

EDAS: Herramienta computacional para la Evaluación Determinista de la Amenaza Sísmica

EDAS: Computational tool for the Deterministic Assessment of Seismic Hazard

Nadir Castrillo Osorio¹

RESUMEN

La amenaza sísmica en el área este de la ciudad de Managua fue evaluada usando el método determinista para evaluación de amenaza sísmica mediante el programa denominado EDAS (Evaluación Determinista de Amenaza Sísmica) desarrollado en el marco de esta investigación. Esta herramienta tiene como objetivo contribuir en el ámbito educativo universitario en niveles de grado y posgrado, así como apoyar a profesionales de instituciones dedicadas a la gestión del riesgo de desastres, alcaldías y especialistas en ingeniería civil, arquitectura y ciencias de la tierra. Tres modelos de atenuación fueron empleados para la evaluación de las aceleraciones máximas del suelo estas fueron: Climent et al (1994), Schmidt (2014) y Cauzzi et al (2015). Los resultados mostraron diferencias entre las estimaciones obtenidas usando estos modelos, la relación propuesta por Schmidt resultó ser la más conservadora al estimar los mayores valores de aceleración, mientras que la relación de Climent produjo los valores más bajos de amenaza sísmica. La herramienta desarrollada permite estimar de forma rápida la amenaza sísmica en una zona geográfica específica y facilita comprender cómo afecta la ruptura de una falla geológica el movimiento del suelo. Así mismo, EDAS puede ser utilizado como recurso didáctico por universidades e instituciones en Latinoamérica y otras regiones del mundo para fortalecer la enseñanza del cálculo de amenaza sísmica. El uso de esta herramienta contribuye a pasar de una percepción general del riesgo a la cuantificación del mismo, lo que favorece una mejor comprensión del impacto potencial de las fallas geológicas y fortalece la resiliencia. Los resultados de las simulaciones realizadas con la herramienta EDAS, indican que la amenaza sísmica más alta se encuentra en las zonas ubicadas sobre el plano de falla de las estructuras geológicas evaluadas.

PALABRAS CLAVE: Aceleración máxima del suelo, EDAS (Evaluación determinista de amenaza sísmica), evaluación de amenaza sísmica, gestión del riesgo de desastres, ingeniería sísmica.

1- Docente investigador, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua/Instituto de Geología y Geofísica Benjamin Linder y Héroes de Bocay, Correo: edwin.castrillo@igg.unan.edu.ni, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4541-9601>

ABSTRACT

Seismic hazard in the eastern area of Managua city was evaluated using the deterministic method for seismic hazard assessment through the software EDAS (Evaluación Determinista de Amenaza Sísmica), developed as part of this research. This tool aims to contribute to university education at undergraduate and graduate levels and to support professionals from disaster risk management institutions, municipal governments, and specialists in civil engineering, architecture, and earth sciences. Three attenuation models were used to estimate peak ground accelerations: Climent et al. (1994), Schmidt (2014), and Cauzzi et al. (2015). The results showed differences among the estimations using these models, the Schmidt's relation proved to be the most conservative, producing the highest acceleration values, whereas the Climent relation estimated the lowest seismic hazard values. The developed tool allows rapid estimation of seismic hazard in a specific geographic area and helps to understand how the rupture of a geological fault may affect ground motion. In addition, EDAS can serve as a teaching resource for universities and institutions in Latin America and other regions of the world to strengthen the instruction of seismic hazard calculation. The use of this tool contributes to moving from a general perception of risk toward quantification, improving the understanding of the potential impact of geological faults and strengthening resilience. Simulation results obtained with the EDAS indicate that the highest seismic hazard levels are concentrated in areas located directly above the fault plane of the evaluated geological structures.

KEYWORDS: Peak ground acceleration, EDAS (Deterministic Seismic Hazard Assessment), Seismic hazard assessment, disaster risk management, earthquake engineering.

INTRODUCCION

Respecto a investigación relacionada a ingeniería sísmica o ingeniería sismorresistente en Nicaragua, puede señalarse que, antes del terremoto de 1972 muy pocos estudios geocientíficos e ingenieriles habían sido realizados. Sin embargo, y sobre todo a partir de los años 80 la comunidad científica nacional puso atención a la amenaza sísmica en Nicaragua, enfocándose principalmente en la ciudad de Managua.

Fue así que se produjeron varios estudios entre ellos el estudio de criterios de microzonificación y respuesta de sitio unidimensional para la ciudad de Managua por Faccioli (Faccioli, Santoyo, & León, 1973), así como el estudio de amenaza sísmica realizado por Shah

(Shah, Mortgat, Kiremidjian, & Zsutty, 1975), luego el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2000) realizó el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Managua el cual estuvo basado en la técnica de HVSR o de Nakamura, Hedberg desarrolló el estudio de evaluación del riesgo sísmico en Managua mediante espectrogramas (Hedberg, 2005), Parrales y Ulriksen (2006), realizaron estudio de las propiedades dinámicas en sitios seleccionados de los suelos de la ciudad de Managua (Parrales & Ulriksen, 2006), Hernández (2009) realizó una reevaluación del efecto de sitio y propuesta de clasificación de terreno con fines de diseño sísmico para la ciudad de Managua (Hernández, 2009), Martínez y Arai (2011), estudiaron el efecto de la geología superficial en los movimientos sísmicos en Managua (Martínez & Arai, 2011).

En relación con desarrollo de software en la línea de investigación de tecnología industria y construcción y/o amenaza sísmica que corresponde al área de investigación de ingeniería sísmica para la gestión de riesgos ante terremotos en Nicaragua, no se encontró en la revisión bibliográfica la existencia de ninguno hasta el momento de la publicación de este artículo.

En la región Latinoamericana uno de los ejemplos más representativos es el software CRISIS cuya primera versión data de 1986, posteriormente, este programa continuó siendo desarrollado y mejorado hasta alcanzar su versión más reciente, denominada R-Crisis, publicada en 2017 (Aguilar-Meléndez, A., Ordaz, M., De la Puente, J., Gonzales-Rocha, S. Rodríguez-Lozoya, H., Cordova-Ceballos, A., García-Elías, A., Calderón-Ramón, C., Escalante-Martínez, J., Laguna-Camacho, J., Campos-Ríos, A., 2017). Ambos programas difieren en los métodos de evaluación que implementan. En este caso, EDAS se basa en el enfoque determinista, mientras que CRISIS emplea un enfoque probabilista para la evaluación de la amenaza sísmica. No obstante, aunque ambos programas no aplican directamente el mismo método, CRISIS se menciona como referencia debido a su cercanía con la línea de investigación relacionada con la amenaza sísmica, así como por su similitud en cuanto a la aplicación del software.

En la actualidad, la ingeniería en Nicaragua carece de herramientas desarrolladas en el país que puedan ser compartidas a los estudiantes de las carreras donde se aborda la temática de amenaza sísmica, como ingeniería geológica, ingeniería geofísica, ingeniería civil y arquitectura, así como a profesionales y técnicos de instituciones públicas para su uso y rápida comprensión del impacto que tendría la ruptura de una falla geológica en una región o área geográfica dada.

El territorio nicaragüense presenta una alta amenaza sísmica, siendo la zona con mayor amenaza la zona del Pacífico (MTI, 2022). Varios terremotos han ocurrido en la ciudad de Managua, como el generado por la falla Centroamérica en 1968 que tuvo una magnitud 4.8 (Brown R. , 1968). En 1972 ocurrió el devastador terremoto con magnitud 6.2 (Brown, Ward, & Plafker, 1973), el cual dejó un elevado número de víctimas mortales. Estos eventos evidencian que los terremotos constituyen una de las amenazas naturales que generan mayor riesgo en Nicaragua, tanto para la infraestructura y la economía, así como para la vida.

Al momento de diseñar una edificación sismorresistente, el cálculo fundamental que permite dimensionar correctamente sus elementos es la intensidad del movimiento sísmico estimado, es decir, la amenaza sísmica que se generara en el sitio donde se emplazara la edificación. Por lo tanto, este parámetro constituye la base sobre la cual se desarrollan las normativas de construcción, así como los planes de ordenamiento territorial, las políticas de prevención y las estrategias de respuesta ante emergencias.

El principal objetivo de esta investigación fue la creación de una aplicación educativa minimalista para la evaluación de la amenaza sísmica basada en el método determinista. Este programa permite rápidamente obtener resultados a partir de datos de entrada tales como la magnitud esperada del terremoto, la malla de sitios de interés, así como la geometría de la falla geológica que se prevé genere el terremoto.

Adicionalmente, y aún más importante, esta investigación pretende aportar en el fortalecimiento de la resiliencia ante terremotos en el país mediante el aprendizaje de la gestión de riesgo ante terremotos en estudiantes de ingeniería, arquitectura y ciencias de la tierra a través del uso de esta herramienta educativa innovadora para el cálculo de amenaza sísmica, así como de gestores de riesgo de las alcaldías, e instituciones públicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron diversos recursos de carácter documental, computacional y geoespacial. En primer lugar, se procedió a reunir toda la información disponible proveniente de investigaciones previas realizadas en la ciudad ya sea en la temática de la investigación o de estudios base como cartografía, topografía, geología, geofísica, ingeniería sísmica y geotecnia. Se empleó información geológica y sismotectónica proveniente de la base de datos de fallas geológicas del INETER, a partir de estos datos se

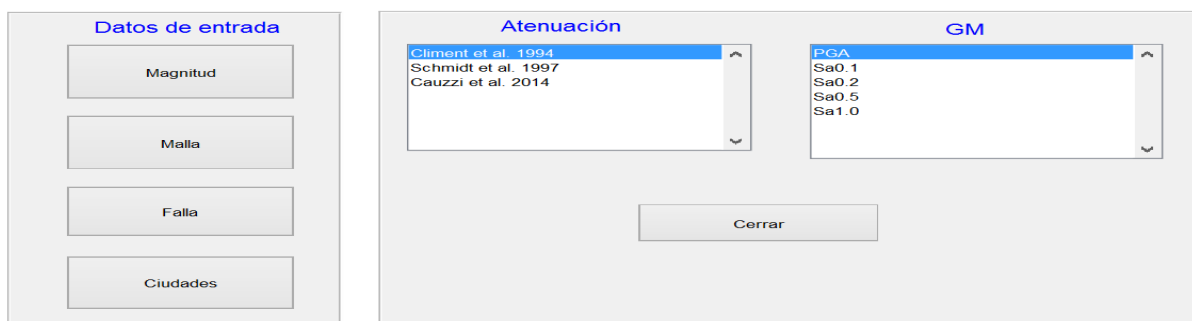
caracterizaron las fuentes sísmicas consideradas en este estudio.

Así mismo, se utilizaron relaciones de atenuación del movimiento sísmico, las cuales permitieron estimar la aceleración máxima del suelo en función de parámetros sísmicos tales como la magnitud del evento y la distancia a la fuente.

Posteriormente, se procedió al desarrollo del software, para lo cual se consideró la teoría del método determinista, así como tres relaciones de atenuación. En este estudio se desarrolló la herramienta computacional a la cual se denominó EDAS cuyo acrónimo significa Evaluación Determinista de la Amenaza Sísmica esta fue desarrollada en Matlab (Mathworks, 2021). Al ser una herramienta pensada para uso educativo y para capacitación se trató de hacer lo más sencilla posible, por lo cual consta de 2 paneles, el primero es para ingresar los datos de entrada tales como magnitud del terremoto, profundidad, geología local del sitio, así como la geometría de la falla a analizar y del área a estudiar. El segundo panel se usa para seleccionar el modelo de atenuación, así como la aceleración espectral de salida siendo capaz de obtener el espectro uniforme de amenaza para cada sitio de interés que el usuario considere hasta un periodo máximo de 2 s.

Figura 1

Interfaz de EDAS



Nota: Una vez desarrollado el software y con los datos de entrada recopilados se procedió a determinar la amenaza sísmica mediante la simulación numérica generada por el software en el área de estudio a partir de dos fallas geológicas activas. Esto permitió estimar la intensidad del movimiento del suelo que podría generarse como consecuencia de la ruptura de cualquiera de las dos fallas geológicas analizadas.

Métodos

El área de estudio de esta investigación correspondió al sector urbano de la ciudad de Managua (Figura 2). Esta zona se caracteriza por presentar una importante actividad sísmica asociada a sistemas de fallas geológicas activas que han generado eventos sísmicos significativos en el pasado.

Geológicamente la litología de los suelos superficiales de Managua corresponde a suelos de origen volcánico (Hodgson, 2000). A escala regional, Managua está asentada dentro de una estructura geológica en forma de franja que corre casi paralela al litoral del Pacífico nicaragüense, conocida como la depresión de Nicaragua. Esta estructura ubicada en la región del Pacífico presenta una dirección aproximada de N45W y una extensión transversal aproximada de 75 km. Dos fallas normales limitan la depresión por lo cual ha sido clasificada como Graben (INETER, 2002).

Figura 2

Delimitación del polígono urbano



Nota. La delimitación del perímetro urbano (polígono verde) fue realizada a partir de información cartográfica obtenida de INETER. La caracterización de la geometría de las fallas geológicas fue realizada a partir de la base de datos de estructuras geológicas de INETER.

El polígono a la izquierda de la imagen muestra el sector urbano de la ciudad de Managua. Las líneas con dirección cuasi norte-sur indican las fallas geológicas activas seleccionadas en este estudio para mostrar el cálculo de amenaza sísmica (ESRI, 2021).

La presente investigación se enmarca dentro del paradigma positivista, dado que se basa en el análisis cuantitativo de variables relacionadas a los tipos de suelos y la distancia a la fuente, así como en la aplicación de modelos matemáticos para la estimación del movimiento del suelo.

El diseño de la investigación es no experimental, ya que las variables analizadas no fueron manipuladas de manera directa, sino que se utilizaron datos existentes de fuentes geocientíficas y modelos previamente desarrollados.

En cuanto al tipo de estudio, este es de carácter aplicado y metodológico, debido a que se orientó al desarrollo de una herramienta computacional para la estimación de la amenaza sísmica y a la aplicación de modelos teóricos en un contexto geográfico específico.

El enfoque metodológico corresponde a un análisis determinista de la amenaza sísmica, basado en la estimación del movimiento del suelo generado por escenarios sísmicos plausibles asociado a fallas geológicas identificadas en el área de estudio.

El estudio presenta un corte transversal en el tiempo, dado que el análisis se realizó a partir de datos geológicos y modelos disponibles en un momento específico, sin considerar series temporales de observaciones.

El universo de esta investigación está constituido por las fallas geológicas activas identificadas en la ciudad de Managua. A partir de este universo se seleccionaron dos fallas geológicas como muestra, para el análisis detallado, las cuales fueron consideradas como fuentes sísmicas potenciales para la estimación del movimiento del suelo. Desde el punto de vista estadístico, la muestra corresponde a un muestreo no probabilístico de tipo intencional, dado que la selección de las fallas analizadas se realizó de manera deliberada en función de su relevancia sismotectónica dentro del área de estudio.

La recolección de datos se realizó mediante técnicas de revisión documental y análisis de información geocientífica.

El método de cálculo empleado en esta investigación, fue el método determinista, el cual, históricamente es el primer método que se propuso para la evaluación de amenaza sísmica. El planteamiento de este se basa en la determinación de la intensidad del movimiento del

terreno de forma cuantitativa en un sitio dado causado por la ruptura de una falla geológica particular (Kramer, 1996).

Para poder realizar el cálculo de amenaza sísmica debe contarse con información que servirá como datos entrada en la evaluación. La información fundamental para realizar una evaluación determinista de amenaza sísmica es la siguiente (Reiter, 1990):

1. Identificación y caracterización de las fallas geológicas o fuentes activas en el área de estudio.
2. Selección de la distancia fuente-sitio para cada falla geológica.
3. Selección del terremoto de control con su magnitud esperada.
4. Identificar el movimiento gobernante en el sitio.

A la vez la información fundamental para el cálculo de amenaza sísmica requiere la recopilación de antecedentes en la zona de estudio. Para realizar el paso 1 se requiere contar con mapas geológicos, fotografías aéreas, estudios de fallamiento superficial, estudios sísmicos, estudios geofísicos, estudios paleosismológicos, estudios geodésicos, reconocimiento de campo (Kramer, 1996).

La selección de la distancia fuente-sitio implica el cálculo de la distancia más cercana a cada uno de los elementos de una fuente activa, de forma teórica las fuentes a su vez se dividen en tres tipos esto cambia la manera como se identifican las distancias fuente-sitio. En general las fuentes se dividen como fuentes del tipo puntual, fuentes lineales y fuentes del tipo área.

En el caso de una fuente puntual la distancia es única. En una fuente lineal esta se subdivide en segmentos siendo necesario determinar la distancia del sitio hasta cada uno de los segmentos. En el caso de una fuente de tipo área esta se divide en elementos que descomponen la fuente del tipo área en piezas más pequeñas.

La selección del terremoto de control implica conocer la sismicidad histórica, así como la tectónica y geología estructural dentro del territorio a evaluarse. Esto permite en combinación con la información recopilada en la primera parte antes mencionada, la estimación del terremoto máximo creíble (MCE), la magnitud de este terremoto es la que se usará para evaluar la intensidad del movimiento en la zona de interés (Kramer, 1996).

Para este estudio la magnitud del MCE para cada falla fue inferida a partir del estudio de Wells y Coppersmith (Wells & Coppersmith, 1994)

Tabla 1

Características del terremoto evaluado para cada falla.

Falla Cofradía		Falla Aeropuerto	
M=	7.06	M=	7.03
Prof. (km)=	7	Prof. (km)=	7
Tipo de suelo	roca	Tipo de suelo	roca

Nota. Los valores mostrados corresponden a escenarios representativos para cada falla geológica.

De forma matemática el método determinista se puede expresar mediante la siguiente relación para determinar la intensidad del movimiento del suelo ante la ruptura de una falla geológica particular en una zona de estudio dada:

$$y(s) = \int_{\Gamma} f(M, R(s, r), S(s)) \delta(M - M_{max}) dr$$

Donde:

y(s): Intensidad del movimiento del suelo en el sitio s.

Γ : Fuente sísmica (por ejemplo, una falla geológica activa)

r: variable de integración a lo largo de la fuente

R(s,r): distancia entre el sitio s y el punto r de la fuente

f(M,R(s,r),S(s)) : Función de predicción del movimiento del suelo

$\delta(M - M_{max})$: Función delta Dirac que selecciona únicamente la magnitud máxima creíble M_{max} .

S(s): Parámetros del sitio (tipo de suelo, efectos locales).

Un parámetro muy importante para determinar la amenaza sísmica en un área dada son las relaciones de atenuación. En este estudio se adoptaron tres modelos de atenuación con fines comparativos, las cuales corresponden al modelo propuesto por Climent (Climent, 1994), el modelo de Schmidt (Schmidt, 2014) y el modelo de Cauzzi (Cauzzi, Faccioli, & Vanini, 2015), todas estas relaciones fueron adoptadas como representativas para el área de estudio dado que para su obtención en las dos primeras se utilizaron sismos ocurridos en Centroamérica y para la última se utilizaron terremotos originados por todos los tipos de fallas geológicas es decir que incluyen los tipos de fallas que se analizan en este estudio.

La relación de atenuación de Climent se basa en el modelo

$$h A = c_1 + c_2 M + c_3 h r + c_4 r + c_5 S + h \varepsilon$$

donde M es la magnitud de momento, r es la distancia hipocentral, S es un coeficiente para indicar el tipo de suelo y $h \varepsilon$ es el error normalmente distribuido.

La relación de atenuación de Schmidt se basa en el modelo

$$\log Y = C_1 + C_2 M + C_3 \log(\sqrt{D^2 + C_4^2}) + S * C_5 + H * C_6$$

donde Y es la aceleración máxima en cm/s^2 , M s la magnitud de momento, D es una medida de distancia que se considera como la hipocentral, S y H son coeficientes que representan la geología local del sitio.

La relación de atenuación de Cauzzi se basa en el modelo

$$\log_{10} Y = f_M + f_R + f_S + f_{SOF} + \varepsilon$$

donde

$$f_M = c_1 + m_1 M_W + m_2 M_W^2$$

$$f_R = (r_1 + r_2 M_W) + \log_{10}(R_{RUP} + r_3)$$

$$f_S = s_B S_B + s_C S_C + s_D S_D ; \text{ o alternativamente}$$

$$f_S = b_v \log_{10} \left(\frac{V_{S30}}{V_A} \right) ; \text{ o alternativamente}$$

$$f_S = b_{v800} \log_{10} \left(\frac{V_{S30}}{800} \right)$$

$$f_{SOF} = f_N F_N + f_R F_R + f_{SS} F_{SS}$$

Donde f_M es un factor que contiene coeficientes numéricos que afectan el termino de magnitud de la falla.

f_R es un factor que contiene coeficientes numéricos que afectan la distancia de ruptura al plano de falla f.

f_S contiene coeficientes numéricos que representan la geología local del sitio en el modelo.

f_{SOF} contiene coeficientes numéricos que representan el mecanismo de la falla geológica.

Todos los coeficientes son función del periodo.

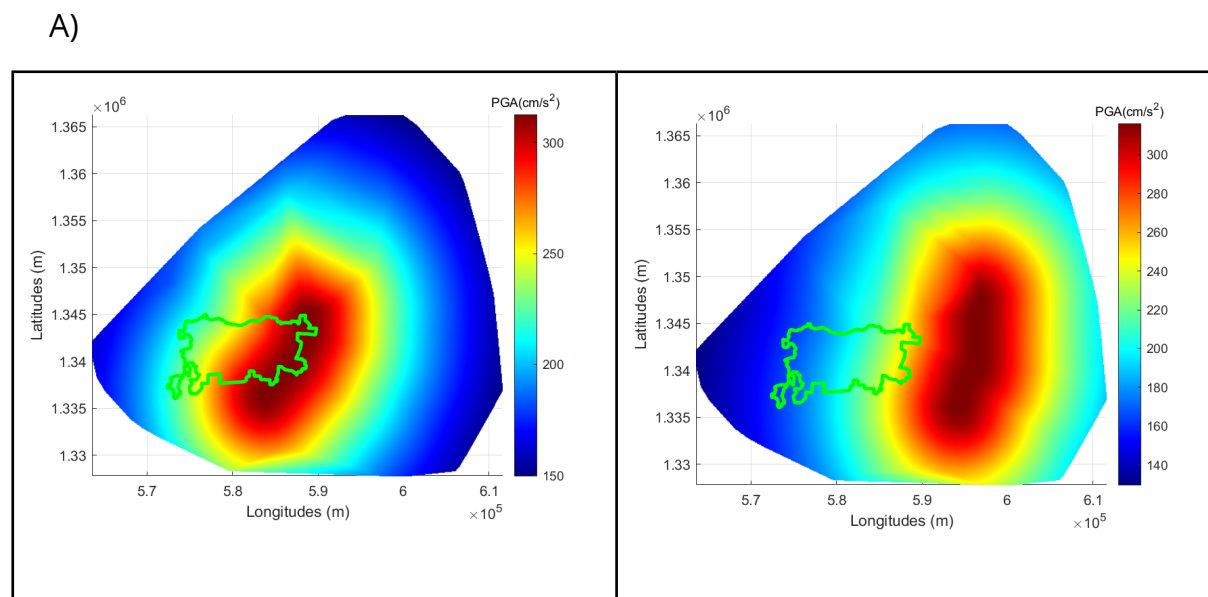
Y es la aceleración máxima en cm/s^2 , M_w es la magnitud de momento, R_{RUP} es la distancia, V_{s30} es la velocidad promedio de ondas S desde superficie hasta 30 m de profundidad del suelo.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

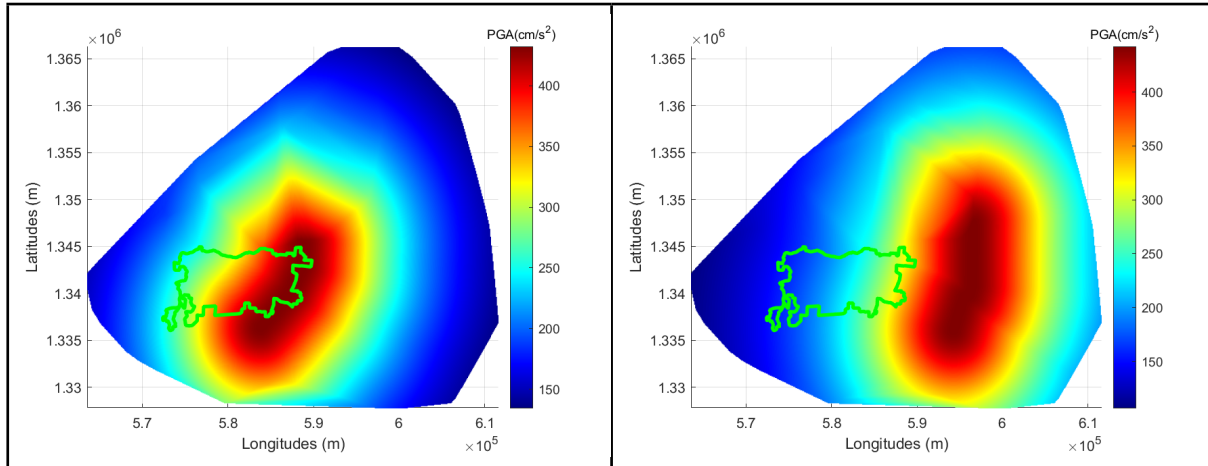
Con base en el método y en los modelos de atenuación del suelo previamente descritos, se elaboraron dos mapas de aceleración máxima del suelo, las cuales fueron calculadas para una malla con retículas de 500 m x 500 m, para cada una de las fallas analizadas. Estos mapas representan la amenaza sísmica que podría generar cada una de estas fallas en la ciudad de Managua.

Figura 3

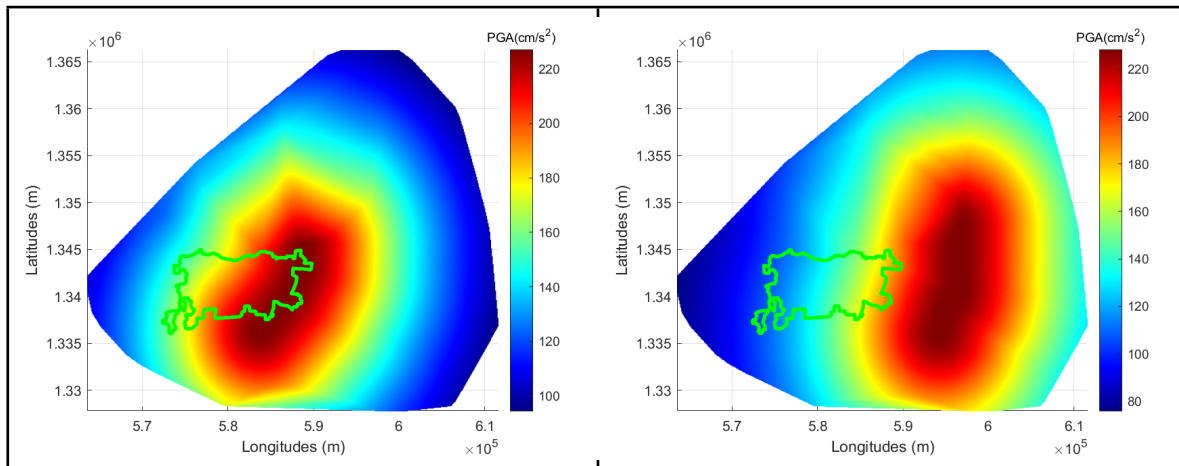
Mapas de aceleraciones máximas



B)



C)



Nota. Comparación de mapas de aceleración máxima (PGA) para las fallas Aeropuerto (izquierda) y Cofradía (derecha). Se asumió una profundidad hipocentral de 7 km para ambos casos. El polígono en verde representa el perímetro del área urbana de la ciudad de Managua.

Las figuras a la izquierda representan mapas de aceleraciones máximas (PGA) para la falla Aeropuerto. Las figuras a la derecha representan mapas de aceleraciones máximas (PGA) para la falla Cofradía. La figura A representa el mapa de aceleración máxima estimada para el modelo de Climent et al. La figura B es el mapa obtenido usando el modelo de Schmidt y la figura C representa el mapa de aceleración máxima estimada para el modelo de Cauzzi et al.

Puede observarse que las aceleraciones máximas generadas por cada falla varían ligeramente para cada modelo de atenuación, esto ocurre dado que las bases de datos de sismos utilizados para cada modelo no son las mismas, adicionalmente, el modelo en sí mismo es condicionante para esta variación, por otro lado, las características geométricas y sismológicas de la fuente para ambas fallas son casi iguales, lo cual produce la similitud en los resultados. Además, dada la mayor cercanía a la ciudad de la falla Aeropuerto, así como de sus características geométricas un terremoto en la misma causaría mayores movimientos del suelo en la ciudad de Managua.

En esta investigación se desarrolló la herramienta computacional denominada EDAS, la cual, como se evidencia a partir de los resultados obtenidos, permite determinar la amenaza sísmica de una zona geográfica específica. Además, este software puede usarse rápidamente para mostrar a estudiantes de las distintas carreras de ingeniería, arquitectura y ciencias de la tierra como afectaría la ruptura de una falla a una ciudad dada. Adicionalmente, técnicos de las alcaldías, y de toda institución relacionada a la gestión del riesgo de desastres como CENAPRED, SINAPRED e INETER podrían usar esta herramienta para apoyarse en sus capacitaciones. Sumado a lo anterior, a través de ferias educativas se podría mostrar a estudiantes de colegios e institutos de secundaria el impacto que tendría un terremoto o la ruptura de una falla en una ciudad particular, generando así además del conocimiento del impacto de la ruptura de una falla, la apertura de la curiosidad por las ciencias básicas y las ingenierías en la juventud.

Por otro lado, el pasar de la percepción a la cuantificación en nuestras universidades, instituciones y comunidades es un aporte muy importante que brinda esta herramienta, y conduce al fortalecimiento de la resiliencia de nuestras ciudades y comunidades, y por ende a salvaguardar las vidas de las familias nicaragüenses.

También, la herramienta contribuiría a que los futuros ingenieros, arquitectos y científicos de las ciencias de la tierra comprendan él porque es importante seguir las normativas de construcción, así como las guías de instituciones dedicadas a la gestión del riesgo de desastres como la guía para la realización de estudios por fallamiento superficial de INETER, pues les permitiría tener un sentido más tangible de la amenaza, dado que pasan del saber que la falla está localizada en un sitio o zona dada de la ciudad a entender rápidamente el cómo afectaría la ruptura de esa falla a un determinado territorio a través de esta herramienta.

Entre las limitaciones del presente estudio se encuentra que la herramienta o software desarrollado se basa exclusivamente en el método determinista para la estimación de la amenaza sísmica. Así mismo, como ocurre con cualquier software utilizado para cálculos en ingeniería, la precisión de los resultados depende directamente de la calidad de los datos de entrada. En esta investigación se utilizaron los datos provenientes de la base de datos actualizada de fallas geológicas de INETER (INETER, 2002). Finalmente, el software utiliza un conjunto predefinido de ecuaciones de predicción del movimiento del suelo seleccionadas en función de la disponibilidad regional.

La innovación de esta investigación radica en que, aunque no redefine el método determinista si mejora su implementación computacional siendo útil a estudiantes e incluso profesionales para realización de estudios preliminares de amenaza sísmica. Su contribución al ámbito académico y profesional estiba en que facilita la replicabilidad de resultados y funciona como una herramienta didáctica además de que puede apoyar en el ámbito profesional en la toma de decisiones en la gestión del riesgo sísmico.

En lo que respecta a la comparación con estudios previos, todos los estudios realizados en Nicaragua hasta la realización de esta investigación se basan en el método probabilístico de amenaza sísmica el cual estima la intensidad del movimiento del suelo a partir de la asignación de un periodo de retorno asociado a determinada probabilidad de excedencia. En cambio, el método determinístico utilizado en esta investigación no se fundamenta en periodos de retorno, sino que se basa en la estimación del movimiento del suelo generado por un escenario sísmico máximo asociado a fuentes sismogénicas específicas. Debido a estas diferencias conceptuales y metodológicas entre ambos enfoques, no es posible realizar una comparación directa de los resultados obtenidos con los de estudios anteriores. No obstante, los resultados pueden ser verificados a partir de las ecuaciones de atenuación y los parámetros de entrada presentados en la metodología.

CONCLUSIONES

1. El aporte más importante de esta investigación consiste en la creación de la herramienta educativa EDAS para la estimación de la amenaza sísmica. El uso de esta herramienta podría facilitar a estudiantes y profesionales de las instituciones vinculadas a la gestión del riesgo, como CEPREDENAC y SINAPRED disponer de un recurso computacional que permite realizar cálculos basados en el método determinista. De esta manera, se contribuye al fortalecimiento de las capacidades técnicas para la evaluación de la amenaza sísmica, lo cual constituye un paso relevante para mejorar el diseño de futuras obras ingeniería.

2. La herramienta presentada permite una estimación rápida del cálculo de intensidad del movimiento máximo del suelo en un sitio dado, lo que conlleva a mejores valoraciones que pueden permitir a organismos como defensa civil conocer los sitios con mayor necesidad para recibir apoyo post-terremoto ante un escenario dado. Esta herramienta a la vez puede contribuir en los ejercicios nacionales para ir cada día logrando una mejor preparación ante terremotos de los países latinoamericanos y del mundo, lo que conllevará a ciudades y comunidades resilientes frente a este tipo de amenaza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Meléndez, A., Ordaz, M., De la Puente, J., Gonzales-Rocha, S. Rodríguez-Lozoya, H., Cordova-Ceballos, A., García-Elías, A., Calderón-Ramón, C., Escalante-Martínez, J., Laguna-Camacho, J., Campos-Ríos, A. (2017). Development and validation of software CRISIS to perform probabilistic seismic hazard assessment with emphasis on the recent CRISIS 2015. *Computación y sistemas*, 21(1), 67-90. doi:10.13053/CyS-21-1-2578
- Brown, R. (1968). Managua, Nicaragua earthquake of January 4, 1968. *U.S. Geol. Surv.*
- Brown, R. D., Ward, P. L., & Plafker, G. (1973). Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquake of December 23, 1972. Washington: USGS. Obtenido de pubs.usgs.gov/pp/0838/report.pdf
- Cauzzi, C., Faccioli, E., & Vanini, M. (2015). Updated predictive equations for broadband (0.01–10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. *Bull Earthquake Eng*, 13, 1587–1612. doi:10.1007/s10518-014-9685-y
- Climent, A. T. (1994). Spectral strong motion attenuation in Central America. *NORSAR*.
- ESRI. (2021). World imagery (wayback 2021-12-21).
- Faccioli, E., Santoyo, E., & León, J. (1973). Microzonation criteria and Seismic response studies for the city of Managua. *Proceedings of the conference on the Managua, Nicaragua Earthquake of December 23, 1972*. California.
- Hedberg, J. (2005). Spectrogram evaluation of seismic risk in Managua, Nicaragua.
- Hernández, O. (2009). Reevaluación del efecto de sitio y propuesta de clasificación de terreno con fines de diseño sísmico para Managua.

- Hodgson, G. (2000). Geología regional de Nicaragua (introducción al léxico estratigráfico de Nicaragua). Managua.
- INETER. (2000). Microzonificación sísmica de Managua. INETER, Managua.
- INETER. (2002). Actualización del mapa de fallas geológicas de Managua. Managua: INETER.
- Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall.
- Martínez, D., & Arai, H. (2011). Effect of surface geology (considering nonlinearity of subsoil) on ground motion in the urban area of Managua, Nicaragua.
- Mathworks. (2021). Matlab user manual. Mathworks.
- MTI. (2022). Norma sismorresistente para la ciudad de Managua.
- Parrales, R., & Ulriksen, P. (2006). Dynamic properties of the soils in the area of Managua, Nicaragua.
- Reiter, L. (1990). Earthquake hazard analysis, issues and insights. N.Y.: Columbia U, Press.
- Schmidt, V. (2014). Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para America Central, con datos de 1972 a 2010. Rev. Geol. De Am. Cent., Vol. 50, 7-37.
- Shah, h., Mortgat, C., Kiremidjian, A., & Zsutty, T. (1975). A STUDY OF SEISMIC RISK FOR NICARAGUA, PART 1. Stanford University, Department of Civil and Environmental Engineering, California.
- Wells, D., & Coppersmith, K. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bull. Seismol. Soc. Am., 974-1002. doi:10.1785/BSSA0840040974