

UNA EXCEPCIONAL DEMANDA SÍSMICA Y SUS IMPLICACIONES PARA EL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Modelación del movimiento fuerte derivado del segundo sismo del 24 de junio de 2026 en Venezuela.

DEMANDA SÍSMICA EXCEPCIONAL Y SUS IMPLICACIONES PARA EL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Una interpretación a partir de la modelación del movimiento fuerte derivado del sismo del 24 de junio de 2026 en Venezuela

Gabriel Bernal & Omar-Darío Cardona

1 ALCANCE DEL ESTUDIO

El presente documento constituye un análisis preliminar orientado a caracterizar el movimiento fuerte generado por el segundo terremoto del doblete sísmico ocurrido el 24 de junio de 2026 en Venezuela y la evaluación, mediante modelación física, de los posibles efectos de amplificación local asociados a las condiciones geológicas y geotécnicas del litoral central venezolano.

Ante la ausencia de registros acelerográficos disponibles para este evento, el estudio se basa en simulaciones numéricas del proceso de ruptura, la propagación de las ondas sísmicas y la respuesta dinámica de depósitos de suelo representativos. En consecuencia, los acelerogramas obtenidos no corresponden a registros instrumentales, sino a señales sintéticas consistentes con la información sismológica actualmente disponible y con los principios aceptados de la ingeniería sísmica.

Más que reproducir exactamente el movimiento ocurrido en un punto específico, el objetivo consiste en generar escenarios representativos que permitan interpretar la severidad del movimiento, comprender los mecanismos que pudieron conducir a los daños observados y aportar criterios técnicos para futuras evaluaciones de amenaza sísmica, microzonificación, actualización de espectros de diseño y procesos de reconstrucción resiliente.

2 INTRODUCCIÓN

El 24 de junio de 2026, la región centro-norte de Venezuela fue afectada por una secuencia sísmica de relevancia regional, compuesta por dos eventos principales que generaron niveles significativos de daños y pérdidas económicas y de vidas humanas en amplias zonas del país. Ambos sismos se produjeron dentro del contexto tectónico asociado a la interacción entre las placas del Caribe y Suramérica, una de las fuentes sismogénicas más importantes del norte de América del Sur y responsable de una parte sustancial de la amenaza sísmica que afecta al territorio venezolano.

Si bien ambos eventos forman parte del contexto sísmico reciente y son considerados dentro de la descripción general de la secuencia, este estudio se concentra principalmente en el sismo de magnitud Mw 7.5, debido a que constituye el evento dominante desde el punto de vista de generación de movimiento fuerte y su impacto sobre la infraestructura y edificaciones. La magnitud del evento, su mecanismo de ruptura y su localización relativa respecto a los principales centros poblados del litoral

central venezolano hacen necesario realizar una evaluación detallada de la demanda sísmica generada y de los posibles efectos de segundo orden asociados.

La estimación adecuada de los efectos de un sismo de esta magnitud requiere una caracterización explícita del movimiento fuerte del terreno, entendiendo que numerosos mecanismos geotécnicos y de daño estructural dependen no solamente de parámetros de intensidad simplificados, como la aceleración máxima del terreno (PGA), sino también de la evolución temporal completa del movimiento, su contenido frecuencial, duración efectiva, acumulación de energía y variabilidad espectral. En consecuencia, el análisis aquí desarrollado se fundamenta en la simulación de acelerogramas sintéticos representativos del evento sísmico, permitiendo reproducir de manera consistente las características físicas del movimiento esperado.

Para tal fin se emplea una metodología simplificada de simulación de acelerogramas desarrollada por INGENIAR (Bernal et al. 2026), orientada a la generación eficiente de registros sintéticos de movimiento fuerte con características compatibles con los procesos físicos de ruptura sísmica. La metodología permite reproducir de manera realista el contenido temporal y frecuencial de los acelerogramas, manteniendo simultáneamente una elevada eficiencia computacional que facilita la generación de múltiples realizaciones del movimiento sísmico para diferentes ubicaciones y condiciones de sitio. Este enfoque resulta particularmente adecuado para estudios de evaluación rápida de amenaza y riesgo posteriores a eventos sísmicos de gran magnitud.

La primera parte del análisis se enfoca en la caracterización del movimiento fuerte generado por el sismo de Mw 7.5, sin considerar los posibles efectos acumulativos asociados a réplicas posteriores. A partir de la simulación de acelerogramas y de la estimación de parámetros de intensidad derivados, se evalúan los niveles de demanda sísmica esperados en diferentes sitios del litoral central venezolano. Este estudio se centra en las poblaciones de Catia La Mar, La Guaira y Caraballeda, debido a su elevada concentración urbana y presencia de condiciones geológicas susceptibles a fenómenos de amplificación local y degradación de resistencia de los materiales superficiales ante la acción sísmica.

Sobre estas áreas se desarrolla posteriormente una evaluación específica de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo asociados a los abanicos aluviales y conos de deyección que conforman gran parte de la planicie costera del estado La Guaira. El análisis considera la propagación unidimensional de las ondas sísmicas a través de perfiles representativos del subsuelo, con el objetivo de estimar la modificación del movimiento incidente y cuantificar los efectos locales de sitio que puedan influir sobre la severidad de la demanda sísmica en superficie.

Los resultados de respuesta dinámica constituyen la base para la evaluación del potencial de licuación del suelo inducido por el sismo. Para ello se analizan las condiciones de sollicitación cíclica generadas por el movimiento fuerte, así como la susceptibilidad de los depósitos presentes dentro de los abanicos aluviales, considerando las características geotécnicas y estratigráficas disponibles para la zona de estudio. Este análisis permite identificar sectores potencialmente expuestos a pérdida significativa de resistencia y rigidez de los materiales granulares saturados como consecuencia de la excitación sísmica generada por el evento.

El propósito fundamental de este estudio es contribuir a una mejor comprensión de los procesos físicos asociados al evento sísmico analizado y de los mecanismos mediante los cuales estos pueden traducirse

en afectaciones sobre la infraestructura y el entorno construido. Mediante la caracterización detallada del movimiento fuerte del terreno, los efectos locales de sitio y el potencial de fenómenos geotécnicos inducidos, se busca generar información técnica objetiva que permita fortalecer el conocimiento sobre el comportamiento sísmico de la región y sus implicaciones para la gestión del riesgo de desastres. Así mismo, los resultados obtenidos pretenden aportar elementos de análisis que sirvan de apoyo para futuras acciones de planificación territorial, diseño y reforzamiento de infraestructura, respuesta a emergencias y reducción del riesgo de desastres, contribuyendo a disminuir la vulnerabilidad de las comunidades expuestas y a evitar que eventos de características similares deriven, en el futuro, en consecuencias humanas, sociales y económicas de mayor magnitud.

Utilizando como insumo los resultados de demanda sísmica obtenidos con base en la simulación del movimiento fuerte, la evaluación de efectos locales de sitio y el análisis del potencial de licuación, de este primer análisis, se desarrollará en una próxima entrega una evaluación detallada de daños y pérdidas sobre la infraestructura expuesta mediante la aplicación de modelos de vulnerabilidad física y procedimientos de estimación de pérdidas a nivel individual de edificaciones.

3 DESCRIPCIÓN DEL EVENTO SÍSMICO

El 24 de junio de 2026, dos eventos sísmicos de magnitudes Mw 7.2 y Mw 7.5, respectivamente, ocurrieron de manera casi simultánea en la región centro-norte de Venezuela. Se reportó por parte del USGS una diferencia en el inicio de ambas rupturas de tan solo 38 segundos, y ubicaciones epicentrales casi iguales. El primer terremoto, de magnitud Mw 7.2, se atribuye a la falla de Boconó, la cual se extiende con orientación noroeste-sureste y converge en la zona epicentral con la falla de San Sebastián. Esta última fue la fuente del segundo evento, de magnitud Mw 7.5, y se desarrolla en dirección oeste-este, de forma aproximadamente paralela a la línea de costa en este sector del territorio venezolano. La Figura 1 presenta los mapas de intensidad macrosísmica estimados por el USGS para ambos eventos.

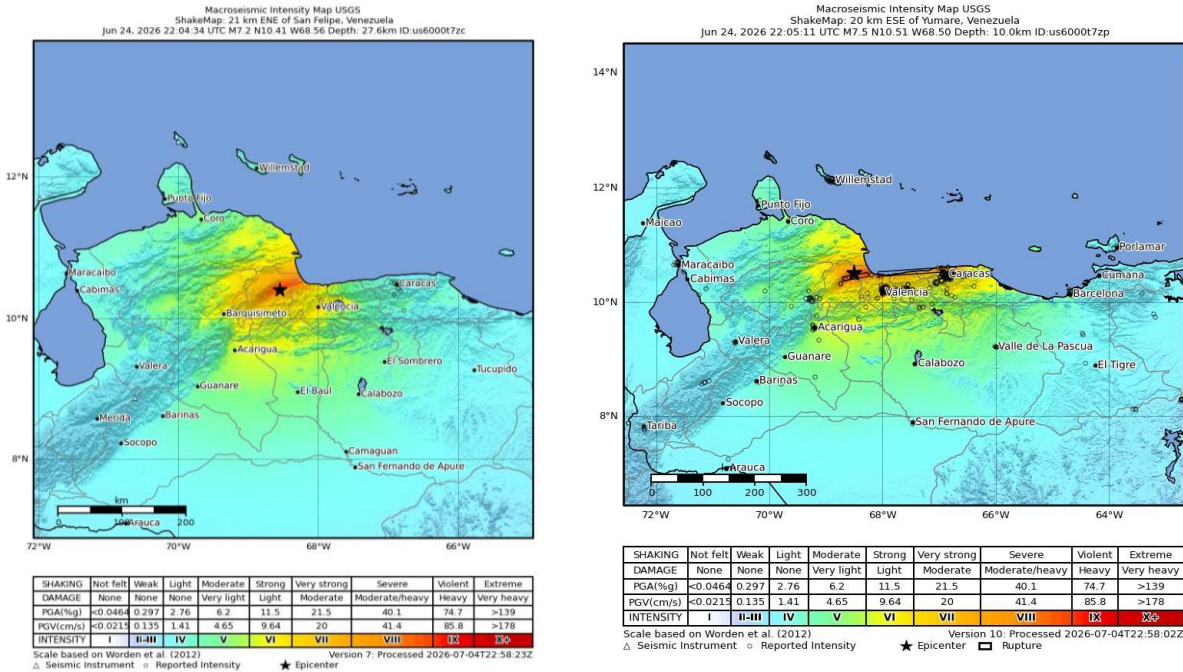


Figura 1. Mapas de intensidad macrosísmica para los eventos ocurridos el 24 de junio de 2026 en el norte de Venezuela. Fuente: USGS

El presente estudio se centra en la modelación del segundo sismo. La evidencia disponible indica que la totalidad de los impactos reportados en Venezuela, particularmente en la zona litoral alrededor del Estado La Guaira, son atribuibles a este evento de magnitud Mw 7.5 y no al sismo que lo antecedió. A continuación, se presentan simulaciones del movimiento fuerte asociado al doblete sísmico, en dos ubicaciones diferentes de Venezuela, con el fin de ilustrar la variada incidencia de ambos temblores como función de la ubicación.

3.1 Importancia del evento de Mw 7.5 en el Estado La Guaira

Si bien se trató de un doblete sísmico y el primero de los eventos alcanzó una magnitud Mw 7.2, considerada elevada, este evento no generó intensidades significativas e incluso pasó desapercibido para parte importante de la población local en el estado La Guaira. Utilizando el mismo enfoque metodológico que se presenta con mayor detalle en las secciones siguientes de este documento, se modeló el movimiento sísmico asociado al doblete en dos ubicaciones muy distantes entre sí: Catia La Mar, en el estado La Guaira, ubicada aproximadamente a 160 km de la zona epicentral, y San Felipe, en el estado Yaracuy, situada aproximadamente a 30 km de la zona epicentral. Esto permite verificar, de manera preliminar, las marcadas diferencias en las implicaciones del doblete en distintas regiones de Venezuela.

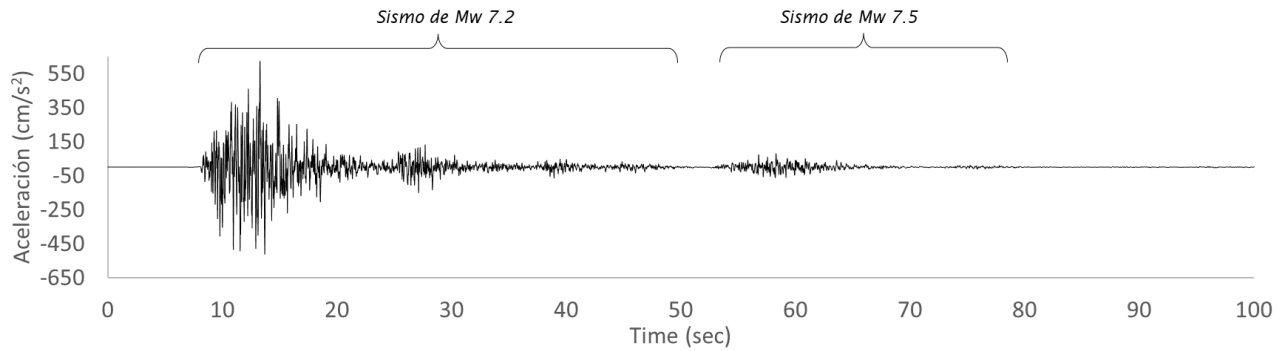


Figura 2. Acelerogramas simulados en San Felipe, Estado de Yaracuy.

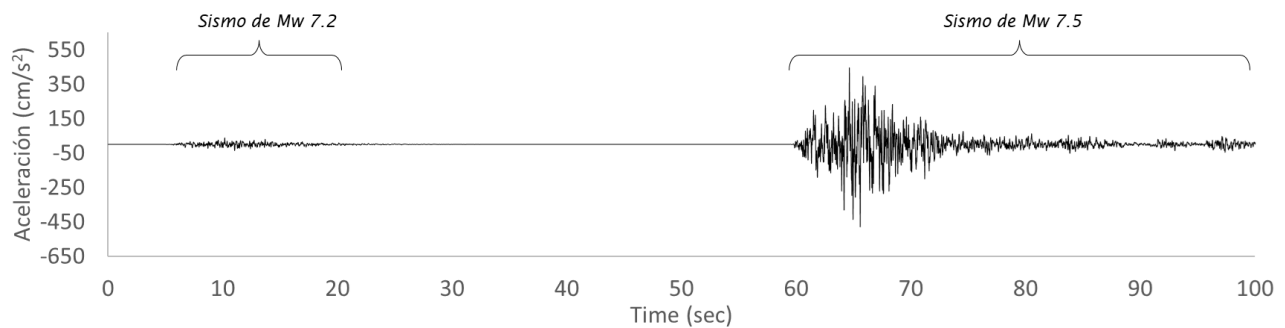


Figura 3. Acelerogramas simulados en Catia La Mar, Estado La Guaira.

Como puede observarse, el movimiento sísmico registrado en San Felipe está completamente dominado por el sismo de Mw 7.2, mientras que en Catia La Mar está dominado por el sismo de Mw 7.5. Esto se debe a que, aunque las coordenadas epicentrales de ambos eventos son muy cercanas, las principales áreas de ruptura se localizan en posiciones significativamente diferentes, como consecuencia de las características particulares de cada proceso de ruptura. No existen, por tanto, evidencias de una influencia significativa del primer sismo sobre los daños observados en el Estado La Guaira. Por esta razón, el análisis se concentrará exclusivamente en el evento de Mw 7.5.

3.2 Características del evento de Mw 7.5

El segundo terremoto ocurrido sobre la falla de San Sebastián, corresponde a un evento de magnitud Mw 7.5, cuya ruptura se propagó con una marcada directividad de oeste a este, siguiendo una trayectoria prácticamente paralela al litoral venezolano. Se trata de un sismo cortical de desplazamiento lateral, relativamente superficial, cuya dislocación principal se concentró frente a las costas del Estado La Guaira. Esta configuración de la fuente sísmica es consistente con la concentración de los efectos más severos observados en el sector, donde se han registrado las consecuencias más significativas asociadas a dicho evento.

Las características básicas de la ruptura se toman de los datos publicados por el USGS, en particular la magnitud, la profundidad, las coordenadas epicentrales y la solución del mecanismo focal (ver Figura 4).

A partir de esta última, es posible establecer los ángulos que definen el plano de ruptura: strike = 86° , dip = 74° y rake = -176° .

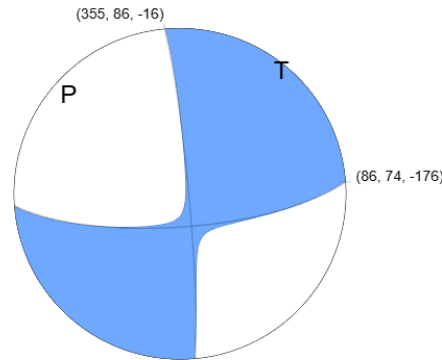


Figura 4. Solución al mecanismo focal del sismo de Mw 7.5. Fuente: USGS.

No obstante, la geometría de ruptura inferida a partir de la información publicada por el USGS no es consistente con la aparente concentración de dislocación frente al Estado La Guaira, la cual resulta evidente, por ejemplo, en las estimaciones de desplazamiento absoluto del terreno publicadas por el servicio Copernicus de la Unión Europea.

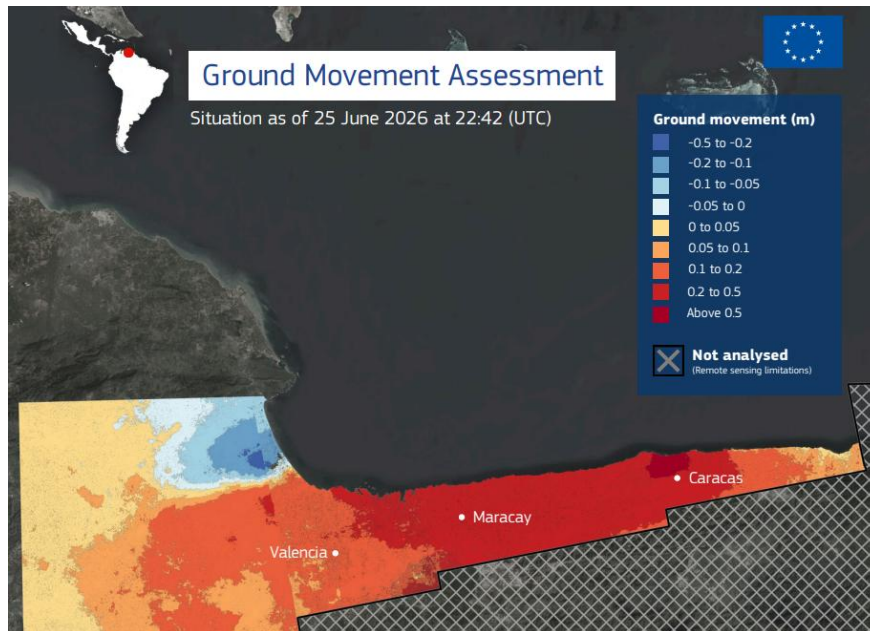
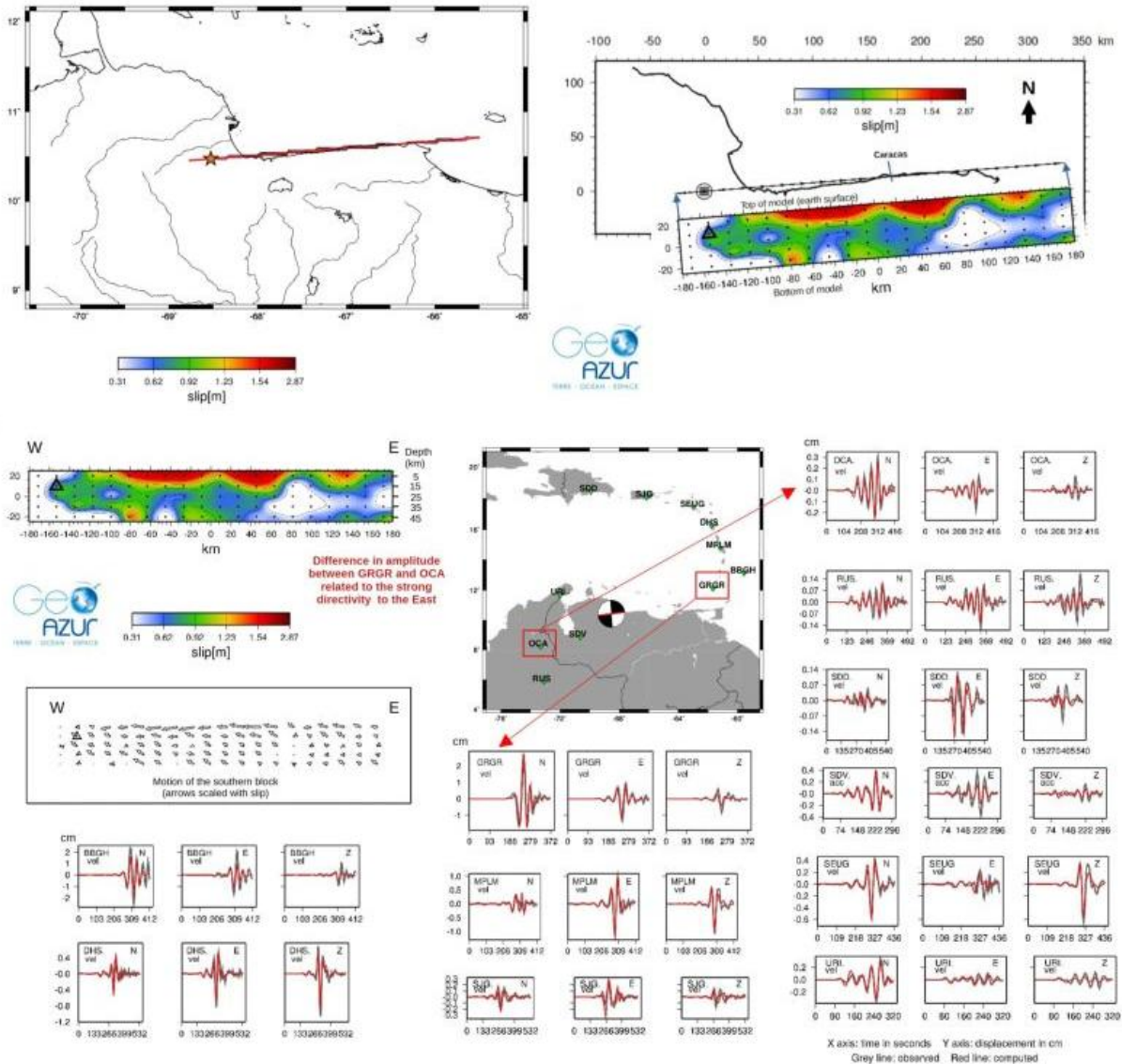


Figura 5. Desplazamiento del terreno derivado de los sismos de Venezuela. Medido el 25 de junio de 2026. Fuente: EU Copernicus.

Alternativamente se cuenta con una solución publicada por el sismólogo Bertrand Delouis (GEOAZUR), obtenida mediante la inversión del campo de desplazamientos medidos en estaciones sismográficas de

Colombia y otros países del Caribe¹. El modelo allí propuesto es consistente con las observaciones de desplazamiento superficial del terreno (ver Figura 5), así como con la marcada concentración de daños en la zona del Estado La Guaira. Por lo tanto, se decidió utilizar en este análisis dicha información para la modelación de del evento. Aunque esta solución es todavía preliminar, constituye actualmente una de las interpretaciones físicamente más consistentes del proceso de ruptura y resulta coherente tanto con las deformaciones superficiales observadas por Copernicus como con la distribución espacial de los daños reportados. Las simulaciones aquí presentadas deberán entenderse como una primera aproximación, susceptible de ser refinada conforme se disponga de nueva información. La Figura 6 resume los principales hallazgos de Delouis con respecto al sismo principal.



¹ Al momento de la entrega de este análisis no se cuenta con registros acelerográficos dentro del territorio venezolano.

Figura 6. Ilustración del proceso de inversión para determinar las características de la ruptura. Fuente: Bertrand Delouis².

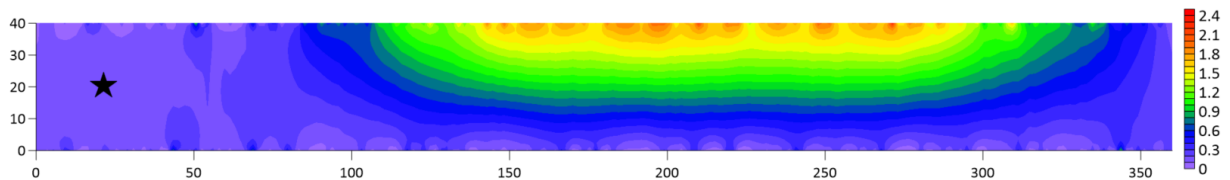
3.3 Parámetros para la simulación

A partir de la información descrita se definieron las siguientes características del evento para su modelación, las cuales se presentan de forma resumida en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la ruptura modelada

Parámetro	Valor	Fuente
Coordenada epicentral (Lat, Lon – WGS 84)	-68.472, 10.4335	USGS
Magnitud (Mw)	7.5	USGS
Momento sísmico (N-m)	2.24E+20	USGS
Profundidad (Km)	23	USGS
Strike (ϕ)	86	USGS
Dip (δ)	74	USGS
Rake (λ)	-176	USGS
Ubicación relativa del hipocentro en el plano fuente. Dirección Dip	0.5	Los autores
Ubicación relativa del hipocentro en el plano fuente. Dirección Strike	0.05	Los autores
Ubicación relativa de la mayor dislocación en el plano fuente. Dirección Dip	0.6	Los autores
Ubicación relativa de la mayor dislocación en el plano fuente. Dirección Strike	0.5	Los autores
Relación de aspecto del rectángulo que encierra el plano fuente	9	B. Delouis
Área de ruptura (Km ²)	14,400	B. Delouis
Tamaño del plano fuente en la dirección Strike (Km)	360	B. Delouis
Tamaño del plano fuente en la dirección Dip. (Km)	40	B. Delouis
Velocidad de propagación de la ruptura (Km/s)	3.8	B. Delouis

Dado que no se dispone de información detallada sobre la distribución de la dislocación al interior de la ruptura propuesta por Delouis, esta se simuló de forma estocástica, obteniéndose el resultado presentado en la Figura 7.



² Enlace a la publicación: https://www.linkedin.com/posts/bertrand-delouis-30a532369_updated-slip-model-obtained-using-regional-share-7479113750709612544--VTi/?utm_source=share&utm_medium=member_android&rcm=ACoAAC7Bx14B7hQFn785BXRTKc_uzD-LWAGYCsM

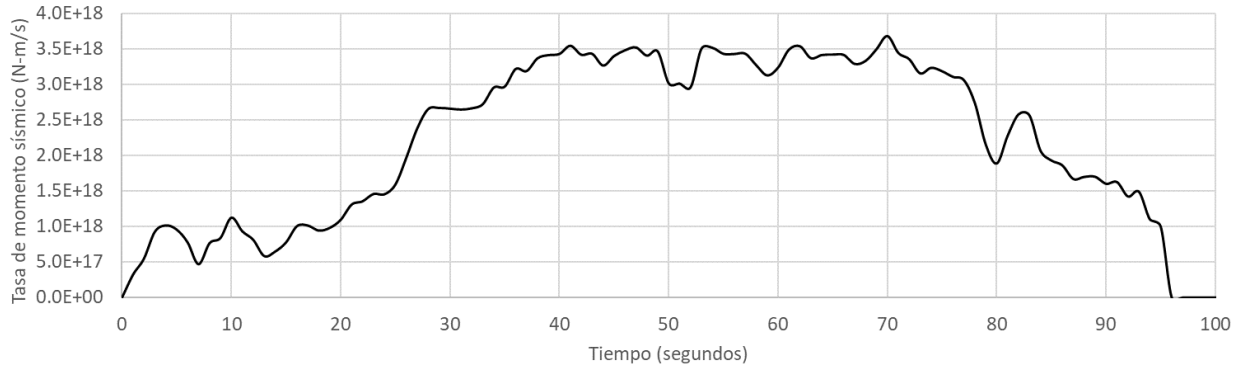


Figura 7. Arriba: Distribución simulada de la dislocación al interior del plano de ruptura (dislocación en metros). Abajo: Función de tasa de liberación del momento sísmico correspondiente a la dislocación simulada.

La extensión regional de la ruptura se presenta en la Figura 8. Como puede observarse, la dislocación simulada se concentra frente a las costas del Estado La Guaira, lo cual es consistente tanto con el modelo sismológico propuesto como con los daños y las consecuencias observadas hasta la fecha.

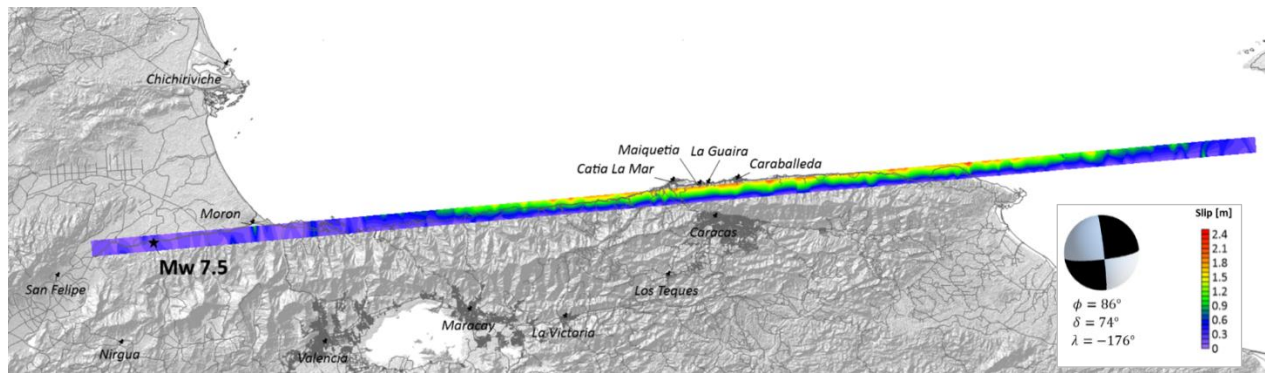


Figura 8. Ruptura simulada. Se observa una importante concentración de la dislocación frente al Estado La Guaira.

3.4 Movimiento fuerte causado a nivel regional

A partir de la información descrita anteriormente, se modeló la intensidad del movimiento fuerte dentro del área de estudio como consecuencia de la ocurrencia del evento simulado. Para ello, se emplearon los preceptos del modelo simplificado de Bernal et al. (2026) y se aplicó el modelo de movimiento fuerte (GMPE) de referencia de Bernal y Cardona (2019). Con fines principalmente ilustrativos, se incluye la condición de suelo superficial en el área de influencia del evento mediante el parámetro V_s30 , obtenido del USGS. Nótese que esta inclusión tiene únicamente un propósito descriptivo y no corresponde a la evaluación de la influencia del suelo, la cual se presenta en la Sección 5.

La Figura 9 muestra el mapa de contornos de PGA calculado para el evento simulado. La distribución regional de la intensidad del movimiento resulta, en términos generales, consistente con los daños observados y constituye una aproximación razonable frente al informe de daños y pérdidas elaborado por INGENIAR y ERN y en forma conjunta con y para UNDRR³.

³ El informe estima pérdidas económicas directas por 37 mil millones de dólares.

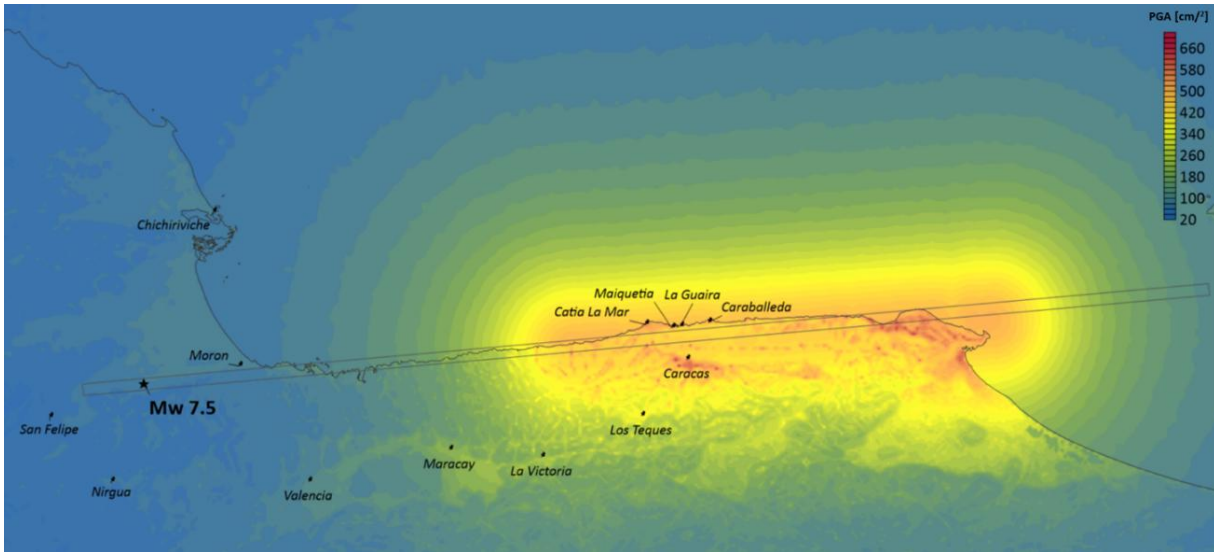


Figura 9. Mapa de distribución espacial del PGA para la ruptura simulada.

4 SIMULACIÓN DE ACELEROGRAMAS A NIVEL LOCAL

Dada la aparente concentración de daños en las poblaciones del Estado La Guaira, se seleccionaron tres ubicaciones de referencia para la simulación de acelerogramas de movimiento fuerte: en las parroquias de *Catia La Mar*, *La Guaira* y *Caraballeda*. Para ello, se emplea el método propuesto por Bernal et al. (2026), el cual permite generar acelerogramas de movimiento fuerte con un contenido frecuencial factible y representativo de las condiciones específicas de la ruptura descritas en la Sección 3. En todos los casos, los acelerogramas simulados corresponden a la componente principal del movimiento. Es decir, el modelo es agnóstico respecto a la orientación del eje de registro.

De la Figura 10 a la Figura 12 se presentan las señales modeladas de aceleración, velocidad y desplazamiento, junto con los correspondientes espectros de respuesta. Las señales modeladas muestran pulsos de velocidad asociados a la directividad, lo cual es consistente con la fuerte directividad de la ruptura en sentido oeste-este y con la direccionalidad positiva hacia las ubicaciones modeladas. La energía se concentra en intervalos de tiempo relativamente cortos para un terremoto de magnitud considerable, con fases intensas de menos de 10 segundos de duración y aportes posteriores de intensidad provenientes de las porciones de la ruptura más alejadas de los sitios evaluados.

Los acelerogramas obtenidos constituyen simulaciones consistentes del movimiento fuerte esperado para las condiciones de ruptura modeladas y no pretenden reemplazar registros instrumentales inexistentes para este evento. Su principal valor radica en representar, mediante fundamentos sismológicos y de ingeniería sísmica, la evolución temporal del movimiento, su contenido frecuencial y los efectos de pulsos de directividad característicos de una ruptura de gran magnitud.

Estas señales permiten explicar, de manera consistente, la severidad de la sacudida observada y constituyen insumos útiles para estudios de vulnerabilidad estructural, evaluación de desempeño sísmico, calibración de espectros de diseño y análisis, e incluso para un eventual insumo que oriente la planificación

urbana, no solo en forma prescriptiva -como se había planteado desde hace varios años atrás-⁴, sino restrictiva, para efectos del ordenamiento territorial y para la reconstrucción.

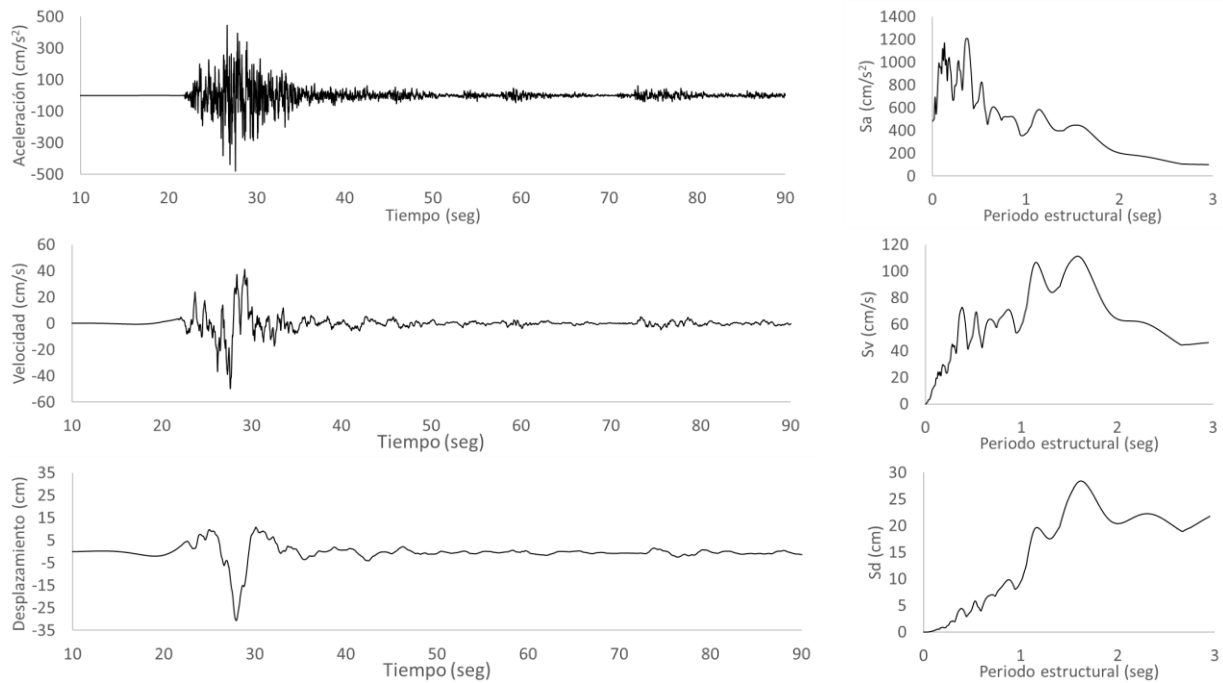
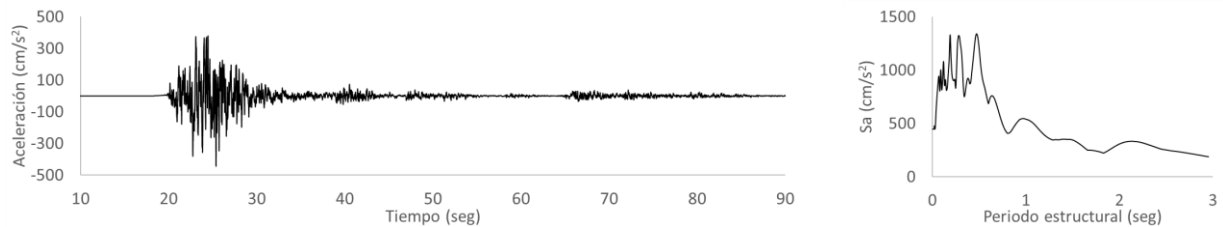


Figura 10. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en Catia La Mar



⁴ La reducción del riesgo de desastres en la planificación urbana. Caso de estudio: la parroquia Caraballeda en el Estado Vargas. Ketty C. Mendes <https://ingeniar-risk.com/wp-content/themes/nattal/documentos/06-Tesis-Ketty-Mendes.pdf>.

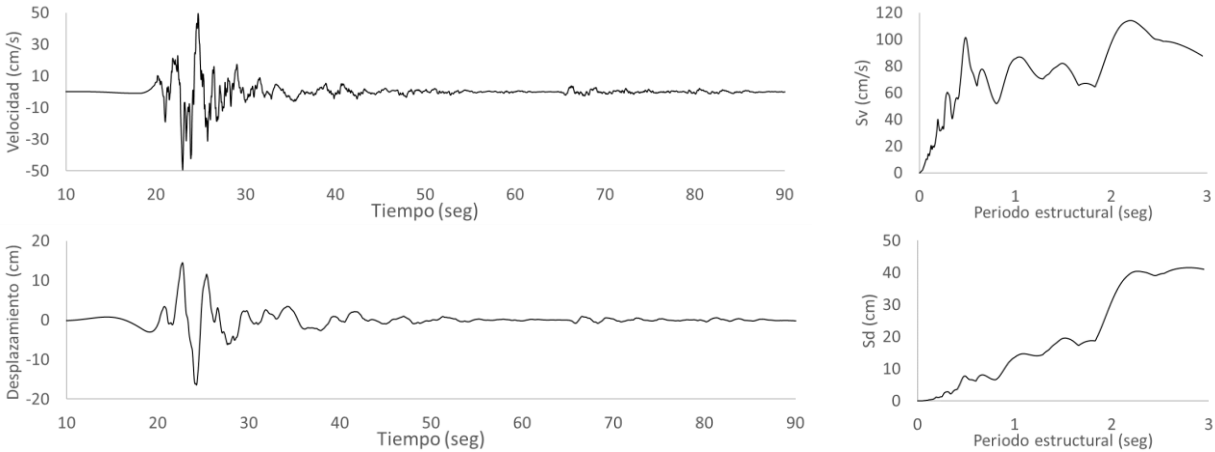


Figura 11. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en La Guaira

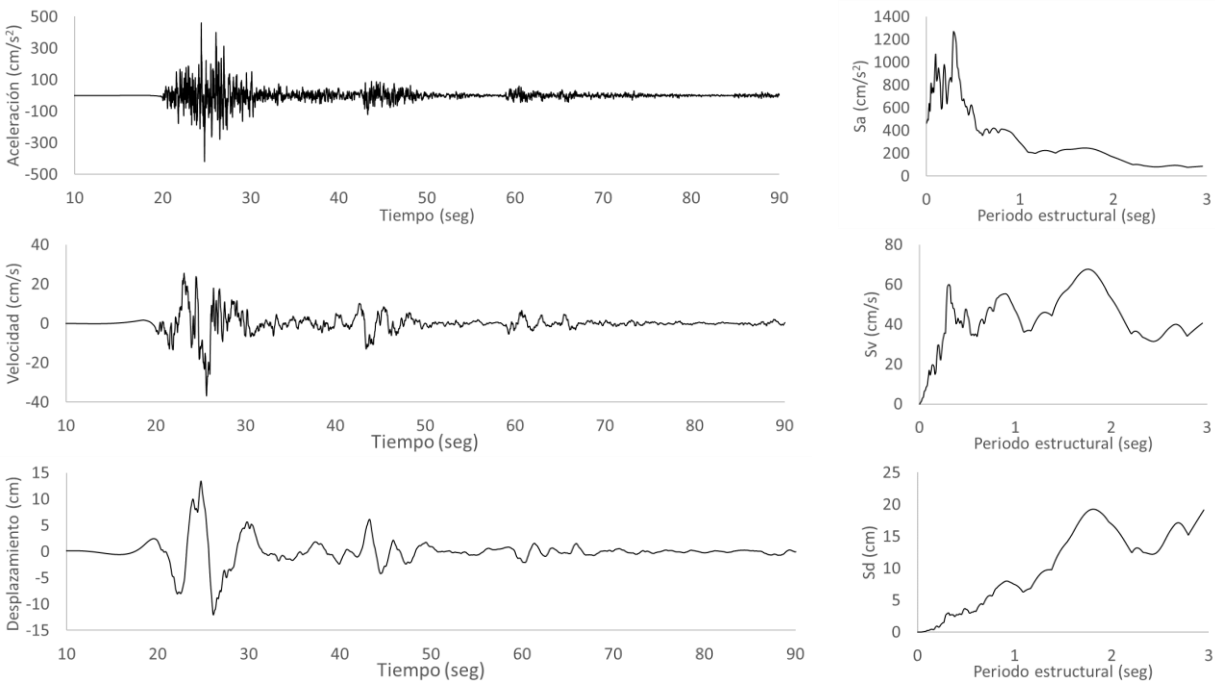


Figura 12. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en Caraballeda

5 MODELACIÓN DE LA RESPUESTA LOCAL DE DEPÓSITOS ALUVIALES

Es ampliamente conocido que muchas de las poblaciones del litoral costero de Venezuela se encuentran asentadas sobre abanicos aluviales formados por depósitos provenientes de la serranía del Ávila, transportados y depositados por los ríos y quebradas de la vertiente Caribe. Estos abanicos aluviales han generado condiciones para el asentamiento humano y el desarrollo inmobiliario a lo largo de la historia. Las ubicaciones seleccionadas en este trabajo, Catia La Mar, La Guaira y Caraballeda, se encuentran, en

buena medida, sobre estos depósitos aluviales, aunque también presentan desarrollo urbano en ladera hacia la serranía del Ávila. Existe una aparente correlación entre los daños observados y la respuesta de estos depósitos superficiales, relación que se busca analizar en esta sección.

5.1 Información disponible

De las ubicaciones estudiadas, Caraballeda es la que cuenta con la mejor información desde el punto de vista de la respuesta de los depósitos de suelo, por lo que el análisis se centra en esta ubicación. No obstante, la información obtenida se utiliza como proxy para las demás ubicaciones estudiadas, dada la similitud geográfica y geológica entre los sitios.

Las condiciones geológicas de Caraballeda han sido estudiadas en el pasado y son de las mejor caracterizadas del litoral venezolano. Romero et al. (2006) propone un mapa de profundidad del basamento rocoso, obtenido de interpretaciones a las mediciones realizadas por dichos autores de la anomalía de Bouguer, para Caraballeda y algunas poblaciones aledañas (Tanaguarena, Macuto y La Guaira). Señalan que existen profundidades de hasta 450 metros en la zona costera (ver Figura 13) y presentan mediciones geofísicas de la velocidad de onda de cortante, las cuales se resumen en la Tabla 2. Así mismo, establecen niveles freáticos de entre 5 y 10 metros en el área. Se observa que, para profundidades superiores a aproximadamente 100 metros, el aluvión se encuentra suficientemente consolidado para ser considerado suelo firme con fines de ingeniería ($V_s > 800$ m/s).

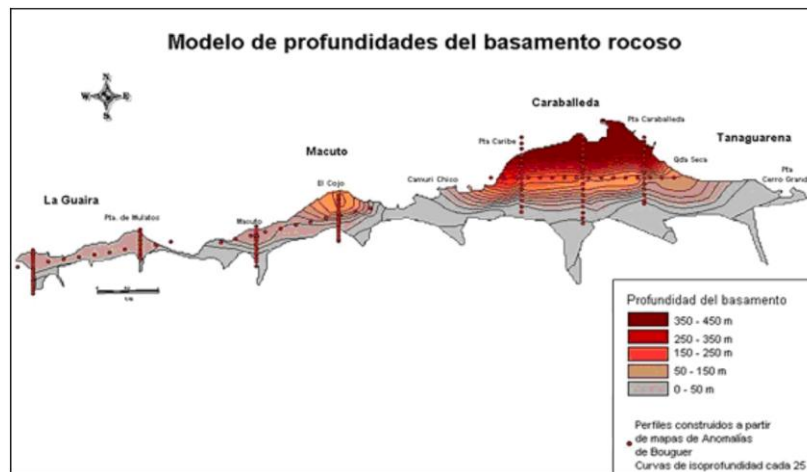


Figura 13. Modelo de profundidad del basamento rocoso en Caraballeda. Tomado de Romero et al. (2006)

Tabla 2. Rangos de velocidad de onda de cortante medidos en el aluvión de Caraballeda. Construcción propia de los autores a partir de los datos reportados en Romero et al. (2006)

Z (m)	Vs menor (m/s)	Vs mayor (m/s)	Promedio (m/s)
50	215	400	307.5
100	425	570	497.5
> 100	> 800		

Por su parte, García et al. (2023) propone una microzonificación sísmica para Caraballeda, basada en combinaciones de espesor y velocidad de onda de cortante promedio del depósito, y un perfil geológico

para el abanico aluvial, en el que se observan depósitos con espesores de hasta 400 metros (ver Figura 14), los que son utilizados para zonificar el territorio con fines de orientar el desarrollo urbano.

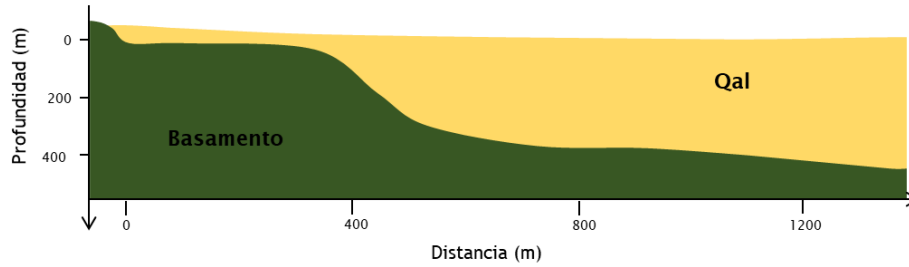


Figura 14. Corte geológico en Caraballeda. Qal = abanico aluvial. Reproducido de Garcia et al. 2023

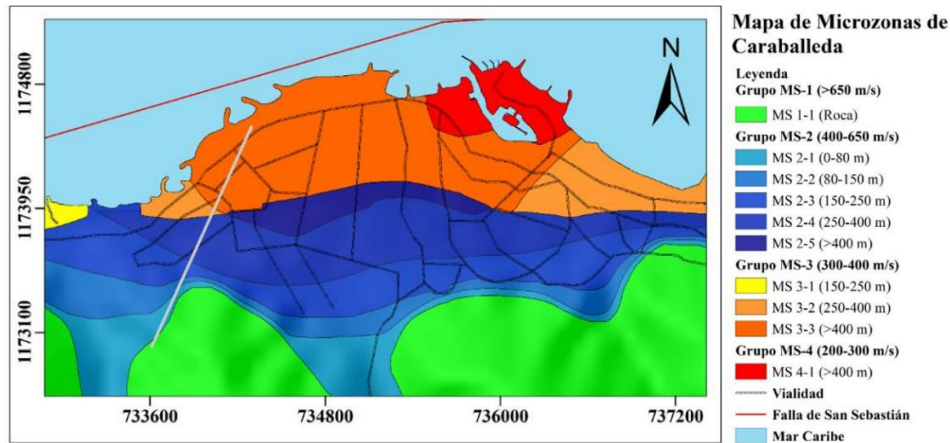


Figura 15. Mapa de microzonificación sísmica de Caraballeda. Tomado de Garcia et al. 2023

5.2 Modelo de respuesta local

Se modelaron dos perfiles estratigráficos representativos de las condiciones geotécnicas locales: uno con un espesor total de 50 metros y otro de 100 metros. Los modelos se construyeron con capas uniformes de 5 metros de espesor, correspondientes a un suelo granular SW, a las cuales se asignaron los valores medios de velocidad de onda de cortante en función de la profundidad indicados en la Tabla 2. En ambos perfiles se consideró un nivel freático a 5 m de profundidad. Asimismo, en ambos casos se realizó propagación unidimensional de ondas mediante el método no lineal equivalente de Idriss y Seed (1968), asignando a todas las capas el modelo promedio de degradación de rigidez y amortiguamiento propuesto por Seed et al. (1986). Los periodos de vibración de los perfiles modelados, en condiciones de bajas deformaciones cortantes (máxima rigidez) son de 1.0 seg. para el perfil de 50 metros y 1.34 seg. para el perfil de 100 metros de espesor.

En ambos perfiles hipotéticos, se propagaron los acelerogramas modelados en las tres ubicaciones consideradas en este trabajo. La Figura 16 ilustra las funciones de transferencia del espectro de Fourier obtenidas, para cada perfil, con cada uno de los acelerogramas modelados como señales incidentes en roca firme. Por su parte, la Figura 17 muestra las relaciones de amplificación del espectro de respuesta para ambos sitios.

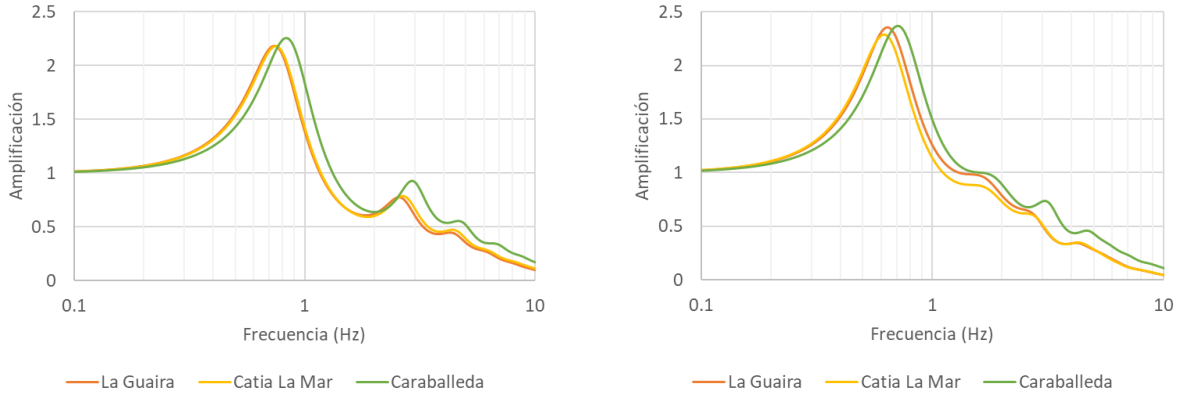


Figura 16. Funciones de transferencia modeladas para los perfiles de 50 metros (izq.) y 100 metros (der.) de espesor

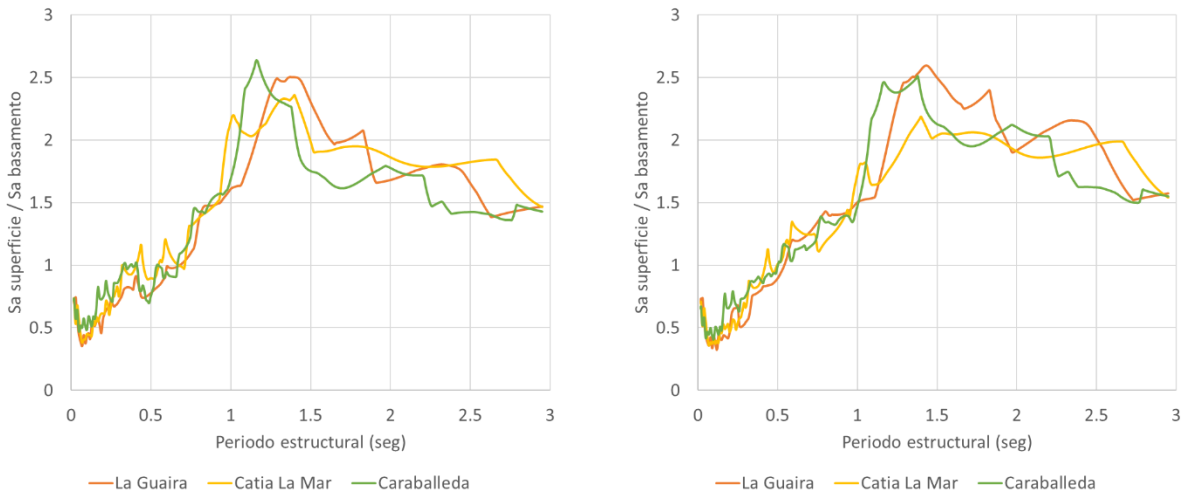
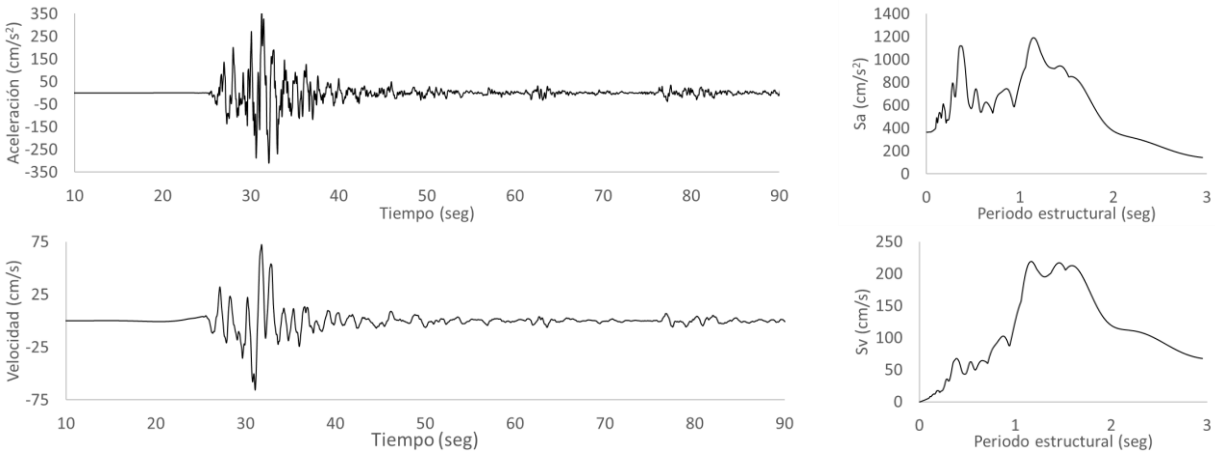


Figura 17. Relación de amplificación de aceleraciones espectrales para los perfiles de 50 metros (izq.) y 100 metros (der.) de espesor

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a nivel de superficie del terreno, considerando la propagación unidimensional en el perfil de 50 metros de espesor. Se presentan las señales de aceleración, velocidad y desplazamiento a nivel superficial y sus correspondientes espectros de respuesta.



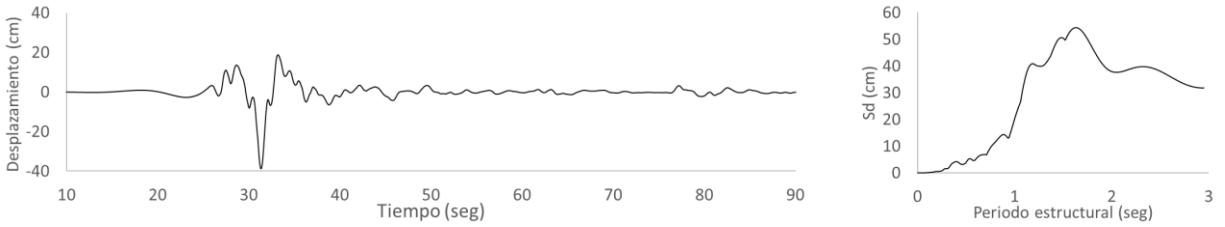


Figura 18. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en Catia La Mar a nivel superficial considerando un perfil de suelo de 50 metros.

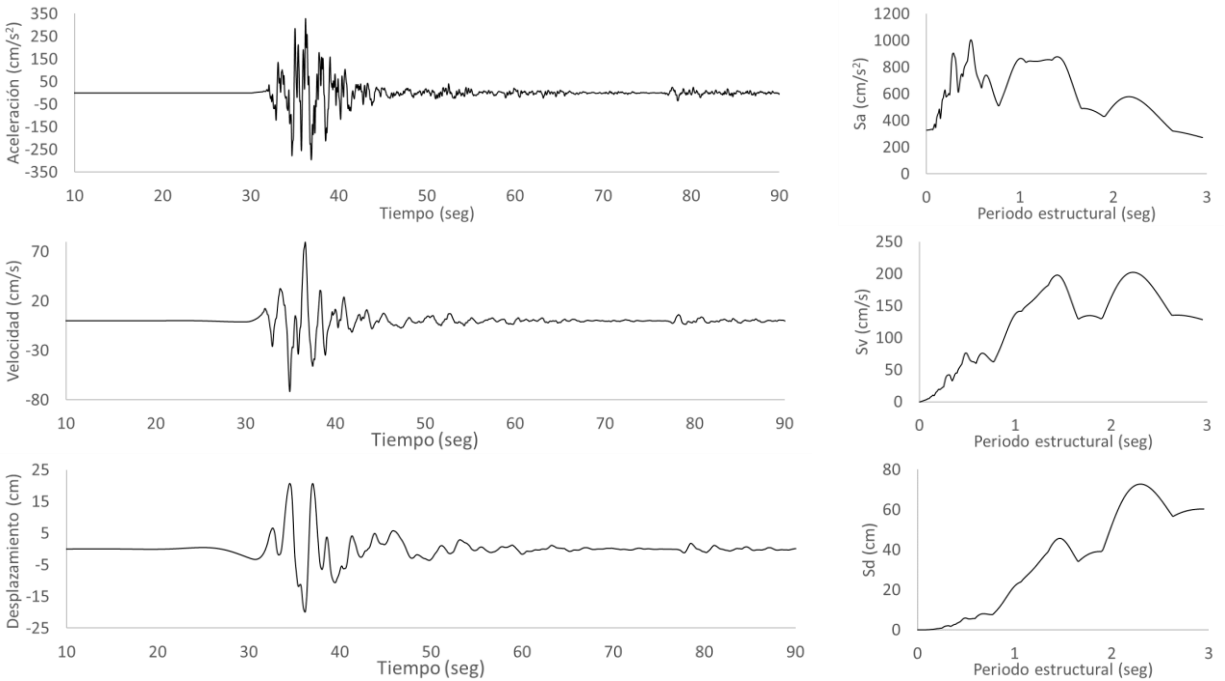
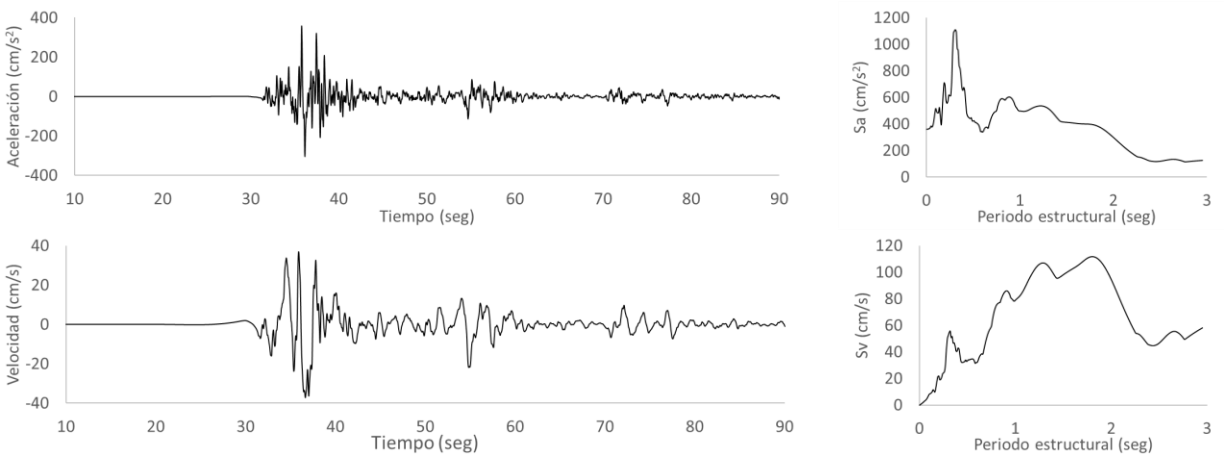


Figura 19. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en La Guaira a nivel superficial considerando un perfil de suelo de 50 metros.



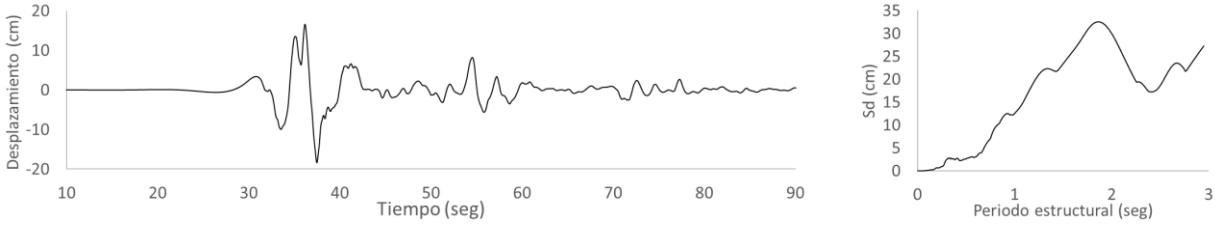


Figura 20. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en Caraballeda a nivel superficial considerando un perfil de suelo de 50 metros.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a nivel de superficie del terreno, considerando la propagación unidimensional en el perfil de 100 metros de espesor. Se presentan las señales de aceleración, velocidad y desplazamiento a nivel superficial y sus correspondientes espectros de respuesta.

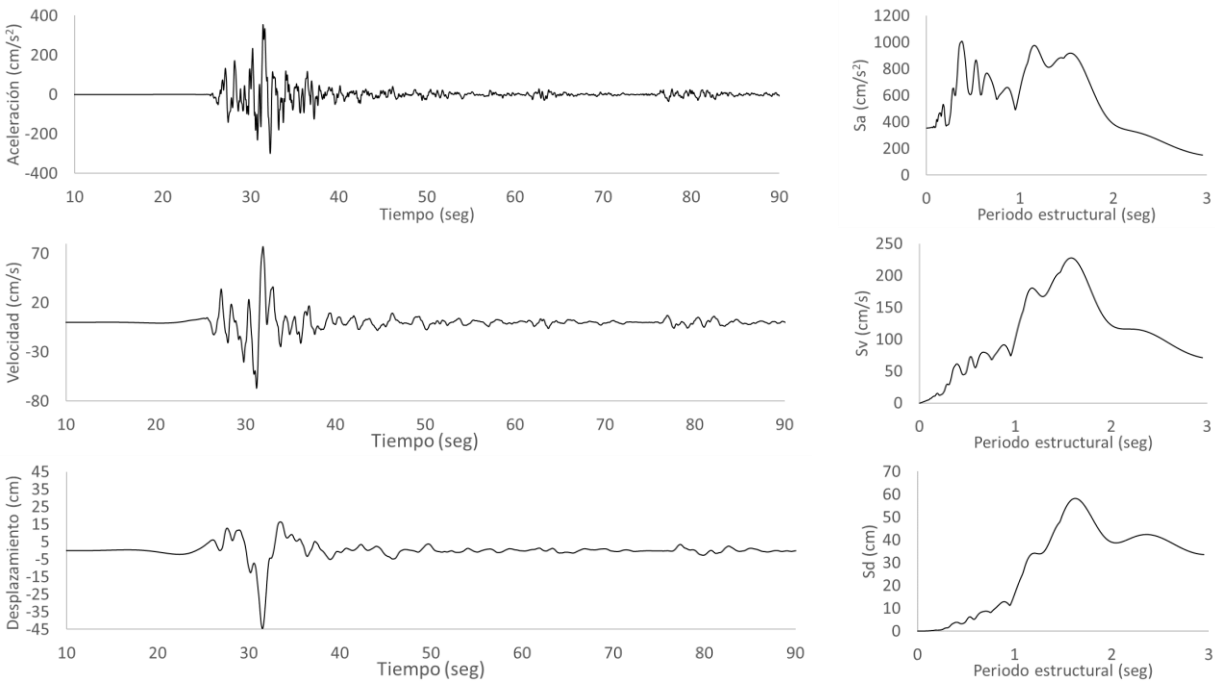
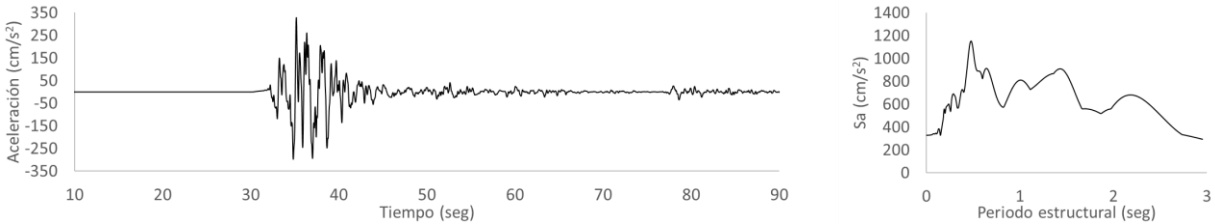


Figura 21. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en Catia La Mar a nivel superficial considerando un perfil de suelo de 100 metros.



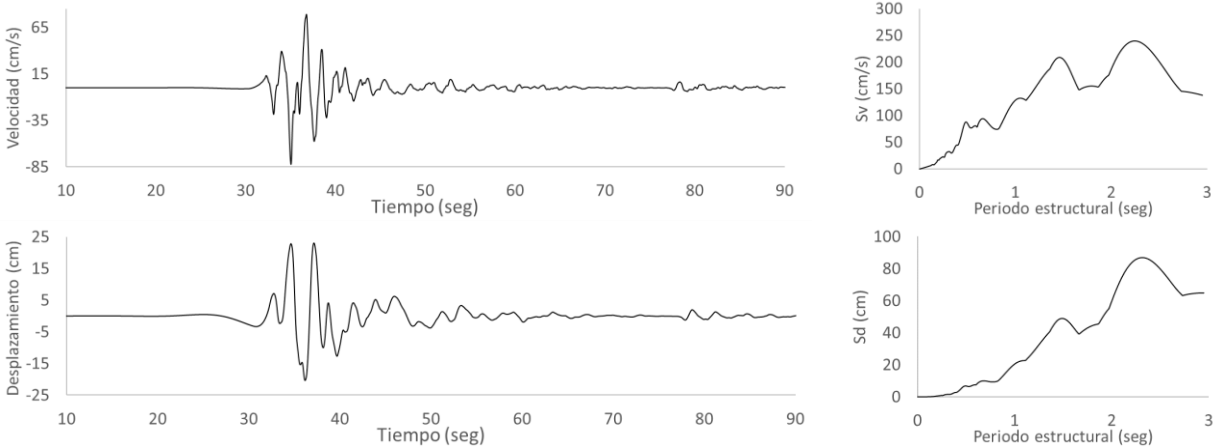


Figura 22. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en La Guaira a nivel superficial considerando un perfil de suelo de 100 metros.

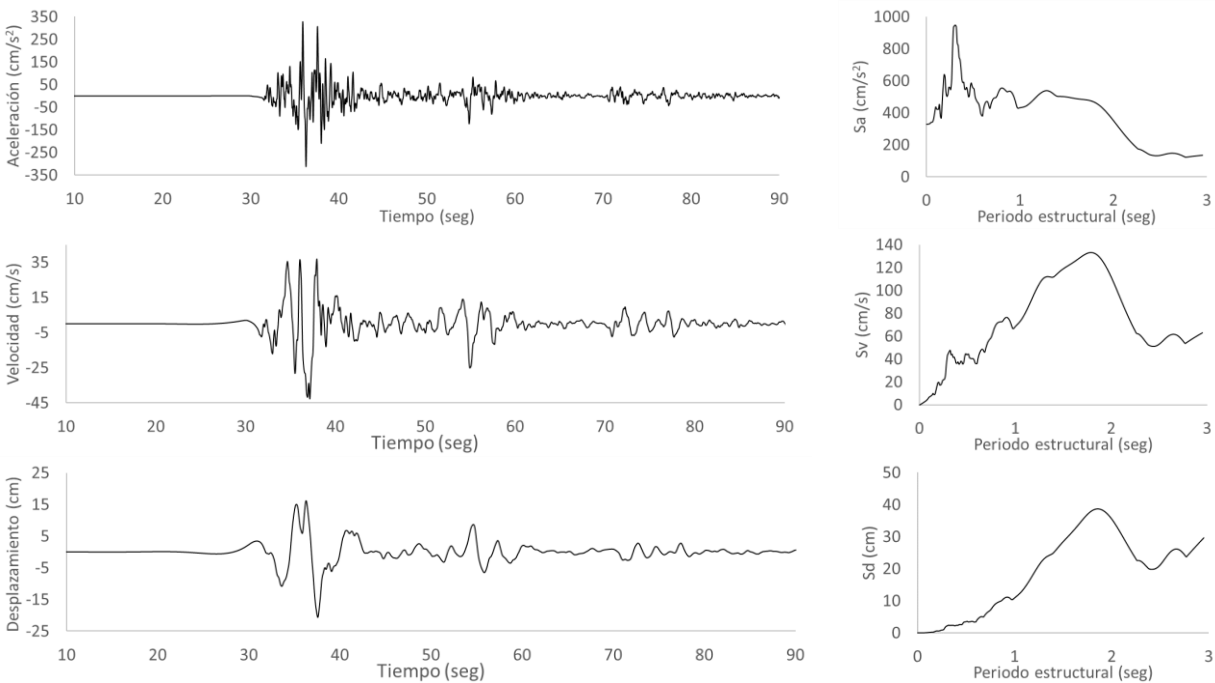


Figura 23. Señales y espectros de respuesta de aceleración, velocidad y desplazamiento simulados en Caraballeda a nivel superficial considerando un perfil de suelo de 100 metros.

5.3 Potencial de licuación

Los suelos superficiales dentro de los abanicos aluviales en el Estado La Guaira, tienen un conocido potencial de licuación por su condición geotécnica. Existen múltiples ubicaciones dentro de estas formaciones en donde el suelo se compone materiales granulares finos, mal gradados y saturados, favoreciendo posibles procesos de licuación.

En esta sección se plantean una serie de supuestos que se consideran razonables frente a la condición geotécnica de los suelos superficiales en los abanicos aluviales del Estado La Guaira, con el fin de ilustrar

el potencial de licuación, el cual explica en buena medida muchos de los daños observados a la fecha en posteriores a los eventos sísmicos del 24 de junio de 2026. Se modeló el potencial de licuación para una capa hipotética de suelo granular saturado, ubicada a 10 metros de profundidad, con un peso específico seco supuesto de 19 KN/m³, correspondiente a una arena densa, como lo reporta Romero et al. (2006). La Tabla 3 presenta el resumen de los parámetros geotécnicos supuestos para la valoración del potencial de licuación.

Tabla 3. Parámetros geotécnicos supuestos para la evaluación del potencial de licuación

Variable	Unidad	Valor
Nivel freático	<i>m</i>	5
Peso específico seco	<i>KN/m³</i>	19
Peso específico saturado	<i>KN/m³</i>	22
Presión de poros	<i>KPa</i>	50
Esfuerzo vertical	<i>KPa</i>	205
Esfuerzo vertical efectivo	<i>KPa</i>	155

Se hace uso del método aproximado propuesto por Andrus et. al (2003) para la evaluación de una aceleración máxima crítica que detonaría un proceso de licuación en este suelo hipotético. El método permite evaluar la relación de resistencia crítica (CRR) para sismos de Mw 7.5, es decir, no se aplica factor de corrección dado que la magnitud del evento coincide con la de referencia del método. En el método de Andrus et. al (2003), la rigidez del suelo evaluado se expresa como una velocidad de onda de cortante, por lo cual hemos indexado esta evaluación a los grupos o zonas indicados en la microzonificación sísmica de Caraballeda (García et. al. 2023 – ver Figura 15). Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de relación de resistencia crítica (CRR) y aceleración máxima crítica para los grupos de suelo en Caraballeda según García et al. (2023)⁵

Variable		Grupo 4 (200 m/s)	Grupo 3 (300 m/s)	Grupo 2 (400 m/s)
Relación de resistencia crítica	<i>CRR_{7.5}</i>	-	0.111	0.201
Aceleración crítica	<i>PGA_{crit}</i>	<i>cm/s²</i>	139	252

Como puede comprobarse de los resultados presentados, en las zonas más cercanas al litoral, en las cuales los suelos presentan menores rigideces, el potencial de licuación es muy alto, con aceleraciones críticas que habrían sido superadas ampliamente durante el movimiento sísmico causado el pasado 24 de junio de 2026 en el Estado La Guaira. Esto posiblemente explique muchos de los daños observados en las edificaciones e infraestructura, particularmente volcamientos, hundimientos parciales e incluso colapsos instantáneos en cercanías a la costa.

6 CONCLUSIONES

Las simulaciones presentadas, si bien deberán refinarse a medida que se disponga de nueva información sísmológica e instrumental, constituyen una primera aproximación técnicamente consistente para

⁵ No se incluye el Grupo 1 de la microzonificación de Caraballeda por corresponder a zonas de afloramiento del basamento rocoso.

comprender el evento, apoyar las investigaciones posteriores y orientar los procesos de reconstrucción y reducción del riesgo. A continuación, se presentan algunas conclusiones generales que se derivan del trabajo aquí presentado:

1. El sismo de Mw 7.5 constituye el evento dominante responsable de los daños observados en el Estado La Guaira.

A pesar de que la secuencia sísmica correspondió a un doblete compuesto por eventos de Mw 7.2 y Mw 7.5, la modelación realizada evidencia que la demanda sísmica en el litoral central venezolano estuvo controlada exclusivamente por el terremoto de Mw 7.5 ocurrido sobre la falla de San Sebastián. La geometría de la ruptura, su localización frente al Estado La Guaira y la propagación de la ruptura en dirección oeste-este explican la concentración espacial de los daños observados y permiten descartar una contribución significativa del evento precursor en las afectaciones registradas en esta región.

2. La ruptura presentó condiciones favorables para la generación de movimientos fuertes severos dominados por efectos de directividad.

Las simulaciones realizadas muestran que el proceso de ruptura generó pulsos de velocidad característicos de eventos con fuerte directividad hacia adelante (forward directivity), concentrando una parte importante de la energía sísmica en intervalos relativamente cortos de tiempo. Este comportamiento produjo demandas elevadas en periodos intermedios y largos, superiores a las esperadas para un evento convencional de igual magnitud y distancia, constituyendo uno de los principales mecanismos responsables de la severidad del movimiento observado en el litoral central venezolano.

3. La demanda sísmica regional alcanzó niveles excepcionalmente elevados para las condiciones tectónicas del norte de Venezuela

La modelación del movimiento fuerte indica niveles de intensidad excepcionalmente severos, consistentes con un escenario sísmico extremo para la región. La concentración de la dislocación frente al Estado La Guaira produjo máximos de demanda precisamente sobre las zonas urbanas más densamente pobladas del litoral central, generando una coincidencia desfavorable entre la fuente sísmica y la exposición existente. La distribución espacial obtenida resulta coherente con los patrones de daño reportados y con las estimaciones preliminares de pérdidas económicas desarrolladas para el evento.

4. Los depósitos aluviales del litoral central presentan condiciones propicias para amplificar significativamente la respuesta sísmica

Los análisis de propagación unidimensional realizados para perfiles representativos de 50 y 100 m de espesor evidencian importantes procesos de modificación del movimiento incidente debido a los depósitos aluviales que caracterizan gran parte de las planicies costeras de La Guaira. Los resultados muestran amplificaciones espectrales concentradas en periodos cercanos a los periodos fundamentales de los depósitos, incrementando la demanda sísmica superficial respecto a la roca de referencia y contribuyendo a explicar la concentración de daños observada sobre los abanicos aluviales de la región.

5. La interacción entre directividad de la fuente y efectos locales de sitio generó una condición particularmente crítica para estructuras de periodo intermedio y largo

La coincidencia entre los pulsos de velocidad generados por la ruptura y los periodos predominantes asociados a los depósitos aluviales profundos produjo una amplificación importante de las ordenadas espectrales en rangos de periodo cercanos a 1–2 segundos. Esta condición implica una demanda especialmente severa para edificaciones medianas y altas, así como para determinadas tipologías de infraestructura, evidenciando que la intensidad del movimiento no puede ser interpretada únicamente mediante parámetros simplificados como el PGA o aceleraciones espectrales.

6. Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de revisar criterios de diseño, microzonificación y reconstrucción resiliente en el litoral central venezolano

La combinación de una ruptura de gran magnitud, marcada directividad, depósitos aluviales profundos y potencial susceptibilidad a la licuación demuestra que la amenaza sísmica local puede exceder significativamente las condiciones consideradas mediante aproximaciones regionales simplificadas. Los resultados respaldan la conveniencia de revisar y actualizar los espectros de diseño empleados para estas áreas, así como de fortalecer los estudios de microzonificación sísmica y de incorporar criterios de ordenamiento territorial que, incluso, restrinjan o condicionen el desarrollo urbano en sectores con elevada susceptibilidad a la amplificación del movimiento y a fenómenos asociados como la licuación.

SOFTWARE DE MODELACIÓN

Todas las simulaciones realizadas en este trabajo fueron ejecutadas en el software *SMA - Strong Motion Analyst* (Gabriel Bernal, 2014), el cual se encuentra disponible para descarga de forma gratuita en el siguiente vínculo:

LICENCIA DE USO DE LOS ACELEROGRAMAS SIMULADOS

En el desarrollo de este estudio, se generaron simulaciones para otras ubicaciones en Venezuela, del movimiento fuerte derivado de ambos sismos, Mw 7.2 y Mw 7.5, y que no fueron incluidas en este informe. La totalidad de las simulaciones de movimiento fuerte realizadas se publican bajo la licencia Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

Se autoriza a cualquier persona o institución a copiar, distribuir, compartir, adaptar, modificar y utilizar estos datos para cualquier propósito, incluyendo aplicaciones académicas, técnicas, comerciales o de investigación, siempre que se otorgue el reconocimiento apropiado a los autores originales y que cualquier obra derivada se distribuya bajo la misma licencia CC BY-SA 4.0.

La licencia completa puede consultarse en: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Los datos se proporcionan "tal cual" ("as is"), sin garantías expresas o implícitas de ningún tipo. Los autores y las instituciones participantes no asumen responsabilidad alguna por daños, pérdidas, decisiones o consecuencias derivadas del uso o interpretación de estos datos.

Enlace a los datos:

REFERENCIAS

Andrus, R.D., Stokoe, K.H., Chung, R.M., Juang, C.H., and Li, J.P. (2003). Guidelines for Evaluating Liquefaction Resistance Using Shear Wave Velocity Measurements. Report FHWA-RD-99-156, Federal Highway Administration (FHWA).

Bernal, G., Cardona, O.D. (2019). Ajuste de un Modelo de Espectro de Fuente y sus Aplicaciones en la Modelación de la Amenaza Sísmica y el Campo Cercano en Colombia. Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Cali, Colombia.

Bernal, G., Cardona, O.D., Ordaz, M. (2026). Simplified and Highly Efficient Simulation of Broadband Strong-Motion Accelerograms. Proceedings of the 18th European Conference on Earthquake Engineering. Berlin, Germany.

García, L., Rondón, F., Crasto, N., & Schmitz, M. (2023). Microzonas sísmicas preliminares del Estado La Guaira, en base a evaluación de Vs30, estudios gravimétricos y espesor de sedimentos. En: II Congreso Venezolano de Geociencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas, marzo de 2023.

Idriss, M. I. y Seed, H. B. 1968. Seismic Response of Horizontal Soil Layers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 94, N° SM4, Julio 1968.

Mendes A., Ketty (2013). La reducción del riesgo de desastres en la planificación urbana. Caso de estudio: la parroquia Caraballeda, estado Vargas, Venezuela. Tesis de Maestría en Planificación Urbana. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Romero, M., Cragno, A., Schmitz, M., y Ambrosio, R. (2006). Caracterización de suelos con métodos geofísicos en La Guaira, Macuto, Caraballeda y Tanaguarena, Estado Vargas, Venezuela. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, 29(1), 3–15.

Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K. (1986). Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 112(11), 1016–1032.