

SISTEMAS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE TERREMOTOS

LEONARDO RAMÍREZ GUZMÁN

Gracias a los avances recientes tanto en los métodos numéricos como en la capacidad de cómputo, hoy es posible hacer simulaciones de sistemas complejos con resoluciones útiles para aplicaciones tecnológicas e ingenieriles. Desde los primeros cálculos utilizando diferencias finitas hasta las simulaciones más elaboradas con otros métodos de dominio, el modelado numérico desde la fuente sísmica hasta el impacto en los edificios ha tenido un desarrollo vertiginoso en

la academia, pero una aplicación limitada en la práctica de la ingeniería sísmica. Lo anterior debido, principalmente, al bajo contenido de frecuencias útiles en las señales sintéticas que podían obtenerse con equipos de cómputo convencionales, a diferencia de la resolución alcanzada en simulaciones utilizando supercomputadoras de cientos de miles de procesadores (e. g. Ichimura *et al.*, 2015). Sin embargo, con el incremento del poder de cómputo en paralelo, sobre todo con una reducción en los costos, considerando tanto servicios en línea como en servidores comunes en los despachos de análisis, la brecha entre la academia y la práctica se ha reducido considerablemente.

Uno de los problemas en los que se ha centrado la investigación de la UIS, es reducir la incertidumbre de las estimaciones del movimiento del suelo y establecer en tiempo

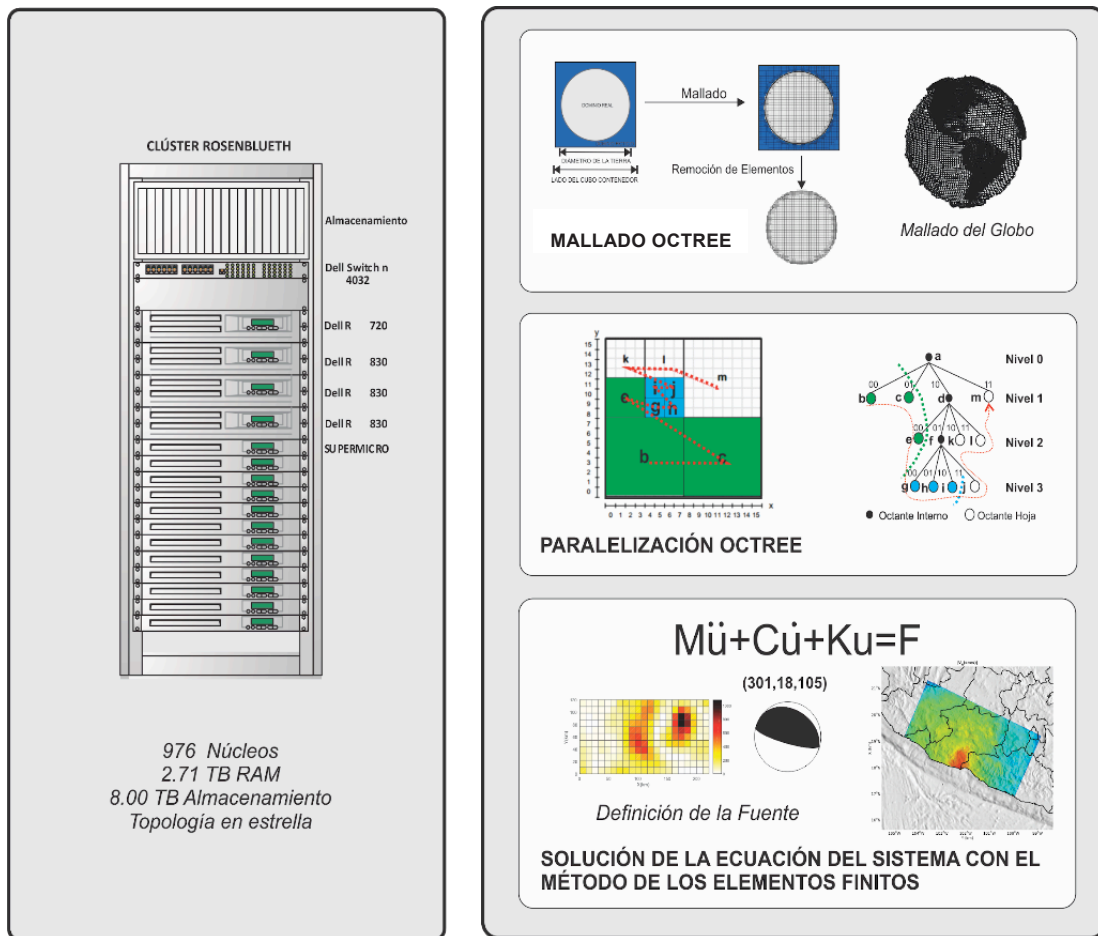


Figura 1. Infraestructura de cómputo para el modelado de terremotos de la UIS

casi real la intensidad y algunos otros parámetros de interés para la determinación del riesgo asociado a sismos; otros aspectos geofísicos como la determinación de estructura y comprensión del fenómeno han sido el motor en otras áreas. En especial en México, es importante disponer de estimaciones del movimiento por el elevado peligro sísmico. El peligro es atribuible a la compleja tectónica, a la estructura de nuestro país y a los efectos de sitio. Así, el modelado de terremotos requiere de un conocimiento de la fuente, de la estructura cortical y somera para garantizar cálculos realistas de la respuesta dinámica del suelo y de determinar tanto las fuerzas como los desplazamientos a las que las obras civiles se enfrentan ante la ocurrencia de un sismo, el fin último de nuestro trabajo.

Todos los temas mencionados han sido objeto de investigación en el Instituto de Ingeniería, los cuales recibieron un impulso importante después de los sismos de septiembre de 1985 y recobraron relevancia después de los eventos que afectaron el Sureste y el Centro del país en septiembre de 2017. Así, los modelos desarrollados en la UIS toman ventaja de la experiencia y conocimiento acumulado, integrando la información disponible y generando una plataforma computacional para efectuar los cálculos más detallados de la propagación de ondas y sus efectos en estructuras realizadas

sobre el país, para que en un futuro cercano puedan integrarse los resultados a la práctica ingenieril.

Actualmente la UIS cuenta con infraestructura física y de *software* para realizar simulaciones de terremotos. El Centro de Datos de la Unidad de Instrumentación Sísmica cuenta con el clúster Rosenblueth, con 976 núcleos en arreglos de 64 por servidor (2-2.3Ghz) y topología de estrella, 2.1TB en RAM con almacenamiento de 8TB. Además, se tiene implementado el programa de cómputo HERCULES (Bielak *et al.* 2010, Ramírez-Guzmán *et al.* 2015), el cual es altamente eficiente para la solución de problemas de propagación de ondas. HERCULES construye y resuelve la propagación de ondas debidas a diversos tipos de fuentes (explosiones, dislocaciones y fuerzas) utilizando una malla basada en la estructura de datos octree (ver e. g. Meagher, 1980). Una de las ventajas fundamentales que ofrece el tipo de mallado mencionado es la similitud geométrica de los elementos que la componen, reduciendo sustancialmente los requisitos de memoria (o cálculos de la matriz de rigidez durante cada iteración) empleados en métodos estándar de elementos finitos. La selección de la estructura mencionada tiene ventajas adicionales en cuanto a la facilidad de paralelización, al aglutinar elementos que cubren un volumen continuo seleccionando las hojas en la representación del árbol del octree. Las figuras 1 y 2 ilustran el sistema de modelado de la UIS y una simulación, respectivamente.

La construcción de la malla, uno de los retos más importantes en cualquier implementación numérica del método de los elementos finitos, obedece a criterios impuestos en el programa que garantizan la correcta representación de la propagación de ondas en medios altamente heterogéneos. Los modelos, que contienen la distribución espacial de las propiedades elásticas y de amortiguamiento, varían en calidad y detalle dependiendo de la zona de interés. Recientemente, Juárez-Zúñiga y Ramírez-Guzmán (2015), haciendo una recolección de modelos previos, construyeron el modelo más detallado que se tiene de la zona centro y sur del país utilizando una técnica de optimización robusta y toda la información disponible de los experimentos realizados por la UNAM y las bases de datos del Servicio Sismológico y la UIS. La figura 3 muestra algunos cortes del modelo cortical de Juárez-Zúñiga y Ramírez-Guzmán (2016) que utilizamos de manera rutinaria para calcular el movimiento del terreno debido a sismos.

Sin duda las experiencias vividas durante el mes de septiembre de 2017 tienen y tendrán, junto con los eventos

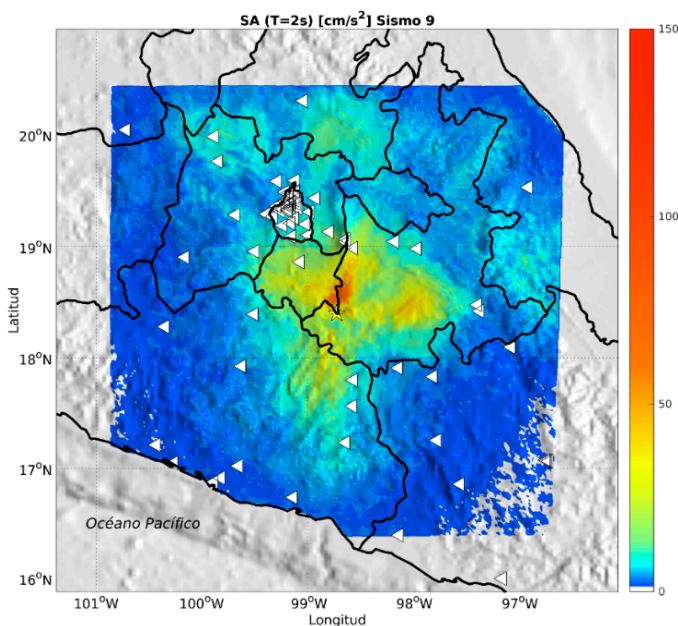


Figura 2. Aceleración espectral para T=2 s de la simulación del sismo del 19 de septiembre de 2017

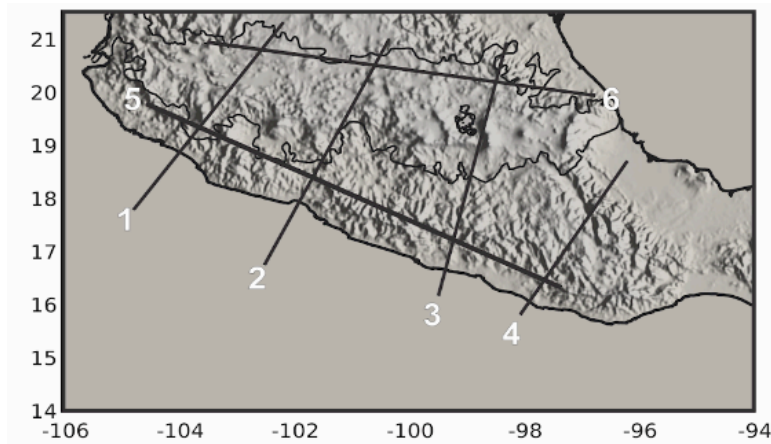
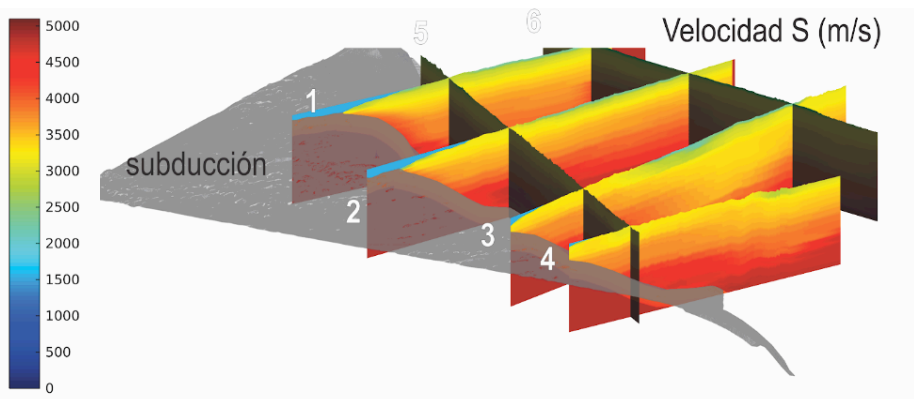
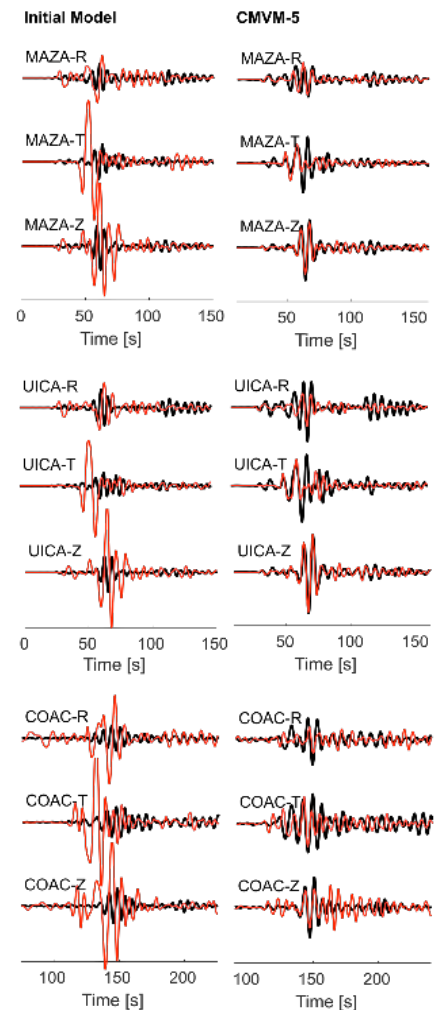


Figura 3. Modelo del Centro-Sur de México



de 1985, una influencia importantísima en la dirección que tome la investigación en sismos en nuestro país. En un esfuerzo por comprender algunos efectos relacionados con la propagación de ondas hemos modelado a resolución de 0-1Hz la propagación del sismo del 19 de septiembre de 2017. El cálculo requirió la generación de una malla de aproximadamente 800 millones de elementos. En la figura 2, se ilustran las aceleraciones espectrales (SA) para un periodo de $T=2$ s y 5% de amortiguamiento, i. e. la respuesta máxima que tendría un oscilador sometido a la excitación ocasionada por el movimiento del suelo obtenido por la simulación. La SA tiene un patrón complejo y es probable que los efectos topográficos y la heterogeneidad del medio tengan un rol predominante, por lo cual están siendo analizados cuidadosamente por nuestro grupo.

Nuestra investigación ha requerido desarrollos e instalaciones importantes para ejecutar el modelado numérico de sismos. La tarea es grande y requerirán mejoras constantes sobre los modelos y la cobertura de las redes de medición que

permiten verificar nuestras estimaciones, siempre teniendo en mente las aplicaciones que puedan repercutir en la práctica profesional.

Referencias

- Ichimura, T., K. Fujita, S. Tanaka, M. Hori, M. Lalith y Shizawa, y H. Kobayashi (2014). Physics-Based Urban Earthquake Simulation Enhanced by 10.7 BlnDOF \times 30 K Time-Step Unstructured FE Non-Linear Seismic Wave Simulation. International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, SC. 2015.
- Meagher, D. (1980). Octree Encoding: A New Technique for the Representation, Manipulation and Display of Arbitrary 3-D Objects by Computer. Rensselaer Polytechnic Institute (Technical Report IPL-TR-80-111).
- Bielak J., R.W. Graves, K.B. Olsen, R. Taborda, L. Ramírez-Guzmán, S. M. Day, G. P. Ely, D. Roten, T. H. Jordan, P. J. Maechling, J. Urbanic y G. Juve (2010). The ShakeOut Earthquake Scenario: Verification of three simulation sets, *Geophys. J. Int.*, 180, 375–404.
- Juarez-Zúñiga, A. y L. Ramírez-Guzmán (2016). Adjoint-wavefield Tomography of Southcentral Mexico, *GSA Annual Meeting, Denver, Colorado, EUA*, 177-3