentación. Se emplean modelos dinámicos,	La flexibilidad de la cimentación incrementa los desplazamientos laterales hasta un 35%. - Se observa un aumento del período de vibración en un 24.67% al considerar la ISE.
Mohammad Bakhshandeh y Meisam Mahboubi Niazmandi	Se emplea modelado numérico con el método de elementos finitos (FEM) en ABAQUS	La respuesta sísmica reduce a medida que crece el número de pisos y la irregularidad. La ISE amplifica los efectos sísmicos, especialmente en suelos blandos.

Jonathan P. Stewart, Raymond B. Seed y Gregory L. Fenves	El estudio utiliza análisis de identificación de sistemas para evaluar los efectos de la ISE.	La interacción inercial puede ser significativa, afectando el alargamiento del período fundamental y el amortiguamiento de la cimentación.
Jonny D. Patricio, Alexandre D. Gusmao, Silvio R. M. Ferreira, Fernando A. N. Silva, Hassan Jafarian Kafshgarkolaei, Antonio C. Azevedo y João M. P. Q. Delgado	Se realizó un retroanálisis del módulo de elasticidad para obtener parámetros geotécnicos y predecir asentamientos mediante la teoría de elasticidad.	El módulo de elasticidad disminuyó a medida que avanzaba la construcción, siendo las partes del vertedero más vulnerables. Los asentamientos por fluencia representaron aproximadamente el 20% del total en algunos bloques.
Shasha Lu, Dongxu Zhao, Junwu Dai, Hang Yin y Laigui Wang	Se introduce un modelo constitutivo de Kelvin para abordar la no linealidad del suelo y se diseñan ocho condiciones de trabajo para evaluar la respuesta sísmica del sistema.	El pilote del puente atenúa las respuestas dinámicas del túnel lateral y del suelo cercano. La presencia de ambas estructuras incrementa la fuerza interna en las estructuras adyacentes.
XiaoYu Yan , ShanShan Cao y Zhuo Zhao	En este trabajo, se diseñó y fabricó un modelo de puente rígido de gran luz, a escala 1/10, y se realizó un ensayo de mesa vibratoria considerando el efecto de las ondas viajeras y la interacción sueloestructura	El método de ensayo de subestructura en tiempo real descrito en este artículo resolvió los problemas de que el experimento tradicional de caja de suelo no se puede aplicar a la prueba de un modelo a gran escala.
Arcan Yanik y Yalcincan Ulus	El estudio implementa analíticamente la ISE en estructuras con aislamiento sísmico en la base (BI).	La inclusión de SSI reduce la efectividad del sistema de aislamiento sísmico, especialmente en suelos blandos. Se observa que la elongación del período fundamental disminuye la aceleración espectral de la estructura

<p>Konstantinos Kassas, Orestis Adamidis e Ioannis Anastasopoulos</p>	<p>Se emplean análisis hidromecánicos acoplados utilizando el modelo constitutivo PM4Sand.</p>	<p>La interacción SSI reduce el asentamiento de los edificios, pero incrementa la rotación, afectando la estabilidad estructural.</p>
<p>Jinsong Gan, Peizhen Li y Qiang Liu</p>	<p>Se emplea el modelo de Davidenkov para el comportamiento del suelo y un límite artificial de resorte viscoso.</p>	<p>La respuesta sísmica estructural puede aumentar o disminuir debido a la SSI, dependiendo más de las características estructurales que de la ubicación de los edificios.</p>
<p>Gulcin Tekin y Soner Gencer</p>	<p>El estudio desarrolla un modelo dinámico simplificado para analizar la ISE en el comportamiento sísmico de las estructuras.</p>	<p>Cimentaciones más grandes (20 m × 20 m y 30 m × 30 m) aumentan la respuesta sísmica, haciendo que la estructura se comporte como una base fija. Cimentaciones más pequeñas (10 m × 10 m) incrementan la flexibilidad estructural, especialmente en suelos blandos.</p>
<p>Weifeng Tao, Jia Fu y Yugang Li</p>	<p>Se desarrolla un modelo simplificado compuesto por un oscilador de un grado de libertad (SDOF).</p>	<p>La ISS reduce la amplitud pico de la respuesta estructural en el control de la frecuencia. Sin embargo, en el dominio del tiempo, la ISS puede amplificar las respuestas dinámicas en un 15-20% de los casos analizados.</p>
<p>Hamza Gullu y Ozan Natur</p>	<p>Se emplea una simulación tridimensional de elementos finitos, considerando la variación no lineal de la rigidez del suelo.</p>	<p>Se observa una reducción en la aceleración máxima capturada en la cimentación y una disminución de la demanda de esfuerzo cortante basal. Los desplazamientos máximos de planta cambian significativamente en los pisos inferiores, aumentando las derivas entre plantas.</p>
<p>Fujian Yang, Haonan Zhao, Tianchang Ma, Yi Bao, Kai Cao y Xiaoshuang Li</p>	<p>Se emplea un método de análisis numérico tridimensional (3D) en ABAQUS.</p>	<p>La unión del muro del núcleo de hormigón armado con la losa del basamento es una región crítica de concentración de tensiones, con alta sensibilidad a las condiciones del sitio. Las IDR máximas muestran mayor variación en ángulos de incidencia entre 20 y 30 grados, con un efecto más pronunciado en intensidades sísmicas de 0,3 g.</p>

Ricardo Morais Lanes, Marcelo Greco y Valerio da Silva Almeida	Se emplea el Método de Elementos de Contorno (BEM) con la solución fundamental de Mindlin para calcular el desplazamiento.	La metodología propuesta reduce el costo computacional en comparación con modelos convencionales de elementos finitos. Se concluye que la superestructura debe dimensionarse para tolerar esfuerzos adicionales o reforzarse cuando sea necesario.
Valentina Blazón, Shahin Huseynli, Flavia De Luca, Dimitris Karamitros, Rafael De Risi y Enrico Spacone	El estudio utiliza un modelo numérico tridimensional en LS-DYNA para simular el comportamiento de edificios de baja y gran altura frente a movimientos sísmicos con alta frecuencia dominante. Se analizan distintas condiciones de suelo y se compara la respuesta estructural considerando o no la ISE.	Los resultados revelan que la inclusión de la ISE reduce la frecuencia natural y aumenta el amortiguamiento, pero puede amplificar los desplazamientos relativos en estructuras bajas, particularmente cuando la frecuencia del sismo coincide con la del sistema acoplado.
Imtiaz Akbar Najar, Raudhah Ahmadi, Akenn Gbenga Amuda, Raghad Mourad, Neveen El Bendary, Idawati Abu Bakar y Shanshan Tang.	El artículo proporciona una revisión exhaustiva de los métodos analíticos, estadísticos y analíticos para el modelado de la estructura del suelo y describe sus aplicaciones legales e históricas.	Se identifican las limitaciones de las aplicaciones de ISE y se presentan desarrollos recientes, como el uso de aprendizaje automático y soluciones híbridas. Se concluye que, si bien ISE puede mejorar considerablemente la precisión del análisis sísmico, persisten problemas de integración con los códigos de construcción, la verificación de análisis y el alto costo computacional.