

Fecha de recepción: 11/02/2023

Fecha de aprobación: 19/05/2023

Análisis del estrés de transferencia de la secuencia de terremotos de Turquía, M_w 7.8 y M_w 7.5, 2023

Amilcar Wilfrido Carrera Cevallos¹

Resumen

Este documento relata los cambios que se han obtenido en los dos grandes terremotos que han azotado a Turquía con diferentes epicentros. El 6 de febrero 2023, se produjo un terremoto de $M_w = 7.8$ al sur de Turquía, con epicentro cerca de la frontera norte de Siria. Este evento telúrico tuvo un segundo terremoto 9 horas más tarde, por un movimiento de $M_w = 7.5$ alrededor de 90 km al norte. El $M_w = 7.8$ y las réplicas inscritas se las puede encontrar en la zona de transición de fallas dos falla: Mar Muerto y Oriental de Anatolia. El terremoto con su ubicación preliminar se lo coloca en las cercanías de una triple unión: Placa Arábiga y africana y por último el bloque de Anatolia. Esta última falla adapta el movimiento hacia el oeste de Turquía hacia el Mar Egeo, por otro lado, la falla del Mar Muerto adecúa el movimiento hacia el norte de Arabia en su península con relación a la placa africana. Evento que rompió una brecha sis-

mica de más de 200 kilómetros de largo y 40 kilómetros de ancho. El objetivo es de contribuir y dar a comprender el papel del estrés de transferencia de la secuencia de terremotos en evolución de Turquía. El uso de instrumentos y conocimientos estadísticos permitieron pronosticar la distribución futura de réplicas y así poner a consideración la posibilidad de terremotos primarios posteriores; siendo un punto de partida para futuros terremotos de igual o mayor magnitud.

Palabras clave: Sismo, terremoto, ingeniería sísmica.

Abstract

This document describes the changes that have been achieved during the two great earthquakes that hit Turkey with different epicenters. On February 6, 2023, an earthquake of $M_w = 7.8$ occurred south of Turkey, with an epicenter near the north-

¹ Amilcar Wilfrido Carrera Cevallos, <https://orcid.org/0000-0001-5554-2649>, Investigador independiente, amilk1204@hotmail.com

ern border of Syria. This telluric event had a second earthquake 9 hours later, by a movement of $M_w = 7,5$ about 90 km to the north. The earthquake $M_w = 7,8$ and inscribed aftershocks can be found in the transition zone of faults two faults: the Dead Sea and Eastern Anatolia. The earthquake with its preliminary location is placed near a triple junction: Arabian and African plates and finally the Anatolian block. This last fault adapts the westward movement of Turkey towards the Aegean Sea; on the other hand, the Dead Sea fault adapts the northward movement of Arabia in its peninsula about the African plate. The event broke a seismic gap more than 200 kilometers long and 40 kilometers wide. The aim is to contribute and raise awareness of the transfer stress role of Turkey's evolving earthquake sequence. Providing tools and knowledge will help forecast the future distribution of aftershocks, thus allowing considering the possibility of subsequent primary earthquakes; although it is preliminary hope that it will be timely; being a starting point for future earthquakes of equal or greater magnitude.

Keywords: Earthquake, earthquake, seismic engineering.

Introducción

La Zona de Falla de Anatolia Oriental (ZFAO) es una falla de deslizamiento lateral izquierdo morfológicamente distinta y sísmicamente activa que se extiende por ~ 400 km y forma el límite de la placa arábiga / anatolia en el sureste de Turquía (Arpat & Şaroğlu, 1972). La Zona de Falla de Anatolia Oriental históricamente ha tenido eventos telúricos $M_w > 7.0$, siendo así una relación sísmica en los eventos suscitados el 6 de febrero del 2023, catalogado como una recurrencia sísmica (Rojay et al., 2001; Altunel et al., 2009; AKGÜN & İNCEÖZ, 2021), las que han presentado soluciones focales de mecanismo, mostrando un deslizamiento puro como en el “terremoto Malatya 1905 de magnitud 6,8; terremoto Bingöl 1971 de magnitud 6,7; terremoto Sürgü 1986 de magnitud 6,0; terremoto Bingöl 2003 de magnitud 6,4; terremoto Karakoçan- Elazığ 2010 de magnitud 6,0 ; terremoto de Elazığ 2020 de magnitud 6,8” (Balun et al., 2020; Doğru et al., 2021; Pousse-Beltran et al., 2020; Ragon et al., 2021; Akbayram et al., 2022). Por lo tanto, la recurrencia sísmica

para el país turco hace que la acumulación de energía sea alta además de que, cuando un terremoto ocurre, hace que la Zona de Falla de Anatolia Oriental se vuelva inestable provocando réplicas de igual magnitud a un terremoto primario o no menor a M_w 6.0, provocado esencialmente por las brechas sísmicas existentes para terremotos de $M_w > 7.0$.

Luego del terremoto de M_w 7.8 el 6 de febrero con epicentro en Giziantep- Nurdagi y el terremoto de magnitud 7,5 Kahramanmaraş- Ekinöz (USGS, 2023a; USGS, 2023b) fueron asociados a la Zona de Falla de Anatolia Oriental. Las magnitudes de estos dos megaeventos telúricos fueron reportados por las diferentes instituciones globales de terremotos, geociencias e institutos como se enlista en la Tabla 1; eventos telúricos que azotaron el sur del país turco limítrofe con Siria, donde miles de edificaciones de ambos países han colapsado, dejando miles de muertos y cientos bajo los escombros (Parra, 2023). El número de víctimas (50.000 pérdidas humanas), al momento de escribir este artículo, continuó en aumento a medida que se fueron retirando los escombros. Centenares de ré-

plicas de diversas magnitudes siguen sacudiendo el epicentro de la región devastada, proporcionando mayor cantidad de daños en edificaciones, vías de acceso, líneas de tren y diversas infraestructuras (Doğangün et al., 2013; Toda & Stein, 2020; Di Sarno & Pugliese, 2021; Dogan et al., 2021; Nemutlu et al., 2021), provocando obstáculos y encareciendo los esfuerzos de rescate y socorro por los grupos rescatistas. Por lo que, científicos alrededor del globo terráqueo se mantienen en alerta con el análisis de los datos del evento suscitado para comprender lo sucedido.

Este documento tiene como objetivo dar a conocer los diferentes cambios de tensión que se han provocado por los dos terremotos de magnitudes M_w 7.8 y M_w 7.5 en Turquía, además de las características sísmicas y geotectónicas de los dos eventos. El tamaño de estos movimientos telúricos contiene parámetros fundamentales tanto para el interés científico como del público en general.

Materiales y métodos

Para esta investigación, se hizo el uso de instrumentos principales como ese el análisis de datos: los terremotos del catálogo ANSS del Servicio de Geología de USA (USGS, 2023a; USGS, 2023b); mapeo de fallas activas en la agencia turca. Asimismo, la literatura existente (Güvercin et al., 2022) siendo crucial para determinar las réplicas a futuro de los dos terremotos de gran magnitud, respectivamente; modelos que sirvieron de fuente hacia los eventos más grandes. El uso del software Coulomb 3.3 de transferencia de tensión estática sirvió de ayuda para determinar el tipo de trabajo de la corteza terrestre estableciéndola como un semi-espejo elástico (Toda et al., 2011), en pocas palabras, se modela la cor-

teza como si su comportamiento fuera un bloque rígido de goma. Este tipo de cálculos estadísticos se realizaron días posteriores a los terremotos mencionados anteriormente, catalogándolos como preliminares, puesto que, por el tiempo de recurrencia de terremotos puede suceder una réplica igual o mayor a los eventos telúricos de M_w 7.8 y M_w 7.5.

Este tipo de movimiento se los trata como cortes que, de acuerdo con el USGS, brindan información sobre la extensión espacial, la amplitud del mismo y la ruptura en la duración -estos son los modelos de fallas finitas (USGS, 2023b) refiriéndose a que se pueden modelar y ver el tamaño de la ruptura ocasionada por el terremoto. También se ha asumido el coeficiente de fricción en las fallas que reciben tensión y para esto se utilizó 0,4 como valor de rango promedio utilizado ampliamente en estudios posteriores (Rollins & Stein, 2010). Una fricción de valor 0 es sin duda una falla perfectamente inconveniente, por lo que se comportaría como un Politetrafluoroetileno (teflón). Esto se refiere que, si su fricción es cero, literalmente se quebraría fácilmente. Un valor de 0.75 se aplicaría a una superficie de falla geológicamente joven y rugosa: el movimiento está restringido y es difícil de superar.

¿Por qué el origen de estos eventos arrojó resultados devastadores?

Para tener una comprensión más clara sobre el punto sismo-génico de los eventos ocurridos hay que entender que existen tres tipos de estructuras que dan orden a las placas tectónicas activas. Al norte de la placa, en la falla de Anatolia intra-continental con un *traslación dextral* (desplazamiento de placa 20-25 mm/año) (Taymaz et al., 1991; Duman & Emre, 2013), este mismo representa el límite de la placa

Tabla 1

Listado de la información proporcionada por las instituciones globales de terremotos, geociencias e institutos

| Evento | 1 | 2 | |
|---|--|-----------------|---------------|
| Tiempo en coordenadas universales | 01:17:34 (UTC) | 10:24:49 (UTC) | |
| Grados de latitud | 37.225 | 38.024 | |
| Grados de longitud | 37.021 | 37.203 | |
| Profundidad del evento (km) | 17,5 km | 15,5 km | |
| Primer plano (dirección/ buzamiento/rumbo) | 318°/ 89°/ 179° | 277°/ 78°/ 4° | |
| Segundo plano (dirección/ buzamiento/rumbo) | 228°/ 89°/ -1° | 186°/ 87°/ 168° | |
| Magnitud | Centro de Redes de Terremotos de China | M_w 7.7 | M_w 7.6 |
| | Centroide-Momento-Tensor Global | M_w 7.8 | M_w 7.7 |
| | Centro Alemán de Investigación en Geociencias | M_w 7.7 | M_w 7.6 |
| | Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología | M_{WPD} 7.9 | M_{WPD} 7.5 |
| | Servicio Geológico de los Estados Unidos | M_{WPD} 7.8 | M_{WW} 7.5 |
| | | | |

Anatolia con la Euroasiática; la falla intercontinental mostrando un movimiento siniestro (Duman & Emre, 2012; Coban & Sayil, 2020) mostrando también un desplazamiento 06-10 mm/año, representando también el límite entre las dos placas Anatolia y la Arábica, con un sistema de subducción *Ageo.Ciprano* (movimiento compresivo) con ubicación mediterránea. Tomando a consideración el terremoto de M_w 6,7 ocurrido el 24 de enero del 2020, el cual se generó a 8 kilómetros de profundidad, que rompió 50 kilómetros de largo y 15 kilómetros de ancho en el ancho del segmento de la falla de Anatolia (Cheloni & Akinci, 2020; Gallovič et al., 2020; Pousse-Beltran et al., 2020); incrementando de forma característica la sismicidad en la falla durante la fase *intersísmica* (período de eventos de gran magnitud) (Xu et

al., 2020; Chen et al., 2020; Taymaz et al., 2021) Figura 2. El terremoto que suscitó el 6 de febrero del 2023 con magnitud de 7.8 ocasionó que la brecha al suroeste de la placa de Anatolia, evento que tuvo origen a 18 kilómetros; por lo que la ruptura bilateral tuvo una extensión de 200 kilómetros de largo y 40 kilómetros de ancho, liberando así 3,5 metros de deslizamiento que estuvo acumulado durante el período *intersísmico*.

Estas características ocasionaron que el origen de las sacudidas del suelo sea muy intenso, conteniendo aceleraciones de superficie mayores a 70% de la gravedad terrestre en zonas que estaban cerca del epicentro; un equivalente a intensidad IX en la escala de Mercalli modificada (Izgi et al., 2020). Siendo así regiones como Aleppo, Siria, donde recibieron aceleraciones

de 10%- 15% de la aceleración de la gravedad, siendo resultante para provocar enormes daños en estructuras y edificaciones provocando un impacto significativo en la muerte de cientos de miles de personas.

Con la evaluación de la probabilidad mediante el modelo T-GEAR de temblores, un software permite determinar los terremotos además de sus períodos de retorno Tabla 2. Se debe tener en cuenta que se consideran los terremotos como eventos independientes, aunque estos eventos no son el caso. Estas geometrías de fallas modeladas pueden refinarse utilizando observaciones de campo e imágenes de satélite que capten la deformación de la superficie. Sin embargo, prescribir estrictamente la geometría de la falla puede sesgar la interpretación de la solución, porque limitar la flexibilidad del modelo puede enmascarar detalles ocultos de la ruptura y geometrías de falla que a veces no se pueden observar en la superficie (Shimizu et al., 2020). La placa tiene un deslizamiento anual de 10 milímetros aproximadamente (Galović et al., 2020; Güvercin et al., 2022). Desde el inicio de 1795 se tienen registros de terremotos de magnitud 6,7-7,2 en la Zona de Falla de Anatolia Oriental (Köküm & Özçelik, 2020).

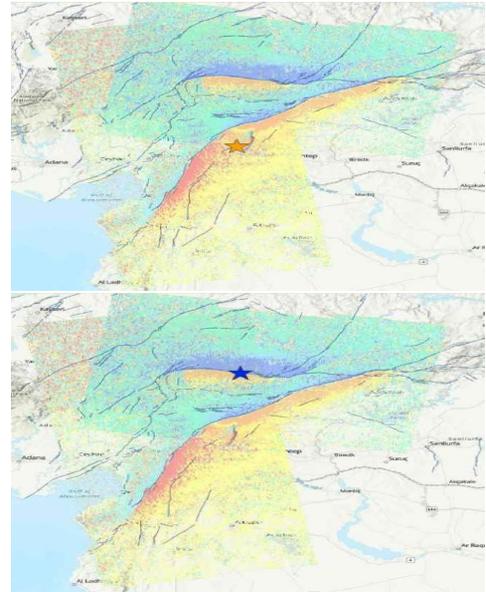
Tabla 2

Registro histórico de la falla oriental y el tiempo de retorno que concede

| Terremotos al este en la zona de falla oriental anatolia | | |
|---|--|--------------------------------|
| Magnitud | Espectro en el tiempo de repetición | Probabilidad de 30 años |
| Mw ≥ 7,5 | 361 ± 30 años | 8.0% |
| Mw ≥ 7,8 | 1763 ± 319 años | 1.7% |

Figura 1

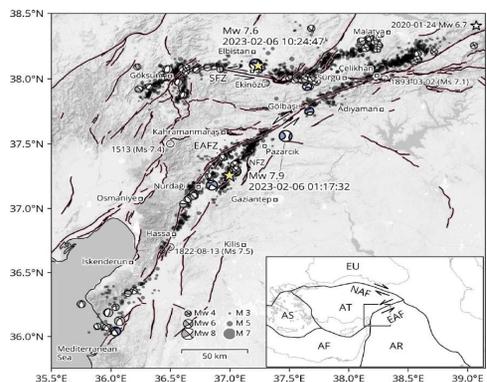
Epicentro del terremoto Mw 7.8 (estrella naranja) y epicentro terremoto Mw 7.5 (estrella azul)



Nota. Las estrellas amarillas muestran los epicentros, las pelotas de playa de color azul son las soluciones de los mecanismos focales de ambos terremotos y las pelotas de playa de color gris representan las réplicas durante la secuencia sísmica ocurrida desde el primer evento.

Figura 2

Registro y evolución de los terremotos sucedidos el 6 de febrero del 2023 en la Zona de Falla de Anatolia Oriental. y epicentro terremoto Mw 7.5 (estrella azul)



Se considera que estas estimaciones son de forma consistente con el breve registro histórico, así como el deslizamiento bajo que presenta la falla (Işık et al., 2017) y la cantidad de desplazamiento que contempla los terremotos en la placa. Por tal razón, la falla es de longitud más corta y su deslizamiento es lento resultando que no ha tenido una progresión similar a los del último siglo en terremotos (Balkaya et al., 2021).

El primer sismo M_w 7.8 ¿desencadenó el siguiente evento sísmico de M_w 7.5?

El evento sísmico primario fue de movimiento izquierdo lateral, consistente al movimiento de la Zona de Falla de Oriental Anatolia (Bletery et al., 2020). En primera instancia se debe hacer el cálculo del estrés que se impartió a las fallas contiguas suponiendo que sean paralelas a la ruptura de magnitud 7.8 (Tatar et al., 2020; Tada-pansawut et al., 2021; Melgar et al., 2023; Reitman et al., 2023). Por lo que, en el escenario mostrado, el estrés va en aumento yendo más allá de los extremos de ruptura correspondiendo bien a los días principales de las réplicas. Del mismo modo, se realiza el cálculo en las fallas que rodean el área de Sürgü y Çardak, donde probablemente se rompieron durante el evento sísmico de magnitud 7.5. Mientras tanto, en las zonas finales de la falla se ha observado un aumento de tensión en los cálculos entre de 3-5 barras (Las barras describen unidades de tensión). Las fallas en los sitios mencionados anteriormente no tuvieron réplicas mayores o des igual magnitud $M_w > 4,1$ durante un periodo de 9 horas entre los terremotos de magnitud 7.8 y 7.5 Figura 3. No hay existencia alguna que en los cálculos hubieran permitido prever el epicentro o tamaño del movimiento telúrico magnitud 7.5.

En el cálculo retrospectivo de las fallas

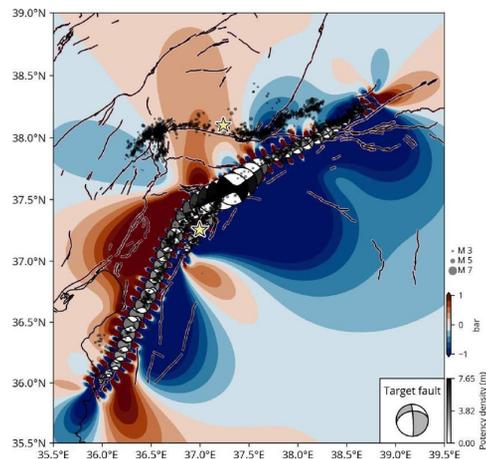
Sürgü y Çardak pudieron haber experimentado un aumento de 1-2 barras hacia la falla. La distribución en el aumento de tensión da una coincidencia aproximada con la ruptura anterior. El cálculo fue ejecutado después del terremoto de magnitud 7.5, no teniendo valor predictivo; más bien permite expresar, que probablemente el terremoto de magnitud 7.8 causó el de magnitud 7.5. El aumento de la tensión no supera el 5% de las aproximaciones de barras (Toda et al., 2011) creyendo que se acumulan antes que la falla se rompa.

Secuencia del terremoto M_w 7.8 y M_w 7.5

El 6 de febrero de 2023, en un lapso de nueve horas, ocurrieron dos terremotos en Turquía. El primero de M_w 7.8 en el

Figura 3

Cálculo de estrés de Coulomb simple.



Nota: Impartido por el terremoto de Gaziantep-Nurdağı M_w 7.8 y M_w 7.5 (epicentro con una estrella) basado en la fase en que la ruptura inició, además de evidenciar las pelotas de playa que son las soluciones del momento tensor a lo largo de la ruptura (Bonita et al., 2015; Melgar et al., 2023). Las tensiones de Coulomb se calcularon con un coeficiente de fricción de 0,4.

sur del país y el otro de M_w 7.5 a unos 90 km al norte (Figura 4). El más fuerte de estos sismos generó réplicas en la zona de transición entre los sistemas de fallas del Mar Muerto y de Anatolia Oriental. La localización preliminar del sismo de M_w 7.8 lo situó en una zona neurálgica entre las placas Arábiga y Africana y el bloque de Anatolia (Güvercin et al., 2022). La falla de Anatolia Oriental se adecuó al movimiento hacia el oeste de Turquía en el Mar Egeo, mientras que la del Mar Muerto se adaptó al movimiento hacia el norte de la península de Arabia en relación con la placa Africana.

La región donde se produjo el terremoto de M_w 7.5 es sísmicamente activa, con un rango moderado ($<M_w$ 7.0) en comparación con las zonas cercanas del límite de placas en Turquía. El epicentro de este evento lo sitúa en la falla de Sürgü, directamente al oeste de la falla de Anatolia Oriental. Las regiones del Sur y el Norte de Turquía no han escapado de los terremotos de gran magnitud a pesar de ser evaluada por los expertos como una zona de sismicidad moderada.

Acontecimiento de las futuras réplicas

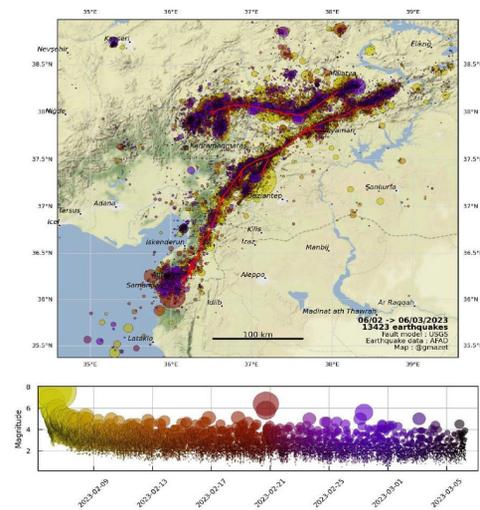
El prevenir terremotos no es posible o advertir con la tecnología que existe hoy en día. Sin embargo, tomar precauciones es posible para disminuir las pérdidas creadas por los terremotos. En la determinación de estas precauciones a tomar, los escenarios de terremotos tienen un lugar significativo (Işık, et al., 2016). Con el reajuste de la corteza se dan los cambios de tensión produciendo réplicas innumerables (Bird & Kreemer, 2015); por tal razón el país tuvo un registro de terremotos de magnitud $M_w > 6,0$ horas posteriores del gran evento telúrico inicial.

La réplica de mayor magnitud se produjo once minutos después del primer terremoto (Coban & Sayil, 2020), por lo que se pone a consideración la tensión que es la resultante que se creó para los terremotos de magnitud 7.8 y 7.5 y su correlación con las réplicas después del terremoto de magnitud 7.5. Asimismo, se considera la distribución de secuencia sísmica en la Zona de Falla de Anatolia Orienta como se observa en las Figuras 5 y 6. Las réplicas mayores a $M_w > 5.0$ provocaron que las edificaciones resultantes que se encuentran debilitadas cedan al colapso total, además las réplicas mayores a $M_w > 5.0$ tienen una estimación aproximada de 250 días (Rekapalli & Gupta, 2023).

Después de los dos grandes terremotos, en

Figura 4

Secuencia de terremotos de 2023



Nota. El terremoto de M_w 7.8 y las réplicas anteriores al terremoto de M_w 7.5 son de color naranja oscuro, y el terremoto de M_w 7.5 y posteriores son de color amarillo claro. Los cambios de color se utilizan para visualizar mejor los componentes de la ruptura compleja.

su interacción, se observa que los lóbulos de tensión del mismo han tenido un cambio significativo después del terremoto de magnitud 7.5 (Yaghmaei-Sabegh et al., 2017). Teniendo en cuenta que la franja que recorre de este a oeste siendo más común que la franja que se encuentra al noroeste del epicentro del terremoto de magnitud 7.8. Conjuntamente, la correlación de las regiones que presentan réplicas que se calculó al momento de la tensión es de visibilidad clara (Strader et al., 2018). La información proporcionada da confirmación que, las tensiones del punto, afectan el prorrato de las réplicas, dando como resultado que las decadencias de los lóbulos de la tensión muestran las ubicaciones de probabilidad de réplica. Este algoritmo de cálculo no solo permite predecir si podría ocurrir un réplica de mayor desastre; demuestra una guía para comprender las posibilidades de ubicación de impacto ante cualquier índole sísmica.

Análisis de la falla finita en los terremotos de magnitud 7,8 y magnitud 7,5

La falla Oriental de Anatolia converge en unos 550 km en su longitud, la misma que tiene convergencia con la Placa Arábiga. La interacción de ambas placas hace una transferencia importante de tensión durante grandes eventos telúricos. La fuente del primer y segundo terremoto indica una ruptura longitudinal en aproximación de 400 km y 200 km, respectivamente. Estas modelaciones sirven de ayuda para informar dónde ocurrió el sismo y la contextualización en el marco sismo-tectónico para ambos eventos.

Terremoto magnitud 7,8: El modelo de falla finita del terremoto de magnitud 7,8 (Figura 7) tiene observaciones de 45 ondas P telesísmicas, 27 ondas SH y 72 on-

das superficiales de largo periodo (USGS, 2023b) que fueron seleccionadas en función de calidad de datos y distribución azimutal. Las formas de onda, en primera instancia se convierten en un desplazamiento donde se elimina la respuesta ante el instrumento para luego utilizar la restricción del historial de deslizamiento en el cual se usa el algoritmo inverso de falla finita (Ji et al., 2002).

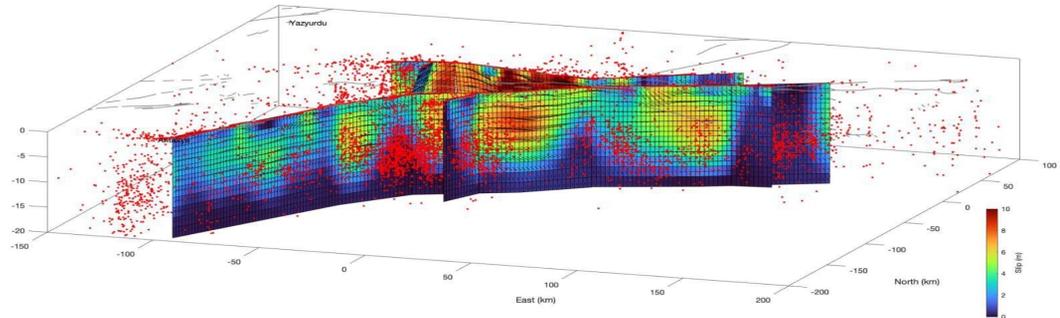
Terremoto magnitud 7,5: El modelo de la falla finita para el terremoto de magnitud 7,5 incluye observaciones de 38 ondas P telesísmicas, 28 ondas SH telesísmicas y 48 ondas superficiales de largo periodo (USGS, 2023b) que fueron seleccionadas en función de calidad de datos y distribución azimutal. Las formas de onda, en primera instancia se convierten en un desplazamiento donde se elimina la respuesta ante el instrumento para luego utilizar la restricción del historial de deslizamiento en el cual se usa el algoritmo inverso de falla finita (Ji et al., 2002).

Resultados y discusión

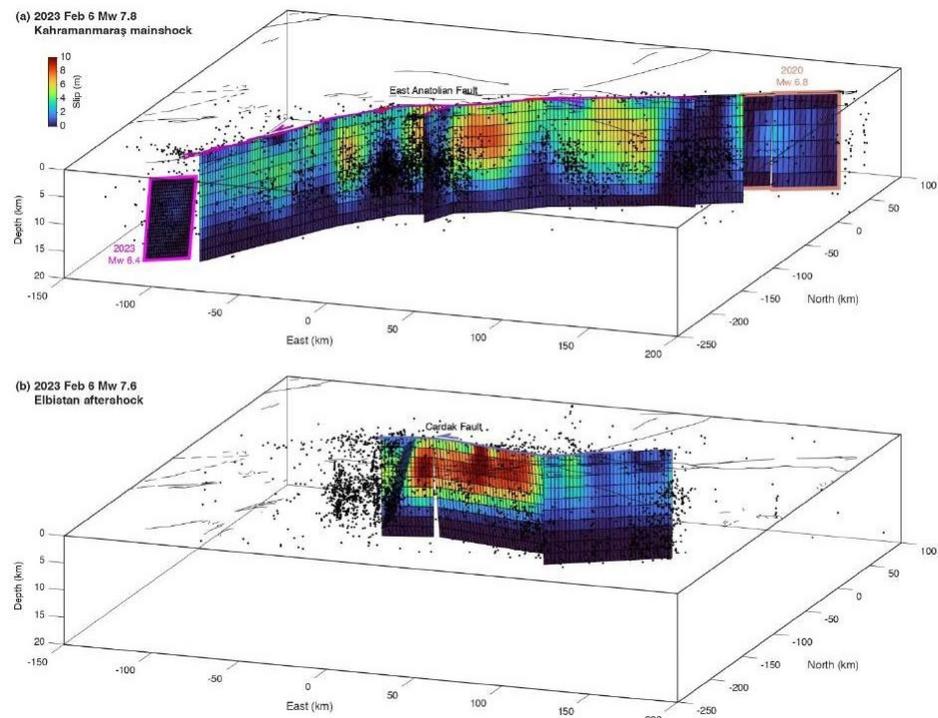
La Figura 9 muestra las soluciones del momento tensor de ambos terremotos ocurridos el 6 de febrero del 2023 más el de Elazig suscitado en el 2020. Mediante las diversas instituciones de sismología alrededor del mundo se pudo determinar la tasa del momento en función del tiempo de terremoto M_w 7.8- M_w 7.5. La ruptura superficial y la función de velocidad de momento del terremoto de 2023 M_w 7.8 muestran que este evento rompió múltiples segmentos, y que la tensión en la falla fue alta durante una parte significativa de la Zona de Falla de Anatolia Oriental. La ruptura se detuvo en una clara barrera en el noreste, donde tres fallas se conectan entre sí y la dirección de buzamiento de la falla

Figura 5

Reubicación de las réplicas (puntos rojos) se concentran en las principales curvas de falla y en la periferia de grandes parches de deslizamiento. Mediante la distribución de la sismicidad, se delimitó la extensión de la profundidad de la ruptura para ambos terremotos M_w 7.8- M_w 7.5

**Figura 6**

Distribución de deslizamiento de la secuencia sísmica del 6 de febrero, M_w 7.8 y M_w 7.5, Kahramanmaraş, Turquía en la Zona de Falla de Anatolia Oriental.



Nota. El deslizamiento cosísmico se extiende desde la superficie hasta unos 15 km de profundidad con un déficit de deslizamiento poco profundo (Barbot et al., 2023). Para el choque principal, la propagación de la ruptura se detuvo hacia el sur en la terminación difusa de la falla de Anatolia Oriental y se redujo hacia el norte en el segmento de Pütürge, a unos 20 km al sur del terremoto de Elazığ de 2020 M_w 6.8, destacando una posible brecha sísmica (Lomax, 2023).

Figura 7

Modelo de falla finita M_w 7.8 comunicado por el (USGS, 2023b); (a) segmento 1, (b) segmento 2, y (c) segmento 3. El modelo recortado corresponde a partes de la superficie de ruptura con un deslizamiento > 15% del deslizamiento máximo (11,21 m).

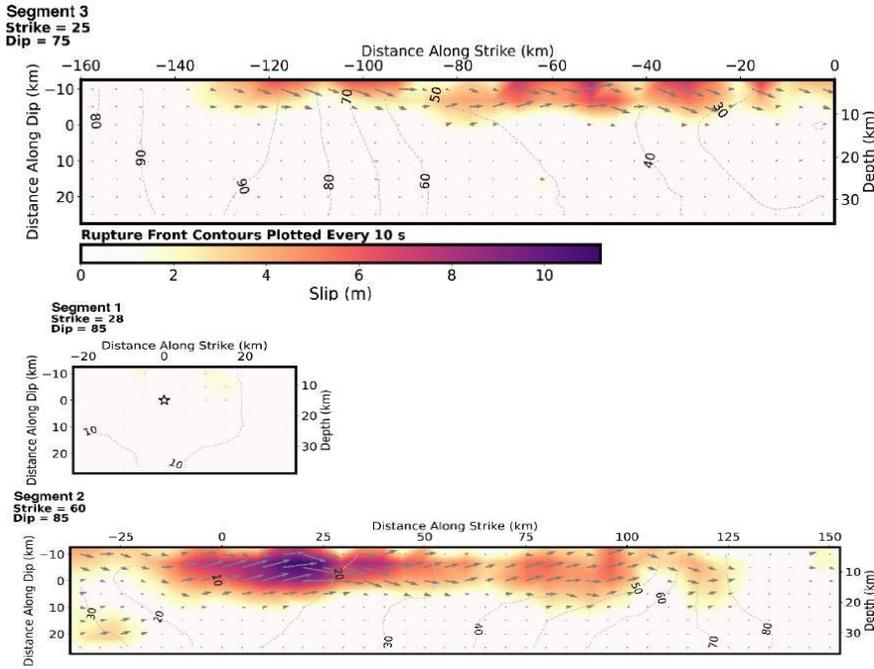
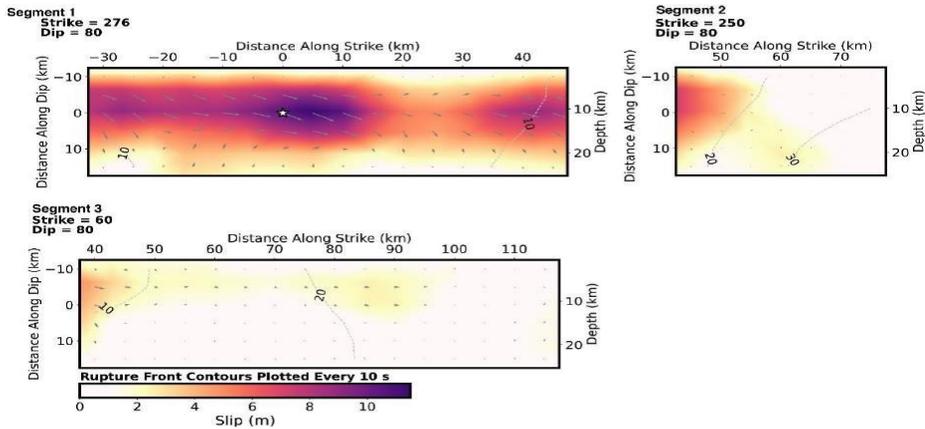


Figura 8

Modelo de falla finita M_w 7.8 comunicado por el (USGS, 2023b); (a) segmento 1, (b) segmento 2, y (c) segmento 3. El modelo recortado corresponde a partes de la superficie de ruptura con un deslizamiento > 15% del deslizamiento máximo (11,21 m).



a lo largo de la Zona de Falla de Anatolia Oriental cambia.

Terremoto magnitud 7,8: En el resultado del terremoto de magnitud 7,8 se tuvo como base en el plano nodal del momento tensor en dirección de $28,0^\circ$ y buzamiento de $85,0^\circ$ provocando una liberación del momento sísmico $M_0 = 6,51 \times 10^{20}$ Nm; $M_s = 7,9$ basado en el gráfico de la tasa de momento, además del empleo del modelo de corteza de una dimensión de interpolación. Se hizo el uso de tres segmentos planos los cuales se diseñaron para que puedan coincidir al conocimiento de la falla: segmento 1) con una dirección de $28,0^\circ$ y buzamiento de $85,0^\circ$; segmento 2) con una dirección de $60,0^\circ$ y buzamiento de $85,0^\circ$ y el segmento 3) con una dirección de $60,0^\circ$ y buzamiento de $75,0^\circ$. Como se observa en la siguiente figura 10 en la distribución de deslizamiento transversal del terremoto de magnitud 7,8. Por último, se hizo uso de la función tasa de momento donde se pudo describir la tasa de liberación de momento en el tiempo después del origen del terremoto, con lo que se pudo relacionar con la tasa del terremoto pico de la misma que está enumerada en la esquina superior derecha de la Figura 10.

Terremoto magnitud 7,5: En el resultado del terremoto de magnitud 7,5 se tuvo como base el plano nodal del momento tensor en dirección de $276,0^\circ$ y buzamiento de $80,0^\circ$ con una liberación del momento sísmico $M_0 = 3,54 \times 10^{20}$; $M_s = 7,8$ basado en el gráfico de la tasa de momento.

Además del empleo del modelo de corteza de una dimensión de interpolación, se hizo el uso de tres segmentos planos los cuales se diseñaron para que puedan coincidir al conocimiento de la falla: segmento 1) con una dirección de $276,0^\circ$ y buzamiento de

$80,0^\circ$; segmento 2) con una dirección de $250,0^\circ$ y buzamiento de $80,0^\circ$ y el segmento 3) con una dirección de $60,0^\circ$ y buzamiento de $80,0^\circ$. Como se observa en la siguiente figura 11 en la distribución de deslizamiento transversal del terremoto de magnitud 7,5. Por último, está la función de la tasa de momento que da descripción a la tasa de liberación de momento en el tiempo después del origen del terremoto, esto en relación con la tasa del terremoto pico la misma que está enumerada en la esquina superior derecha la Figura 11. La discontinuidad de la línea roja representa el final de la interpretación del evento.

Análisis de tensión de Coulomb de ambos terremotos

Para ilustrar las interacciones entre los dos terremotos de mayor magnitud y cómo estos grandes terremotos pueden controlar la distribución de las réplicas en las terminaciones de dos rupturas, así como las fallas vecinas, se hizo la modelación de los cambios en la tensión de falla de Coulomb, se presenta la Figura 12.

Asimismo, el coda de largo periodo ya fue calculado (Jiang et al., 2023), que contiene un error estándar tanto del primer como el segundo terremoto 7.95 ± 0.013 y 7.86 ± 0.012 , siendo superior a los mostrados por el (USGS, 2023a, 2023b), además de que, el primer terremoto, por la gran liberación de energía, es catalogado como uno de los más grandes de Turquía.

En el proceso de la ruptura en el evento tuvo una liberación cuestionable de energía por lo que se lo relaciona de forma intuitiva a la extensión de la falla, esto a través del momento sísmico que se tuvo y la incompatibilidad entre la tensión en el momento que ocurrió la falla y la tensión

Figura 9

Solución de momento tensor del terremoto del 6 de febrero del 2023. M_w 7.8- M_w 7.5 más la solución del momento tensor del terremoto de Elazig 2020

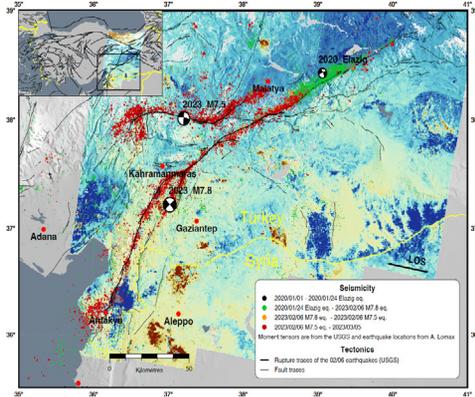


Figura 11

Tasa de momento en función del tiempo el cual representa el final de interpretación del evento y el momento sísmico estimado que es la liberación de energía.



Nota. En el eje de las ordenadas los valores comprenden a la fase del momento tensor y en eje de las abscisas el tiempo de respuesta de liberación de energía.

Figura 10

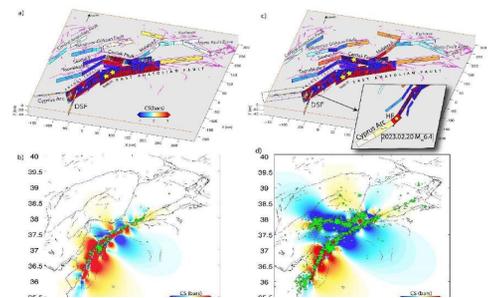
Solución de momento tensor del terremoto del 6 de febrero del 2023. M_w 7.8- M_w 7.5 más la solución del momento tensor del terremoto de Elazig 2020



Nota. En el eje de las ordenadas los valores comprenden a la fase del momento tensor y en eje de las abscisas el tiempo de respuesta de liberación de energía.

Figura 12

Análisis de las tensiones de Coulomb de la secuencia sísmica de 2023 en Turquía.



Nota. Cambios de las tensiones de Culombio en las fallas receptoras tras el terremoto de M_w 7.8. Las estrellas amarillas muestran las ubicaciones de los terremotos de M_w 7.0 y M_w 7.8. b) Cambio de tensión a una profundidad de 10 km del terremoto M_w 7.8. Los círculos verdes representan los epicentros de las réplicas durante las primeras 9 horas antes del terremoto de M_w 7.5. c) Son los cambios de tensión acumulados por los terremotos. La estrella amarilla representa el terremoto de Hatay del 20 de febrero de 2023 M_w 6.4 aumentado en recuadro para mayor visualización. d) Cambios acumulativos de tensión calculados a 10 km de profundidad. Los círculos verdes muestran los epicentros de las réplicas durante los primeros 15 días de actividad y escalados por magnitud.

de la fricción provocada. Por lo que el inicial otorga la cantidad energética acumulada en la deformación en la falla a consecuencia de la carga telúrica.

Estudios anteriores revelan que la energía focal en el epicentro de los terremotos tiene una gran acumulación sísmica siendo un pulso claramente cercano en la atribución del fenómeno de ruptura, por lo que una llegada de fase tardía del evento en el sismógrafo asumiría que el segundo terremoto de magnitud 7.5 respalda en la hipótesis de asociación con el terremoto de magnitud 7.8 asociada a la ruptura. Estos dos eventos evidencian un tamaño equivalente relativamente.

El terremoto de $M_w 7.8$ se rompió bilateralmente a lo largo de las direcciones NE y SO, a lo largo de unos 140 y 130 km, respectivamente. La longitud total de la ruptura y la duración de la fuente fueron de ~270 km y 80s, respectivamente. A partir de los patrones de fallas resueltos, se estimaron los movimientos del terreno y se evaluaron a las víctimas. Otro fenómeno interesante es la interacción entre fallas sísmicas que se muestra en la secuencia del terremoto de Turquía. El terremoto de $M_w 7.5$ que se localizó ~95 km al norte del epicentro, se produjo ~9 h después del terremoto de $M_w 7.8$. Es probable que la falla sismogénica del terremoto de $M_w 7.5$ fuera desencadenada por el terremoto de $M_w 7.8$. La forma en que las fallas con dirección NE afectan a la falla de Cardak con dirección OE y a las fallas cercanas justifica una mayor investigación.

Conclusiones

La estimación de momento sísmico para cada terremoto se concluye en: Terremoto de $M_w 7.8$ tiene un momento sísmico de M_0

$= 6,51 \times 10^{20}$ y para el terremoto de $M_w 7.5$ tiene un momento sísmico de $M_0 = 3,54 \times 10^{20}$; esto significa la cantidad de energía que se ha liberado durante el terremoto.

El momento de magnitud para los dos terremotos turcos proporcionan no sólo una restricción adicional en el tamaño de los terremotos, sino también un límite superior para otras estimaciones de las magnitudes. Sin embargo, al comparar la M_w y el GCMT M_w , uno necesita ser consciente de las probables diferencias sistemáticas entre ellos. Los diferentes tipos de magnitudes e incertidumbres de medición y el primer choque principal ($M_w 7.95$) coinciden con los terremotos más grandes registrados en la historia turca (incluido el terremoto de Erzincan de 1939 con $M_w 7.8$ y el terremoto de Anatolia del Norte de 1668 con $M_s 7.8-8.0$).

La combinación de ambos fenómenos provocó un aumento de las tensiones en varias grandes zonas de fallas de la región circundante, como el arco oriental de Chipre, la falla del Mar Muerto y varias fallas del este de Anatolia. Sin embargo, los dos mayores eventos de 2023 cambiaron el estado de tensión de toda la placa de Anatolia, con una importante deformación interna. Considerando que la actividad sísmica tras estos dos terremotos se extiende a más de ~300 km de distancia de la zona de ruptura, es posible que las fallas de toda la placa de Anatolia sean propensas a generar actividad sísmica de alto nivel y terremotos de tamaño moderado durante décadas durante el período pos sísmico y la relajación de la corteza inferior.

El período de meses posterior al gran evento sísmico va a desencadenar una reducción en la frecuencia sísmica volviendo a sus niveles normales de forma gradual,

por lo que el peligro sísmico estará igual o elevado en el epicentro del terremoto. El futuro escenario es que las réplicas permanezcan agrupadas en la descendencia de los lóbulos en estrés donde tendrían una disminución de la potencia con la frecuencia relación tiempo más no la magnitud.

Declaración de conflictos de intereses: El autor declara que no existe conflicto de intereses que puedan haber incidido en los resultados presentados.

Agradecimientos: A la USGS por proporcionar los catálogos, información necesaria para la elaboración de esta investigación y también a la Universidad de Estambul, Yıldız y Kocaeli que aportaron con las observaciones y la elaboración de este artículo.

Referencias

- Akbayram, K., Bayrak, E., Pamuk, E., Özer, Ç., Kıranşan, K., & Varolgüneş, S. (2022, June 16). Dynamic sub-surface characteristic and the active faults of the Genç District locating over the Bingöl Seismic Gap of the East Anatolian Fault Zone, Eastern Turkey [Abstract]. *Natural Hazards*, 114, 825–847. <https://t.ly/tUkC>
- Akgün, E., & İnceöz, M. (2021). Tectonic evolution of the central part of the East Anatolian Fault Zone, Eastern Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(7), 928–947. <https://t.ly/EXJaI>
- Altunel, E., Meghraoui, M., Karabacak, V., Akyüz, S. H., Ferry, M., Yalçınar, Ç., & Munschy, M. (2009, December 9). Archaeological sites (Tell and Road) offset by the Dead Sea Fault in the Amik Basin, Southern Turkey. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1313–1329. <https://t.ly/tgKs>
- Arpat, E., & Şaroğlu, F. (1972). The East Anatolian fault system: Thoughts on its development. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, 78, 33–39. <https://t.ly/0xIeX>
- Balkaya, M., Ozden, S., & Akyüz, H. S. (2021). Morphometric and Morphotectonic characteristics of Sürgü and Çardak Faults (East Anatolian Fault Zone) [Abstract]. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 7(3), 375–392. <https://t.ly/8LAu>
- Balun, B., Nemitlu, Ö., Benli, A., & Sari, A. (2020, February 25). Estimation of probabilistic hazard for Bingol province, Turkey [Abstract]. *Earthquakes and Structures*, 18(2), 223–231. <https://t.ly/LuKW>
- Barbot, S., Luo, H., Wang, T., Hamiel, Y., Piatibratova, O., Javed, M. T., Braitenberg, C., & Gurbuz, G. (2023). *Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone* [Data set]. Zenodo. <https://t.ly/qhJIE>
- Bletery, Q., Cavalié, O., Nocquet, J.-M., & Ragon, T. (2020, August 17). Distribution of Interseismic Coupling Along the North and East Anatolian Faults Inferred from InSAR and GPS Data. *Geophysical Research Letters*, 47(16), 1–11. <https://t.ly/cHEQx>
- Bird, P., & Kreemer, C. (2015, February). Revised Tectonic Forecast of Global Shallow Seismicity Based on Version 2.1 of the Global Strain Rate Map. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 152–166. <https://n9.cl/u0ll0>

- Bonita, J., Kumagai, H., & Nakano, M. (2015). Regional Moment Tensor Analysis in the Philippines: CMT Solutions in 2012–2013. *Journal of Disaster Research*, 10(1), 18–24. <https://t.ly/LWg1>
- Cheloni, D., & Akinci, A. (2020, November). Source modelling and strong ground motion simulations for the 24 January 2020, Mw 6.8 Elazığ earthquake, Turkey [Abstract]. *Geophysical Journal International*, 223(2), 1054–1068. <https://t.ly/YaHE>
- Chen, K., Zhang, Z., Liang, C., Xue, C., & Liu, P. (2020, November). Kinematics and Dynamics of the 24 January 2020 Mw 6.7 Elazığ, Turkey Earthquake. *Earth and Space Science*, 7(11), 1–8. <https://t.ly/6Dyz1>
- Coban, K. H., & Sayil, N. (2020). Different probabilistic models for earthquake occurrences along the North and East Anatolian fault zones [Abstract]. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 971. <https://t.ly/Hjyj>
- Di Sarno, L., & Pugliese, F. (2021, April 1). Effects of mainshock-aftershock sequences on fragility analysis of RC buildings with ageing. *Engineering Structures*, 232, 111837. <https://t.ly/kIeb>
- Dogan, G., Ecemis, A. S., Korkmaz, S. Z., Arslan, M. H., & Korkmaz, H. H. (2021, June 14). Buildings Damages after Elazığ, Turkey Earthquake on January 24, 2020 [Abstract]. *Natural Hazards*, 109, 161–200. <https://t.ly/My2C>
- Doğangün, A., Ural, A., Sezen, H., Güney, Y., & Fırat, F. (2013). The 2011 Earthquake in Simav, Turkey and Seismic Damage to Reinforced Concrete Buildings. *Buildings*, 3(1), 173–190. <https://t.ly/c7Hod>
- Doğru, A., Bulut, F., Yaltırak, C., & Aktuğ, B. (2021, January). Slip distribution of the 2020 Elazığ Earthquake (Mw 6.75) and its influence on earthquake hazard in the Eastern Anatolia [Abstract]. *Geophysical Journal International*, 224(1), 389–400. <https://t.ly/BcgS>
- Duman, T. Y., & Emre, Ö. (2013). The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics. *Geological Society, London, Special Publications*, 372(1), 495–529. <https://shorturl.at/jwZ29>
- Gallovič, F., Zahradník, J., Plicka, V., Sokos, E., Evangelidis, C., Fountoulakis, I., & Turhan, F. (2020). Complex rupture dynamics on an immature fault during the 2020 Mw 6.8 Elazığ earthquake, Turkey. *Communications Earth & Environment*, article number 40, 1–8. <https://shorturl.at/hBDM2>
- Güvercin, S., Karabulut, H., Konca, A. Ö., Doğan, U., & Ergintav, S. (2022, July). Active seismotectonics of the East Anatolian Fault [Abstract]. *Geophysical Journal International*, 230(1), 50–69. <https://shorturl.at/ilEPY>
- Işık, S. E., Özgün, A., & Karabulut, H. (2017, April). The seismic interactions and spatiotemporal evolution of seismicity following the October 23, 2011 Mw 7.1 Van, Eastern Anatolia, earthquake. *Tectonophysics*, 702, 8–18. <https://shorturl.at/DBQZ>
- Işık, E., Kutanis, M., & Bal, İ. E. (2016). Displacement of the Buildings Ac-

- ording to Site-Specific Earthquake Spectra. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(1), 37–43. <https://t.ly/7gdSg>
- Izgi, G., Eken, T., Gaebler, P., Eulenfeld, T., & Taymaz, T. (2020, February). Crustal seismic attenuation parameters in the western region of the North Anatolian Fault Zone [Abstract]. *Journal of Geodynamics*, 134, 101694. <https://shorturl.at/abpxX>
- Ji, C., Wald, D., & Helmberger, D. (2002). Source Description of the 1999 Hector Mine, California, Earthquake, Part I: Wavelet Domain Inversion Theory and Resolution Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4), 1192–1207. <https://core.ac.uk/reader/216167200>
- Jiang, X., Song, X., Li, T., & Wu, K. (2023, April). Moment magnitudes of two large Turkish earthquakes on February 6, 2023 from long-period coda [Abstract]. *Earthquake Science*, 36(2), 169–174. <https://shorturl.at/kvJQT>
- Köküm, M., & Özçelik, F. (2020). An example study on re-evaluation of historical earthquakes: 1789 Palu (Elazığ) earthquake, Eastern Anatolia, Turkey [Abstract]. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 16(161), 157–170. <https://shorturl.at/qCI15>
- Lomax, A. (2023). Precise, NLL-SSST-coherence hypocenter catalog for the 2023 M_w 7.8 and M_w 7.6 SE Turkey earthquake sequence [Data set]. *Zenodo*. <https://shorturl.at/jyPVW>
- Melgar, D., Taymaz, T., Ganas, A., Crowell, B., Öcalan, T., Kahraman, M., Tsironi, V., Yolsal- Çevikbil, S., Valkaniotis, S., Irmak, T. S., Eken, T., Erman, C., Özkan, B., Dogan, A. H., & Altuntaş, C. (2023). Sub- and super-shear ruptures during the 2023 M_w 7.8 and M_w 7.6 earthquake doublet in SE Türkiye. *Seismica*, 2(3), 1-10. <https://shorturl.at/iuOP8>
- Nemutlu, Ö., Balun, B., & Sari, A. (2021). Damage assessment of buildings after 24 January 2020 Elazığ-Sivrice earthquake [Abstract]. *Earthquakes and Structures*, 20(3), 325–335. <https://shorturl.at/jMS59>
- Parra, S. (2023, 9 de febrero). Esta es la razón por la que se producen tantos terremotos entre Turquía y Siria. *National Geographic España*. <https://shorturl.at/ruzR3>
- Pousse-Beltran, L., Nissen, E., Bergman, E. A., Cambaz, M. D., Gaudreau, É., Karasözen, E., & Tan, F. (2020, May 30). The 2020 M_w 6.8 Elazığ (Turkey) Earthquake Reveals Rupture Behavior of the East Anatolian Fault. *Geophysical Research Letters*, 47(13), e2020GL088136. <https://shorturl.at/loFY1>
- Ragon, T., Simons, M., Bletery, Q., Cavalié, O., & Fielding, E. (2021, February 21). A Stochastic View of the 2020 Elazığ M_w 6.8 Earthquake (Turkey). *Geophysical Research Letters*, 48(3), 1-13. <https://shorturl.at/jrvyU>
- Reitman, N. G., Briggs, R. W., Barnhart, W. D., Thompson Jobe, J. A., DuRoss, C. B., Hatem, A. E., Gold, R. D., & Mejstrik, J. D. (2023). Preliminary fault rupture mapping of the 2023 M_w 7.8 and M_w 7.5 Türkiye Earthquakes [Update: 2023, March 15]. <https://shorturl.at/yFLP9>

- Rekapalli, R., & Gupta, H. K. (2023, February 7). How long the $M_w \geq 5$ aftershocks of the 6 February 2023 M_w 7.8 Türkiye earthquake shall continue? [Abstract]. *Natural Hazards*, 132. <https://shorturl.at/eKU89>
- Rojay, B., Heirman, A., & Toprak, V. (2001, January/May). Neotectonic and volcanic characteristics of the Karasu fault zone (Anatolia, Turkey): The transition zone between the Dead Sea transform and the East Anatolian fault zone. *Geodinamica Acta*, 14(1–3), 197–212. <https://shorturl.at/dgJ34>
- Rollins, J. & Stein, R. (2010, December). Coulomb stress interactions among $M \geq 5.9$ earthquakes in the Gorda deformation zone and on the Mendocino Fault Zone, Cascadia subduction zone, and northern San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research*, 115(B12), B12306, 1–19. <https://shorturl.at/jqyDP>
- Shimizu, K., Yagi, Y., Okuwaki, R., & Fukahata, Y. (2020, February). Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data. *Geophysical Journal International*, 220(2), 1055–1065. <https://shorturl.at/hqtD0>
- Strader, A., Werner, M., Bayona, J., Maechling, P., Silva, F., Liukis, M., & Schorlemmer, D. (2018). Prospective Evaluation of Global Earthquake Forecast Models: 2 Yrs of Observations Provide Preliminary Support for Merging Smoothed Seismicity with Geodetic Strain Rates [Abstract]. *Seismological Research Letters*, 89(4), 1262–1271. <https://shorturl.at/bfkGO>
- Tadapansawut, T., Okuwaki, R., Yagi, Y., & Yamashita, S. (2021, January 16). Rupture Process of the 2020 Caribbean Earthquake Along the Oriente Transform Fault, Involving Supershear Rupture and Geometric Complexity of Fault. *Geophysical Research Letters*, 48(1), e2020GL090899, 1–9. <https://shorturl.at/dGJNS>
- Tatar, O., Sözbilir, H., Koçbulut, F., Bozkurt, E., Aksoy, E., Eski, S., Özmen, B., Alan, H., & Metin, Y. (2020, October 27). Surface deformations of 24 January 2020 Sivrice (Elazığ)–Doğanyol (Malatya) earthquake ($M_w=6.8$) along the Pütürge segment of the East Anatolian Fault Zone and its comparison with Turkey’s 100-year-surface ruptures [Abstract]. *Mediterranean Geoscience Reviews*, 2, 385–410. <https://shorturl.at/jyFN4>
- Taymaz, T., Eyidoğan, H., & Jackson, J. (1991). Source parameters of large earthquakes in the East Anatolian Fault Zone (Turkey). *Geophysical Journal International*, 106, 537–550. <https://shorturl.at/pRVW2>
- Taymaz, T., Ganas, A., Yolsal-Çevikbilen, S., Vera, F., Eken, T., Erman, C., Keleş, D., Kapetanidis, V., Valkaniotis, S., Karasante, I., Tsironi, V., Gaebler, P., Melgar, D., & Öcalan, T. (2021, April 5). Source Mechanism and Rupture Process of the 24 January 2020 M_w 6.7 Doğanyol–Sivrice Earthquake obtained from Seismological Waveform Analysis and Space Geodetic Observations on the East Anatolian Fault Zone (Turkey) [Abstract]. *Tectonophysics*, 804, 228745. <https://shorturl.at/sGP16>
- Toda, S., & Stein, R. S. (2020, July 14). Long- and Short-Term Stress Interac-

- tion of the 2019 Ridgecrest Sequence and Coulomb-Based Earthquake Forecasts [Abstract]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(4), 1765–1780. <https://shorturl.at/dfqW2>
- Toda, S., Stein, R. S., Sevilgen, V., & Lin, J. (2011, October 4). *Coulomb 3.3 Graphic-Rich Deformation and Stress-Change Software for Earthquake, Tectonic, And Volcano Research and Teaching—User Guide. US Geological Survey Open-File Report 2011-1060*. U.S. Department of the Interiors, & U.S. Geological Survey. <https://shorturl.at/bkuyT>
- USGS. (2023a). *M7,5 - Elbistan earthquake, Kahramanmaras earthquake sequence*. <https://shorturl.at/cmHMX>
- USGS. (2023b). *M7.8 - Pazarcik earthquake, Kahramanmaras earthquake sequence*. <https://shorturl.at/ehmqG>
- Xu, J., Liu, C., & Xiong, X. (2020, November). Source Process of the 24 January 2020 Mw 6.7 East Anatolian Fault Zone, Turkey, Earthquake [Abstract]. *Seismological Research Letters*, 91(6), 3120–3128. <https://shorturl.at/HIMQT>
- Yaghmaei-Sabegh, S., Shoaefar, P., & Shoaefar, N. (2017, October 1). Probabilistic Seismic-Hazard Analysis Including Earthquake Clusters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5), 2367–2379. <https://shorturl.at/agkT9>

Para referenciar este artículo utilice el siguiente formato:

Carrera, A. (2023, julio-diciembre). Análisis del estrés de transferencia de la secuencia de terremotos de Turquía, M_w 7.8 y M_w 7.5, 2023. *Yachana Revista Científica*, 12(2), 49-66.