

## ASPECTOS CONCEPTUALES DE VARIOS MECANISMOS FOCALES Y SUS EFECTOS EN LOS SISMOS Y OBRAS DE INGENIERÍA

Heriberto ECHEZURÍA<sup>1</sup>

### RESUMEN

El presente ensayo técnico analiza cómo los mecanismos en la fuente de fallas tectónicas determinan la naturaleza de las ondas generadas y la complejidad de los registros de aceleración o velocidad. Por una parte, la sismología moderna demuestra que la ruptura de una falla no es siempre única u homogénea, sino que puede tener un proceso secuencial o escalonado controlado por las asperezas, la resistencia friccional de la roca y la expansión del área, lo cual explica acelerogramas con más de una secuencia de ondas de corte. Eso es típico para velocidades de ruptura en fuente menores que la velocidad de las ondas cortantes. Así, la falla sufre desplazamientos escalonados al vencer zonas de alta resistencia y genera sismogramas extendidos en el tiempo, caracterizados por crestas superpuestas y ondas de parada (*stopping phases*) de alta frecuencia. Por otra parte, la ruptura puede alcanzar un régimen supersónico (o *super-shear*), cuando su velocidad supera a las de las ondas cortantes, definiendo una zona mecánicamente prohibida entre esa última velocidad y la de las ondas Rayleigh. Eso genera un colapso del flujo de energía y la ruptura, para salir de esa zona, crea microfracturas secundarias impulsadas por las ondas de compresión. Al superarse la velocidad de corte, las ondas elásticas quedan atrapadas en un frente de Mach (cono sónico) que comprime el tiempo de viaje generando superposición de las ondas cortantes, lo cual descarga un pulso de alta velocidad del suelo muy destructivo al impactar la superficie.

### ABSTRACT

*Conceptual aspects of various focal mechanisms and their effects on earthquakes and engineering works*

This technical essay analyzes how fault-source mechanisms determine the nature of generated waves and the complexity of acceleration or velocity records. On one hand, modern seismology demonstrates that fault rupture is not always singular or homogeneous; instead, it may involve a sequential or stepped process governed by asperities, rock frictional resistance, and area expansion—explaining accelerograms that exhibit multiple shear-wave sequences. This pattern is typical of source rupture velocities lower than the shear-wave speed. Consequently, the fault undergoes stepped displacements as it overcomes high-resistance zones, producing time-extended seismograms characterized by superimposed peaks and high-frequency stopping phases. On the other hand, the rupture may reach a supersonic (or super-shear) regime when its speed exceeds that of shear waves, defining a mechanically forbidden zone between the shear-wave speed and the Rayleigh-wave speed. This leads to a collapse of energy flow; to exit this zone, the rupture generates secondary micro-fractures driven by compression waves. Once the shear-wave speed is surpassed, elastic waves become trapped within a Mach front (sonic cone) that compresses travel time and causes shear-wave superposition, ultimately releasing a highly destructive, high-velocity ground-motion pulse upon impact with the surface.

**Palabras clave:** Mecanismo de fuente, ruptura secuencial, asperezas y barreras, velocidad supersónica (super-shear), frente de machpulso sísmico.

**Keywords:** Source mechanism, sequential rupture, asperities and barriers, super-shear speed, mach front, seismic pulse.

### Introducción

Los mecanismos en la fuente influyen de manera muy importante tanto en las amplitudes de las distintas ondas generadas durante la ruptura, como en la forma de los acelerogramas medidos a distintas distancias de la falla. Algunas de las variables involucradas en el proceso son, por una parte, los esfuerzos sobre la roca ubicada en la superficie del plano de ruptura, su módulo cortante, y el número de

asperezas en la superficie del plano, pues estas determinan la distancia o salto que se desplazará la ruptura al vencer cada una de dichas asperezas. Adicionalmente, se debe considerar el área de ruptura asociado con cada punto de aspereza, el salto secuencial causado por el vencimiento de la resistencia de dichas asperezas y la velocidad de desplazamiento de cada ruptura junto, además del desplazamiento antes de frenar el movimiento.

<sup>1</sup> Profesor Titular, UCAB, Caracas, Venezuela. Correo-e: hechezur@ucab.edu.ve

Por otra parte, la velocidad de la ruptura  $V_r$  influye significativamente en la energía que pueden transmitir las ondas en el campo cercano a la fuente. Esta velocidad está íntimamente relacionada con la velocidad de las ondas de corte  $V_S$ , la velocidad de las ondas Rayleigh  $V_R$  y la velocidad de las ondas primarias o de compresión  $V_P$ . Cuando los esfuerzos que desequilibran la falla son muy altos, se genera un proceso muy complejo de rotura que finalmente hace que la  $V_r$  supere la  $V_S$ , y se produzca la superposición de las ondas de corte, lo cual genera un pulso de alta energía muy destructivo.

En este ensayo se describen esos dos procesos, con  $V_r < V_S$  así como con  $V_r > V_S$ , y se indica su efecto tanto en las ondas como en los acelerogramas y registros de velocidad en diferentes sitios a distintas distancias de la falla.

### Descripción del proceso de ruptura de las fallas para el caso de $V_r < V_S$ .

En la literatura existe abundante información sobre la mecánica de fractura cuando la velocidad de ruptura es menor que la velocidad de las ondas de corte  $V_S$  (Aki, 1979; Kanamori, 1978; Dieterich, 1979). Similarmente, para esta condición, esos autores demuestran que la ruptura de una falla no es siempre un evento único y homogéneo, sino que puede ser un proceso secuencial y multifásico.

El proceso de ruptura se explica mediante la combinación de tres variables fundamentales: las asperezas (zonas con mayor concentración de esfuerzos), la resistencia friccional de la roca en los puntos de contacto (que varía según leyes de velocidad y estado de fracturamiento de la misma), y el incremento del área de ruptura de acuerdo con la cinemática de propagación del frente (Aki, 1979; Kanamori & Stewart, 1978; Dieterich, 1979). A continuación, se explicará brevemente, cómo interactúan estas variables y cómo justifican que el desplazamiento o "salto" de una falla pueda suceder en etapas, considerando rupturas complejas mediante un efecto de cascada.

Un modelo comúnmente muy empleado para ese análisis es el de Asperezas y Barreras (Aki, 1979; Kanamori & Stewart, 1978) en el cual, el plano de una falla se modela bajo dos conceptos claves que interactúan directamente con las variables mencionadas. Por una parte, en dicho modelo se establece que el plano de falla contiene zonas de alta resistencia y alta concentración de esfuerzos mecánicos.

Así, la ruptura es, inicialmente, nucleada en una aspereza principal que, al romperse la roca allí presente, la fractura se propaga liberando la energía retenida en dicha aspereza. Luego

de esa ruptura inicial, sucede algo similar en las otras asperezas, lo cual hace que la energía totalmente liberada sea la suma de todas las ocurridas en cada una de las asperezas.

Por otra parte, en el modelo de Asperezas y Barreras, las regiones con alta resistencia local, o con geometría compleja, actúan frenando o deteniendo temporal o definitivamente el frente de ruptura. La interacción de las tres variables, antes citadas, se presenta en combinaciones claves en las cuales, la forma secuencial de la ruptura depende estrictamente de cómo se combinan las mismas en el plano tal como se muestra en la Tabla 1.

*Tabla 1 Combinación de las variables que influyen en el comportamiento del frente de ruptura dinámica durante el desplazamiento de una falla (Aki, 1979; Kanamori & Stewart, 1978; Dieterich, 1979).*

|                                                                             |                                                                                                                                                 |                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alta Esfuerzo / Alta Resistencia / Área pequeña</b>                      | <b>Nucleación.</b> El esfuerzo supera la resistencia estática inicial en un punto crítico.                                                      | <b>Etapas 1: Micro-desplazamiento.</b> Deslizamiento localizado pre-sísmico o nucleación lenta.                                       |
| <b>Alto Esfuerzo / Baja Resistencia (Dinámica) / Área Creciente</b>         | <b>Propagación desbocada.</b> La roca experimenta ablandamiento por fricción ( <i>slip-weakening</i> ).                                         | <b>Etapas 2: Salto Principal.</b> Avance veloz del frente (sub-Rayleigh o supershear) generando el sismo mayor.                       |
| <b>Bajo Esfuerzo / Alta Resistencia / Barrera Geométrica</b>                | <b>Desaceleración o Parada.</b> El incremento del área se detiene al chocar con una barrera (e.g., un cambio de dirección o roca muy dura).     | <b>Etapas 3: Estancamiento temporal.</b> El desplazamiento se frena bruscamente emitiendo fases de parada ( <i>stopping phases</i> ). |
| <b>Transferencia de Esfuerzos / Resistencia Crítica / Salto de Segmento</b> | <b>Activación en cascada.</b> El incremento del área se reanuda en un parche adyacente debido a la transferencia de esfuerzo estático/dinámico. | <b>Etapas 4: Segundo Salto.</b> Desplazamiento tardío (en milisegundos o segundos) en otra sección de la falla.                       |

Cuando el frente de ruptura encuentra una barrera o una aspereza geométrica compleja, el desplazamiento local puede estancarse temporal o definitivamente en una misma área. No obstante, es oportuno destacar que también se puede dar el caso en que las rupturas ocurran en sitios distintos de la falla separados por intervalos de tiempo cortos.

Un proceso de ruptura escalonado se visualiza en el diagrama incluido en la Figura 1. Como se aprecia en la Figura 1, el desplazamiento final acumulado de la falla es la suma matemática de los pulsos sucesivos. Si la ruptura no fuese escalonada, se tendría solamente un salto único de la falla.

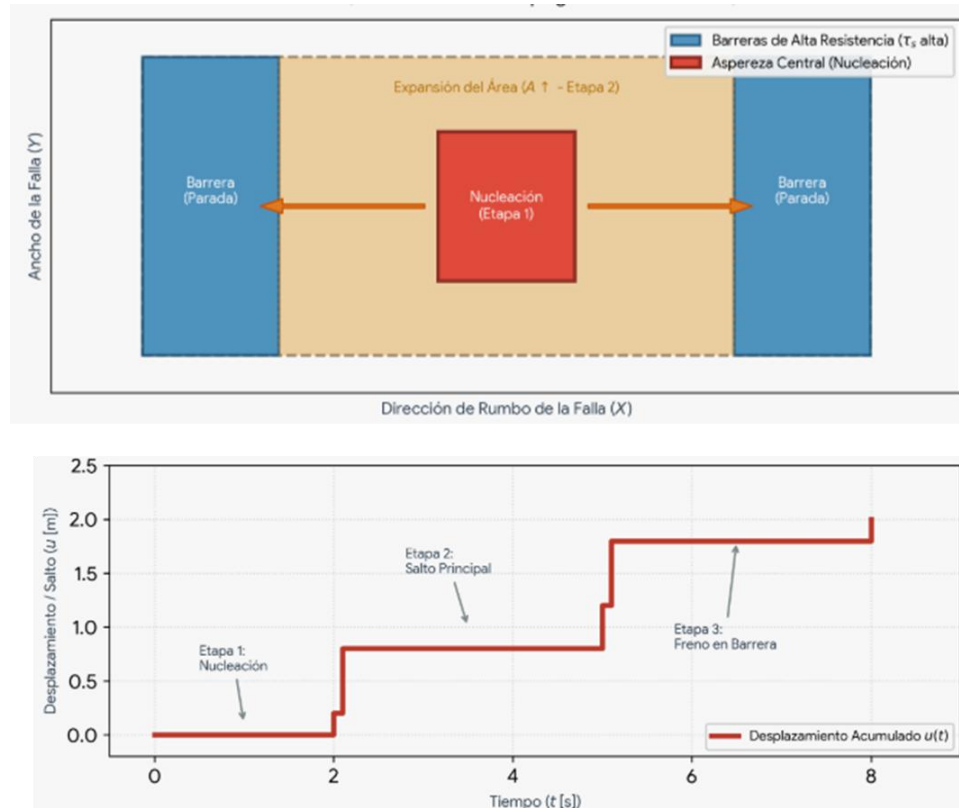


**Figura 1** Diagrama mostrando la interacción de las tres variables claves que controlan el movimiento de la falla en una ruptura múltiple o escalonada sobre un plano de falla, Etapa 1: Nucleación en zonas con concentración de esfuerzos, Etapa 2: Salto principal cuando se vence la resistencia friccional de la roca en los puntos de contacto principales y ocurre el deslizamiento y Etapa 3: Incremento del área de ruptura hasta alcanzar una barrera.

El proceso escalonado se da cuando el esfuerzo dinámico transferido logra romper la barrera o aspezeza geométrica compleja, en cuyo caso, la falla continúa moviéndose, generando un desplazamiento múltiple. Por esa razón, algunos acelerogramas o sismogramas pueden mostrar trenes o grupos de aceleraciones o velocidades en el tiempo, lo cual indica que rompieron zonas secuenciales en la misma zona. Un ejemplo de esta situación se ilustra en la Figura 2, para el sismo Big Bear.

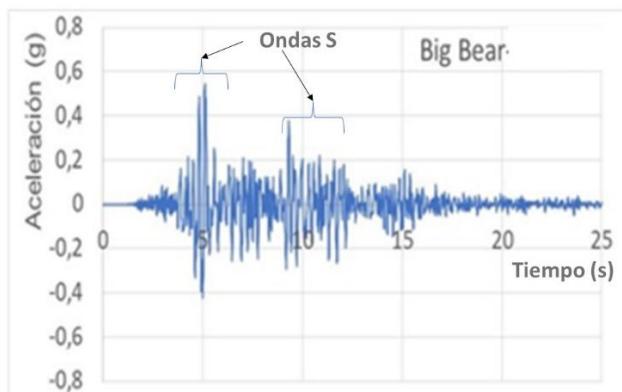


**Figura 2** Acelerograma en afloramiento rocoso del sismo Big Bear. Se aprecia claramente el arribo de dos trenes o grupos de ondas secundarias señalados en la figura.

En relación con las frecuencias de las ondas generadas, es oportuno destacar que, mientras para las bajas frecuencias las

amplitudes dependen del momento sísmico y del área total movilizada, para las altas frecuencias, las amplitudes son controladas por la resistencia local de la roca y lo abrupto que resulte el salto. En consecuencia, si una falla tiene zonas de alta resistencia en la roca, al vencer la fricción, el "salto" es sumamente violento (caída de esfuerzo elevada) a períodos cortos. En este caso, se irradian ondas sísmicas con amplitudes de aceleración extremadamente altas.

Otro proceso importante sucede si el frente de ruptura se detiene bruscamente ante una barrera (alta resistencia). En este caso, se genera una onda de parada (*stopping phase*) que se identifica en los registros como un pico de amplitud muy agudo y de alta frecuencia, período corto. Este último caso no está incluido en el presente ensayo, el cual se circunscribe solamente a los saltos secuenciales y la generación de pulsos de alta energía, cuando la velocidad de ruptura supera a la velocidad de las ondas de corte.

La interpretación conceptual de los procesos con salto único y escalonado, se ilustra en la Figura 3 para registros de velocidades y/o desplazamientos del terreno obtenidos en un sitio alejado de la falla. Se observa en la Figura 3 que, en el caso de salto único de la falla ocurre un solo tren de ondas, mientras que, para el caso de ruptura secuencial, cada sub-ruptura aporta su propia amplitud de onda proporcional a su salto local y su rigidez, provocando sismogramas más complejos y extendidos en el tiempo.

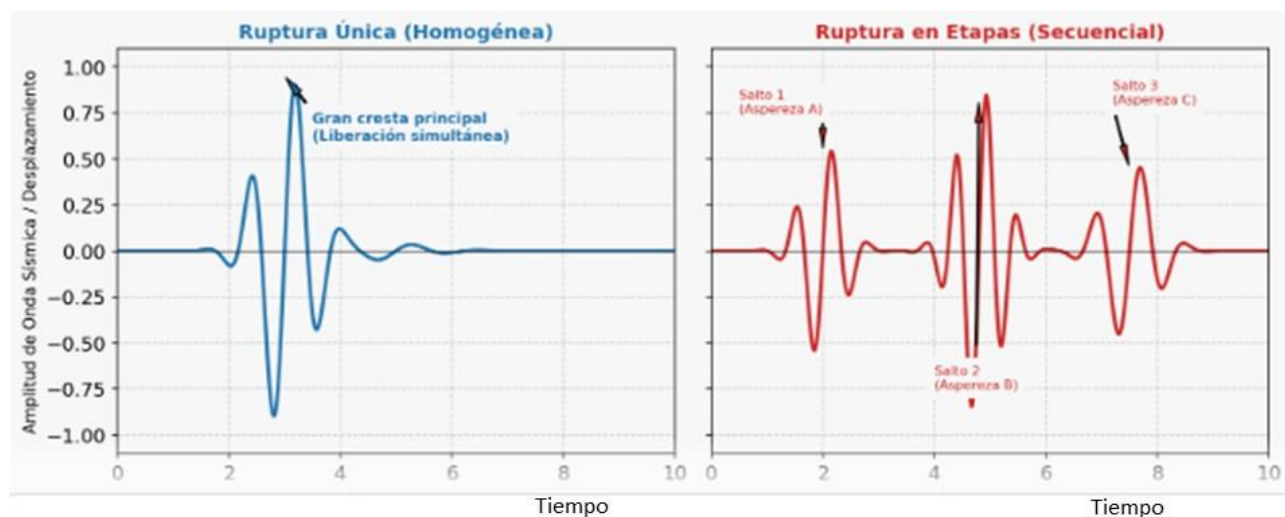


**Figura 3** Esquema de la diferencia en las amplitudes de registros causados por una ruptura única (izquierda) y una secuencial (derecha).

Por otra parte, es importante destacar que, el incremento del área de ruptura  $A$  suele verse limitado verticalmente por el espesor de la parte frágil de la corteza. Eso hace que, a partir de esa zona límite, la falla solo pueda expandirse a lo largo del rumbo una longitud,  $L$ .

La correlación entre el área de ruptura, el salto y la rigidez de la roca es el momento sísmico,  $M_0$ , que fue formulado originalmente por Aki (1966) y se muestra en la ecuación (1).

$$M_0 = \mu A u \quad \text{ecuación (1)}$$

Donde,  $\mu$  es el módulo cortante de la roca,  $A$  es el área de la ruptura y  $u$  es el salto promedio durante la ruptura.

### Descripción de la velocidad de ruptura considerando las asperezas

Es posible estimar la velocidad de ruptura de la falla  $V_r$  a partir de los parámetros dinámicos previamente indicados (caída de esfuerzos, energía de fractura y dimensiones de las asperezas) (Aki, 1966, 1979, Aki & Richards, 2002; Kagan, 2003, Meier, Ampuero & Heimpel, 2019; Scholz, 2019, Yue & otros 2014). En la física de la fuente sísmica, la velocidad de ruptura no es arbitraria; sino que está íntimamente relacionada con la velocidad de las ondas de corte  $V_S$  del medio circundante y con la velocidad de las ondas Rayleigh  $V_R$ , como se verá a continuación.

La velocidad a la que se propaga el frente de ruptura se puede

abordar desde una perspectiva cinemática (basada en el tiempo de la fuente) o desde una perspectiva dinámica (basada en la energía del ablandamiento de la roca). Para aplicar la primera, es necesario conocer el tiempo total de duración del pulso en cada etapa o aspereza  $T_r$ , además de la longitud de la aspereza, o distancia característica,  $L$ . La velocidad promedio se estima mediante la geometría del frente de expansión (asumiendo un modelo circular o unidimensional), a saber:

$$V_r \approx L / T_r \quad \text{ecuación 2}$$

Este procedimiento es, generalmente, poco aplicable por limitaciones en el conocimiento a priori de las variables incluidas, que son difíciles de estimar.

Por otra parte, considerando la mecánica de fractura elastodinámica, Freund (1972) y Kostrov (1964) demostraron que la velocidad de ruptura depende del balance entre la energía elástica disponible  $G_0$  y la energía requerida para vencer la resistencia de la roca o energía de fractura,  $G_c$ :

$$V_r = V_R (1 - (G_c / G_0)) \quad \text{ecuación (3)}$$

En dicha ecuación,  $V_R$  es la Velocidad de las ondas Rayleigh  $\approx 0.92 V_S$ .

La Energía de fractura,  $G_c$  representa el área bajo la curva de la ley de *slip-weakening* ilustrada en la Figura 4:

$$G_c = 0,5 [(\tau_s - \tau_d) D_c] \quad \text{ecuación (4)}.$$

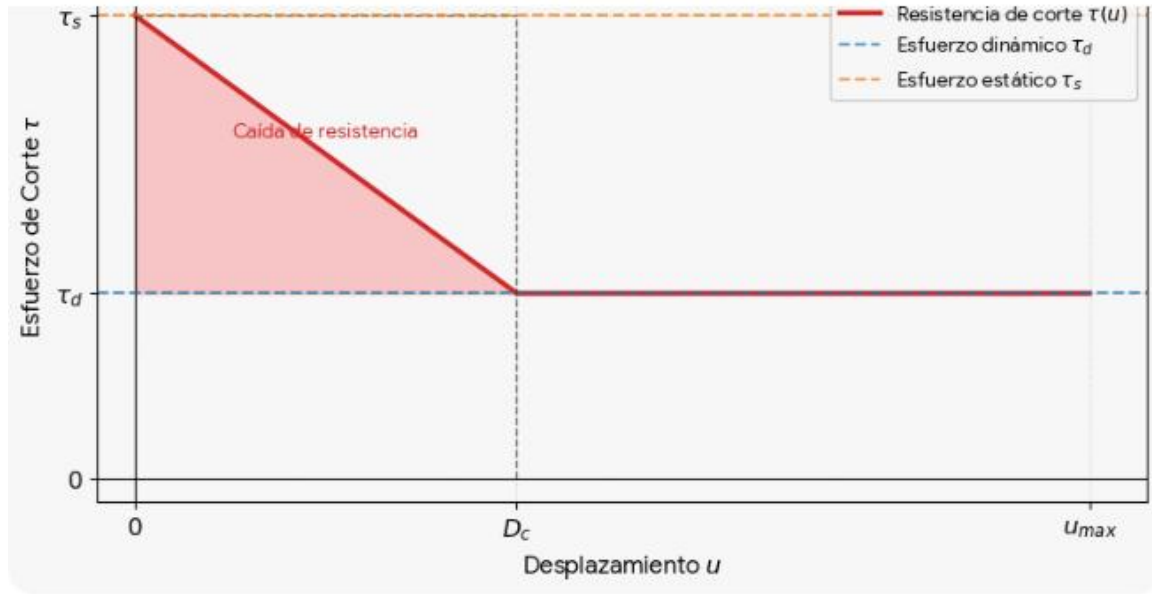


**Figura 4** Diagrama esquemático de la caída de esfuerzos cortantes en la zona debilitada de una aspereza al movilizar la falla.

Este concepto de *slip-weakening* aplica tanto al salto único como a los saltos escalonados de una falla y describe el proceso desde el rompimiento hasta el momento de freno de barrera antes mencionado. El mismo se modela matemáticamente mediante la ley de ablandamiento por desplazamiento (*slip-weakening law*) (Ida, 1972); Palmer & Rice, 1973; Sibson, 1985).

Esta última ley describe cómo la resistencia friccional de la roca  $\tau_f$  cae exponencialmente o linealmente a medida que el desplazamiento de la falla  $u$  aumenta en el punto de contacto. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\tau_f(u) = \begin{cases} \tau_s - (\tau_s - \tau_d) (u / D_c) & \text{si } u < D_c \\ \tau_d & \text{si } u \geq D_c \end{cases} \quad \text{ecuación (5)}$$

En la misma:  $\tau_s$  es la resistencia friccional estática, o sea, el límite máximo de corte que la roca soporta antes de romperse en la aspereza;  $\tau_d$  es la resistencia friccional dinámica, es decir, la resistencia residual de la roca mientras se desliza (cuando el calor o la pulverización lubrican la falla),  $u$  es el desplazamiento de la falla;  $D_c$  es la distancia crítica de ablandamiento (es decir, el desplazamiento a lo largo del cual la falla pierde su resistencia estática).

Si una falla tiene un  $D_c$  muy pequeño, la caída de resistencia es abrupta, provocando un salto violento y veloz (inestabilidad). Contrariamente, si el  $D_c$  es grande, el área de ruptura se incrementa de forma lenta y controlada, lo cual se conoce como desplazamiento episódico o transitorio. Estos parámetros se muestran en el diagrama esquemático de la Figura 4.

Para ilustrar estos conceptos de forma cuantitativa, se presenta un ejemplo numérico empleando la correlación entre la amplitud de una onda sísmica registrada en el campo lejano,

la cual es proporcional a la tasa de liberación del momento en la fuente. A tal efecto, se comparan dos escenarios, el primero asumiendo un salto único y, el segundo, con ruptura secuencial.

En este ejemplo, se calculó el momento sísmico,  $M_0$ , y la magnitud de momento,  $M_w$ :

$$M_w = [\log_{10} M_0 / 1,5] - 10,7 \quad \text{ecuación (6)}$$

para dos escenarios sobre un mismo plano de falla con la misma magnitud de momento: Escenario A (ruptura única u homogénea), en el que toda la falla se desliza uniformemente en un solo salto y, Escenario B (ruptura secuencial en etapas). En el escenario B se considera también que, la falla se rompe secuencialmente en 3 etapas discretas (3 sub-eventos o asperezas) con distintas áreas, niveles de salto y caídas de esfuerzo locales. Para los cálculos se utilizaron los siguientes parámetros:

Escenario A:

Área total de la ruptura de la falla (400 km<sup>2</sup>)

Salto único = 1,5 m

Módulo cortante de la roca = 32 GPa

Escenario B:

Etapas 1 (Nucleación / Alta resistencia): Área ruptura: 50 km<sup>2</sup>, salto: 0,8 m, tiempo inicio: 0 s

Etapas 2 (Salto Principal / Gran área): Área ruptura: 200 km<sup>2</sup>, salto: 2,0 m, tiempo inicio: 3 s

Etapas 3 (reajuste): Área ruptura: 100 km<sup>2</sup>, salto: 0.5 m, tiempo inicio: 7 s

Los resultados son los siguientes:

Ruptura Única (Escenario A):  $M_0 = 1.92 \times 10^{19}$  Nm;  $M_w = 6.79$

Ruptura en Etapas (Escenario B): momento sísmico total  $M_0 = 1.79 \times 10^{19}$  Nm (se considera el área del salto principal por superposición, pero incluyendo el desplazamiento de la nucleación, es decir 2,8 m) y magnitud de momento  $M_w = 6.78$ .

Para cada salto del Escenario B se tiene lo siguiente: Etapa 1:  $1.28 \times 10^{18}$  Nm en; Etapa 2:  $1.60 \times 10^{19}$  Nm y Etapa 3:  $1.60 \times 10^{18}$  Nm.

En este punto es importante destacar que para el momento sísmico total existe solapamiento de las áreas y no se pueden sumar directamente. Además, para poder sumar directamente los momentos parciales de los saltos  $M_{0i}$  es necesario que los mismos ocurran en condiciones ideales, completamente independientes y con geometría perfecta, lo cual no es siempre el caso.

Esa discrepancia entre la energía y el momento la explican algunos autores (Kagan, 2003; Meier, Ampuero & Heimpel, 2019; Scholz, 2019, Yue & otros, 2014) como una consecuencia de la naturaleza física, geométrica y tensorial de la forma en que se acumula y se mide la deformación en la corteza. Estas últimas variables establecen que, en realidad el momento sísmico es un tensor tridimensional (matriz de fuerzas) y no un escalar que puede sumarse directamente. Asimismo, esos autores indican que, el momento global  $M_0$  refleja la deformación neta real final del bloque de la corteza, tomando en cuenta las ineficiencias geométricas, los solapamientos de las áreas involucradas y los cambios de dirección en el plano de ruptura.

Ahora bien, volviendo al ejemplo para vincular las características del sismo con la aceleración del terreno, la sismología moderna utiliza la Teoría de la Fuente Sísmica de Brune (1970) y el Método Estocástico de Boore (1983) y Boore (2003). Con ellos se logra el Espectro de Amplitud de la Aceleración en la Fuente ( $a_f$ ) en el dominio de las frecuencias. La ecuación que describe ese proceso es la siguiente:

$$a_f = C M_0 \{[(2\pi f)^2 P(f) G(R)] / [1 + (f / f_c)^2]\}$$

ecuación (7)

En la cual  $1 / [1 + (f / f_c)^2]$  es un filtro de atenuación en la fuente (Modelo  $w^2$  de Brune, 1970) que evita que las frecuencias infinitas rompan la física del modelo

$P(f) G(R)$  son filtros de atenuación que consideran la distancia  $R$  y las condiciones locales de la roca,

$2\pi f^2$  es un operador matemático que transforma el desplazamiento físico de la falla en aceleración (es decir, la segunda derivada del desplazamiento en el tiempo que equivale a multiplicar por  $w^2$  las frecuencias),

$C$  viene dado por la expresión:  $C = (R_{\theta\phi} F V) / [4 \pi \rho V_s^3]$ , en la cual

$R_{\theta\phi}$  es el patrón de radiación de la falla,

$F$  es el efecto de superficie libre,

$V$  es la partición de energía,

$\rho$  es la densidad de masa de la roca y

$V_s$  es la velocidad de las ondas de corte

Los cálculos con estas ecuaciones para obtener las aceleraciones del ejemplo manejado, fueron realizados con la ayuda de IA (Gemini) de acuerdo con los autores antes citados utilizando valores representativos de las variables importantes del proceso. La representación gráfica de las amplitudes de las aceleraciones para ambos casos se presenta en la Figura 5.

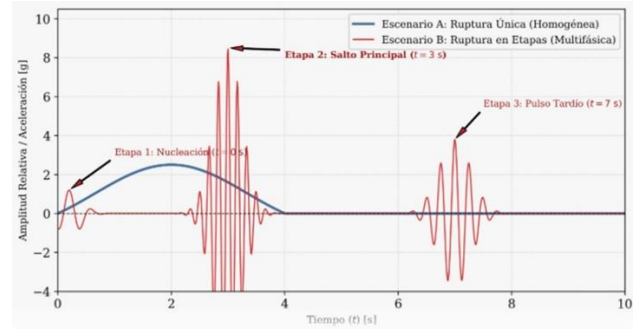


**Figura 5** Diferencias entre las amplitudes de aceleraciones expresadas en (g) con el tiempo transcurrido durante una ruptura única (homogénea) y otra secuencial para eventos con la misma magnitud de momento.

Se observa que, de acuerdo con los cálculos y la Figura 5, a pesar de que ambos escenarios liberan casi la misma energía total y poseen magnitudes de momento globales casi idénticas ( $M_0 \sim 6.8$ ), las amplitudes y distribución de aceleraciones en el tiempo son radicalmente distintas. Eso se debe a que, de acuerdo con la ecuación (7), la amplitud de la aceleración que registra un equipo en un afloramiento rocoso depende directamente de la tasa de liberación de momento sísmico en la falla  $M_0$ .

Para el caso del Escenario A (Ruptura Única u Homogénea - Línea Azul) en la Figura 5: Al deslizarse toda el área de la falla de manera uniforme, la amplitud de la onda sísmica se distribuye regularmente en el tiempo. La aceleración máxima del terreno es moderada porque la energía no se libera en pulsos concentrados, generando un registro simple con una sola fase principal.

Por otra parte, para el Escenario B (Ruptura Secuencial en Etapas - Línea Roja): El registro se descompone en tres trenes de ondas independientes. Cada etapa de ruptura actúa como una fuente sísmica individual, a saber:

A los 0 segundos (Etapa 1): Aparece un pulso precursor de baja amplitud correspondiente a la nucleación.

A los 3 segundos (Etapa 2): Al romperse la aspereza principal con un salto mayor, la amplitud y la aceleración se disparan drásticamente, alcanzando el pico máximo del sismo. Las ondas son de alta frecuencia y más destructivas.

A los 7 segundos (Etapa 3): Se registra una última réplica por

la fase de parada, aportando un tercer pico de amplitud moderada antes de que la falla vuelva al reposo.

Esto demuestra cuantitativamente que dos sismos con la misma magnitud de momento global  $M_w$  generarán aceleraciones locales diferentes, con las del caso por etapas mucho más severas y destructivas (Escenario B) que las de un pulso único (Escenario A).

Ahora bien, como se ha indicado antes, otra posible condición es que, sobre la misma falla, o sistemas de fallas continuos, se generen dos zonas de ruptura separadas que se rompan secuencialmente con intervalo de tiempo corto entre ambas. De esa manera se generarán dos sismos diferentes, tal como ocurrió el 24 de junio 2026 al norte de Venezuela, cuando se produjeron dos sismos en el sistema Boconó-San Sebastián. Este caso de rupturas separadas en la traza de la falla se analiza en la próxima sección, pero considerando, principalmente, el fenómeno relacionado con la velocidad de ruptura de la falla.

### Descripción del proceso de ruptura para el caso de $V_r > V_s$ .

Como se ha indicado, el día 24 de junio de 2026 ocurrieron dos eventos, separados por un intervalo de 39 segundos en el norte de Venezuela, sobre el sistema Boconó-San Sebastián, considerado transcurrente dextral. El primer evento, estuvo en el segmento Boconó, con magnitud de momento  $M_w=7,2$ ; mientras que el segundo evento, fue localizado al este del primero, con magnitud de momento  $M_w=7,5$ .

De acuerdo con Safina (2026) es muy probable que, ese día se diera la condición de velocidad de ruptura mayor que la velocidad de las ondas de corte  $V_r > V_s$ . Esta condición fue sustentada con base en los análisis de las evidencias de los movimientos excesivos en la superficie del terreno captadas en cámara, además del hecho de que muchas edificaciones colapsaron al mismo tiempo. Eso permitió deducir que se generó un pulso de alta energía asociado con la superposición de las ondas de corte.

A continuación, se describe paso a paso el proceso requerido para lograr una velocidad de ruptura superior a la de las ondas de corte y la generación del pulso de alta energía de acuerdo con lo establecido por Aki & Richards (2002); Andrews (1976); Dunham & Archuleta (2005); Bhat& otros (2007):

#### Paso 1: El inicio convencional (Ruptura Sub-shear)

El terremoto comienza en el hipocentro. Al principio, la fractura se propaga de manera normal. La velocidad de ruptura  $V_r$ , es más lenta que la velocidad de las ondas de corte  $V_s$ , usualmente alrededor del 82% de  $V_s$ . En este punto, las ondas sísmicas corren por delante de la grieta, dispersando la energía radialmente en todas direcciones.

#### Paso 2: Acumulación extrema de tensión (Stress)

A medida que la grieta avanza, si el plano de la falla tiene poca rugosidad y la roca es muy rígida, comienza una concentración geométrica de tensiones muy grande justo en la punta de la grieta (*crack tip*). En esas condiciones, la roca que está inmediatamente delante de la fractura está al límite de su resistencia elástica.

#### Paso 3: El "salto" de velocidad (Mecanismo de Burridge (1973), Andrews (1976))

Para esa condición de elevados esfuerzos en la punta de la grieta, físicamente la misma no puede acelerar gradualmente luego de alcanzar la velocidad de las ondas Rayleigh. Este aspecto es sumamente importante y, por ello, se explica en detalle más adelante en la sub-sección "*Análisis de las velocidades en las fracturas de las rocas sobre el plano de falla*". Entonces, cuando la ruptura alcanza la velocidad Rayleigh, ocurre un fenómeno de transferencia, en el cual, la alta tensión acumulada delante de la grieta principal crea una micro-ruptura secundaria por adelantado. Casi instantáneamente, la grieta principal alcanza y se fusiona con esta microgrieta. Al hacer esto, la ruptura "salta" la barrera física de la velocidad de la onda de corte  $V_s$ .

#### Paso 4: Estabilización en régimen Supersónico (Velocidad de Eshelby, 1969 y Atkinson & Eshelby, 1968)

Una vez que se cruza la barrera de  $V_s$ , los modelos de la física de fracturas demuestran que la ruptura se estabiliza rápidamente en una velocidad equivalente a

$$V_r \approx \sqrt[3]{2} V_s \quad \text{ecuación (8)}$$

es decir, aproximadamente 1,4142 veces la velocidad de la onda S, así se define el parámetro  $f$ , que controla la velocidad para que la ruptura continúe propagándose sin desintegrarse, la cual es denominada velocidad de Eshelby:

$$f \approx 1,4142$$

A esta velocidad extrema, la falla se está fracturando más rápido de lo que la propia roca puede vibrar para transmitir la onda elástica.

#### Paso 5: Formación del Frente de Mach (El "Boom" Sísmico)

Como la punta de la grieta va dejando atrás a las ondas S que ella misma ha generado, estas ondas circulares no pueden dispersarse hacia adelante. De acuerdo con el principio de Huygens, referido por Burridge (1973) y Andrews (1976), las ondas generadas en cada milisegundo se alinean perfectamente en una tangente geométrica común. Las amplitudes de todas estas ondas se suman (interferencia constructiva o superposición), creando una pared de energía en forma de cuña o cono denominada "frente de Mach". La Figura 6 muestra un diagrama esquemático en planta de la trayectoria de las ondas circulares irradiadas desde la falla y la propagación del frente mach o *super shear*, incluyendo el ángulo mach.

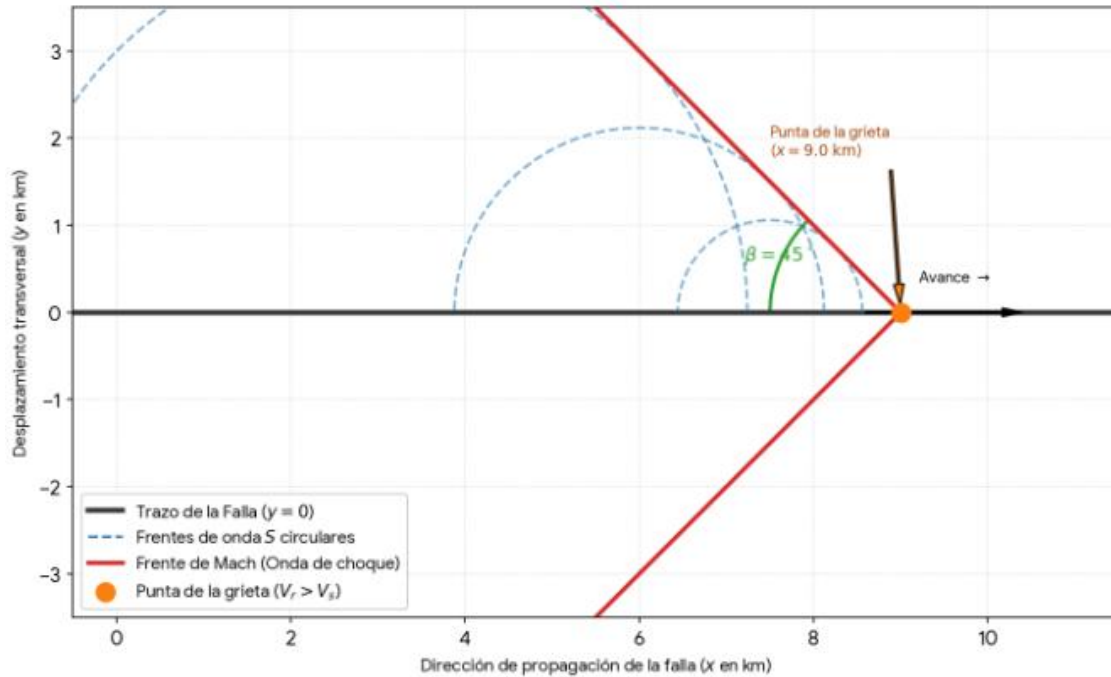


**Figura 6** Diagrama esquemático en planta de la trayectoria de las ondas circulares irradiadas desde la falla y la propagación del frente mach o super shear.

#### Paso 6: El impacto del pulso de alta velocidad

Cuando este frente de mach viaja por la corteza, toda la roca fuera del cono permanece en calma. Pero en el momento exacto en que el frente golpea la superficie bien en un sismómetro o una edificación, toda la energía acumulada del terremoto llega en un solo instante comprimido, descargando un pulso de velocidad en el terreno que es excepcionalmente violento, agudo y destructivo.

#### *Análisis de las velocidades en las fracturas de las rocas sobre el plano de falla*

Considerando lo expresado en el punto 3 antes referido, se considera necesario explicar porque la velocidad de ruptura está limitada por las ondas Rayleigh si estas últimas son de superficie y las que debían romper la fractura serían las de corte. Dicha razón es que, en la mecánica de fractura dinámica existe un concepto llamado "Flujo de Energía en la Punta de la Grieta" (*Crack Tip Energy Flux*), el cual se describe a continuación:

1. El plano de la falla funciona matemáticamente como una "superficie" por lo que, para un sismo generado a 10 km de profundidad, el plano de la falla en sí mismo es una discontinuidad elástica, es decir, representa una interfaz donde dos bloques entran en contacto y se deslizan. Físicamente, las ecuaciones matemáticas que gobiernan las ondas elásticas atrapadas estrictamente a lo largo de esa ranura bidimensional (la interfaz de la falla) son idénticas a las ecuaciones matemáticas de las ondas Rayleigh que viajan en la superficie libre de la Tierra. Por lo tanto, la física de la fractura no ve la falla como un medio tridimensional infinito, sino como una

guía direccional donde se propagan "ondas de interfaz" acopladas.

2. Ocurrencia del colapso del Flujo de Energía (Energy Flux). Este colapso implica que la discontinuidad en las caras de la falla se fracturará hacia adelante. Por lo tanto, la roca circundante debe "alimentar" continuamente la punta de la fractura con energía elástica. Cuando la velocidad de la ruptura  $V_r$  empieza a acelerar y se acerca a la velocidad de las ondas Rayleigh  $V_R$ , ocurre una deformación de los campos de tensiones alrededor de la punta de la fractura, que incluye varios aspectos tales como:

- A medida que  $V_r$  se aproxima a  $V_R$  la energía elástica que el medio intenta enviar a la punta de la fractura se convierte progresivamente en ondas elásticas irradiadas que se escapan del frente. Pero al alcanzar la velocidad Rayleigh, las matemáticas de la elasticidad dinámica demuestran que el flujo de energía hacia la punta de la fractura se reduce exactamente a cero.
- Si se intenta forzar teóricamente que la ruptura viaje en la fractura a una velocidad ligeramente superior a la Rayleigh (por ejemplo,  $0,95 V_S$ , el flujo de energía requerido para romper la interfase de la roca se vuelve negativo, lo cual es físicamente imposible ya que, la fractura tendría que "producir" energía de la nada para mantenerse. Por esta razón, la velocidad Rayleigh actúa como un muro infranqueable para una aceleración continua convencional de la ruptura.

3. ¿Por qué existe entonces la zona prohibida entre  $V_R$  y  $V_S$ ? De acuerdo con los modelos existentes, la solución matemática para una ruptura estable en dos dimensiones para valores de  $V_r$  entre la velocidad Rayleigh que es aproximadamente  $0,92 V_S$  y la velocidad de corte  $V_S$ , no es posible. Si una falla intentara operar en ese rango intermedio, las fuerzas en la punta de la fractura se volverían inestables e incoherentes. Es por esto que en sismología se denomina ese tramo como la "zona prohibida".

Entonces, ¿cómo se logra la velocidad *super-shear*? Para superar este límite a partir de velocidad Rayleigh y entrar en el régimen *super-shear*  $V_r > V_S$ , la fractura no puede simplemente acelerar de forma gradual ( $0,91... 0,92... 0,93 V_S$ . Entonces, se recurre al mecanismo de Burridge-Andrews, antes mencionado, de acuerdo con el cual, debido al confinamiento, las tensiones elásticas aprovechan la energía de las ondas elásticas de compresión (Ondas P), que también se van generando, para saltar por delante de la zona de velocidad Rayleigh. Al aprovechar esa energía adicional de las ondas de compresión, se genera una microfractura secundaria por delante que es inmediatamente alcanzada por la fractura. En otras palabras, la fractura logra "transferirse" o saltar la zona prohibida de manera abrupta, alcanzando directamente una velocidad supersónica, apoyada por las ondas de compresión, que es estable y mayor que  $V_S$ .

#### Formación del pulso de alta velocidad

Para comprender cómo se origina un pulso de alta velocidad con mucha amplitud y corta duración (el llamado pulso sísmico supersónico o choque de Mach), se debe analizar la cinemática de la falla desde la mecánica de ondas y la superposición o interferencia constructiva, lo cual se describe en los párrafos siguientes.

Como se ha indicado, en el proceso de ruptura convencional, una falla inicia la ruptura a velocidad convencional  $V_r = 0,82 V_S$  y, por ende, las ondas de corte viajan por delante del frente de ruptura. En consecuencia, los sismómetros o acelerómetros en la superficie registrarán una llegada gradual de energía que se dispersa en el tiempo a medida que la distancia aumenta.

Contrariamente, en el régimen *super-shear* ( $V_r > V_S$ ), el mecanismo cambia drásticamente debido a tres fases físicas consecutivas:

- I. *Atrapamiento de Energía Sísmica*: Como el frente de ruptura avanza más rápido que las ondas que genera, las mismas no pueden disiparse hacia adelante y quedan atrapadas en una envolvente geométrica cónica (frente de Mach) descrita más adelante.
- II. *Coherencia de Fase (superposición de ondas o interferencia constructiva)*: De acuerdo con el principio anterior, cada punto del plano de la falla que es alcanzado por la ruptura actúa como un emisor instantáneo de ondas esféricas. Entonces, como  $V_r > V_S$ , existe una línea geométrica única en el espacio donde los frentes de onda circulares

emitidos en tiempos totalmente distintos llegan exactamente al mismo tiempo y con la misma fase.

- III. *Colapso del Tiempo de Viaje en un Pulso Sónico*: Para un observador o equipo situado sobre este frente de Mach, la diferencia de tiempo de llegada entre la energía liberada al inicio de la falla y la liberada al final se reduce a cero. Toda la energía transitoria de corte del sismo se comprime y se apila en un único instante de tiempo. El resultado instrumental es un pulso de velocidad del suelo con una aceleración pico extrema, con forma de choque agudo (una onda en forma de "N" o un pulso monopolar/bipolar de muy alta frecuencia).

Para calcular el Ángulo de Mach  $\beta$ , es decir, el ángulo en el cual se propaga la onda de choque respecto a la línea de la falla) se tiene:

$$\text{sen}(\beta) = V_S / V_r \quad \text{ecuación (9)}$$

La Tabla 2 resume las diferencias entre una ruptura subsónica y una supersónica.

**Tabla 2** Diferencias entre una ruptura subsónica y una supersónica.

| Regimen de Velocidad        | Relación Matemática                    | Comportamiento en las Etapas de Ruptura                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sub-Rayleigh (Convencional) | $V_r \approx 0.70 V_S$ a $0.90 V_S$    | El frente de ruptura viaja más lento que las ondas S. Es el comportamiento estándar en la mayoría de las etapas de deslizamiento, donde las barreras imponen resistencia.                                                                             |
| Zona Prohibida (Límite)     | $V_R < V_r < V_S$                      | Teóricamente inestable para grietas de desgarre puras en medios homogéneos. La ruptura tiende a saltar rápidamente a través de este intervalo.                                                                                                        |
| Supershear (Super-Cizalla)  | $V_r > V_S$ ( $\approx \sqrt{2} V_S$ ) | Ruptura supersónica. Ocurre exclusivamente en fallas de rumbo muy maduras y planas. Al no haber barreras geométricas y presentar baja resistencia, el frente supera la velocidad de las ondas S, generando un "cono de Mach" sísmico (choque sónico). |

Para ilustrar este proceso paso a paso, se incluye como ejemplo el sismo Izmit, 1999, en Turquía,  $M_w = 7.4$ . Este evento fue uno de los primeros en la historia de la sismología moderna donde se demostró de forma irrefutable la existencia de una ruptura *super-shear*. Durante este terremoto, la ruptura comenzó de manera normal (*sub-shear*), sin embargo, al pasar por un segmento de la falla poco ápero, plano y altamente estresado al este de la ciudad de Izmit, la velocidad de fractura sufrió un "salto importante" y se aceleró de golpe.

A tal efecto, se muestran los datos reales obtenidos por los sismólogos tras analizar las estaciones cercanas a la Falla de Anatolia del Norte:

1. Velocidad local de la onda de corte,  $V_S = 3,2 \text{ km/s}$  (valor promedio en la corteza superior de esa región de Turquía).

2. Velocidad de ruptura medida  $V_r$ : Las estaciones sismológicas y los modelos cinemáticos registraron que en el segmento oriental la ruptura viajó a 4,7 km/s.
3. Para esas condiciones se calculó el parámetro  $f$  real, utilizando la ecuación (8):

$$f = V_r / V_s = 4,7 / 3,2 \approx 1,47$$

Eso significa que la falla rompió un 47 % más rápido que las ondas S. Este valor está perfectamente bien alineado con la predicción teórica de la velocidad de Eshelby (approx 1,4142), lo que confirmó que la falla alcanzó un estado de propagación *super-shear* muy estable.

4. El cálculo del Ángulo del Frente de Mach Real, con el cual la onda de choque golpeó las ciudades aledañas en ese segmento de la falla. Eso se logra aplicando la ecuación (9):

$$\text{sen}(\beta) = V_s / V_r = 3,2 / 4,7 \approx 0,6808$$

$$\beta = \text{sen}^{-1}(0,6808) \approx 42,9$$

¿Cuál fue, entonces, el impacto real de estos parámetros en las obras? Normalmente, el movimiento del suelo más violento ocurre justo al lado de la falla y disminuye rápidamente a medida que la localización se aleja de la misma. Sin embargo, en el tramo *super-shear* de Izmit hubo un pulso destructivo ya que, por el ángulo de Mach, la energía sísmica no se disipó radialmente, sino que viajó concentradamente dentro de dicho ángulo hasta una distancia de varios kilómetros desde la falla en un pulso de alta energía. Véase el esquema de la Figura 6.

En consecuencia, las ciudades e infraestructuras situadas dentro del ángulo Mach a pocos kilómetros de la falla y a lo largo de la trayectoria de la misma recibieron un impacto simultáneo y violento (las ondas S llegaron al mismo tiempo que el frente de ruptura), duplicando el potencial de daño estructural en edificios que teóricamente debieron sufrir menos por estar "lejos" del epicentro. De acuerdo con Safina (2026), algo similar sucedió durante los sismos del 24 de junio 2026 en el norte de Venezuela y generó muchos colapsos simultáneos de edificaciones en distintas zonas de La Guaira.

De esta manera, queda demostrado que, los mecanismos en la fuente pueden generar casos importantes en la forma de los acelerogramas o sismogramas. La velocidad de la ruptura y las condiciones de la roca, los esfuerzos en la superficie de la falla pueden causar, por una parte, rupturas escalonadas con varios trenes de ondas S y, por otra parte, superposición de ondas con pulsos de muy alta energía. Ambos producen cambios en los espectros y los picos de aceleraciones que pueden llegar a ser muy destructivos.

## Conclusiones

A partir de los aspectos teóricos incluidos en este ensayo, se evidencia que los mecanismos en la fuente tienen una relevancia muy significativa en la forma de los registros de aceleraciones o velocidades y en los niveles de energía del sismo al alcanzar distintos sitios en la superficie del terreno.

En relación con la complejidad de los sismogramas o acelerogramas se tiene que, la presencia de múltiples picos de esas variables y trenes de ondas extendidos en un registro instrumental no significa necesariamente que sean sismos en zonas distintas, sino que la ruptura haya sido sucesiva y múltiple a partir de asperezas en un mismo sitio del plano de falla. No obstante, también se puede dar el caso de que las rupturas ocurran en sitios distintos separados por intervalos de tiempo cortos.

Es posible que dos terremotos con magnitudes de momento  $M_w$  globales idénticas liberen casi la misma energía total, pero su potencial destructivo en superficie varíe drásticamente si uno de ellos presenta una ruptura secuencial en más de una etapa. La ruptura secuencial o en etapas concentra pulsos de alta frecuencia que generan aceleraciones locales mucho más severas que un deslizamiento homogéneo.

El momento sísmico global no equivale a la suma escalar directa de los momentos de cada sub-evento, ya que el momento sísmico refleja una matriz de fuerzas tridimensional (tensor) condicionada por aspectos geométricos, solapamientos y cambios de rumbo de la fractura en el plano de falla.

La barrera de velocidad impuesta por las ondas Rayleigh en la interfaz de la falla es infranqueable de manera gradual debido a la anulación del flujo de energía; por lo tanto, el régimen *super-shear* se alcanza mediante el salto discreto de la fractura hasta otras microfracturas por delante de la misma que con la ayuda de las ondas primarias logran evitar dicha zona infranqueable impuesta por las ondas Rayleigh.

Los sismos que logran propagarse a velocidades supersónicas  $V_r > V_s$  previenen la dispersión temporal de la energía de corte. Al alinearse las fases circulares en un frente de onda común, descargan un pulso de velocidad concentrado y de impacto instantáneo, lo que multiplica el riesgo de colapso simultáneo en las edificaciones dentro del ángulo Mach a medida que se propaga la ruptura a mayor velocidad que las ondas S.

Es altamente probable que durante los sismos del 24 de junio de 2026 en el norte de Venezuela se haya presentado una situación de *super shear* con superposición de ondas y pulso de alta energía que causó el colapso simultáneo de varias edificaciones.

## Referencias

- Aki, K. (1979). Characterization of barriers on an earthquake fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B11), 6140-6148. (Introduce el modelo de barreras mecánicas).
- Aki, K. (1966). Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964: Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 44, 73-88.
- Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology* (2.<sup>a</sup> ed.). University Science Books.
- Andrews, D. J. (1976). Rupture velocity of plane strain shear

- cracks. *Journal of Geophysical Research*, 81(32), 5679–5687. doi.org
- Atkinson, C., & Eshelby, J. D. (1968). The flow of energy into the tip of a moving crack. *International Journal of Fracture Mechanics*, 4(1), 3-8.
- Bhat, H. S., Dmowska, R., King, G. C. P., Klinger, Y., & Rice, J. R. (2007). Off-fault damage patterns due to supershear ruptures with application to the  $M_w$  7.9 Denali fault earthquake of 2002. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B6), B06301. doi.org
- Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75(26), 4997-5009. doi.org
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(6A), 1865-1894.
- Boore, D. M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3), 635-676. doi.org
- Burridge, R. (1973). Admissible speeds for plane-strain self-similar shear cracks con travel times. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 26(1), 69–97
- Dieterich, J. H. (1979). Modeling of rock friction: 1. Experimental verification of constitutive relations. *Journal of Geophysical Research*, 84, 2161-2168. (Leyes de fricción de velocidad y estado).
- Dunham, E. M., & Archuleta, R. J. (2005). Near-source ground motion from steady state supershear rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2239–2257. doi.org
- Eshelby, J. D. (1969). The Elastic Field of a Crack Extending Non-Uniformly under General Anti-plane Loading. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17(3), 177-199. [1] (<https://www.osti.gov/servlets/purl/4682424>)
- Freund, L. B. (1972). Energy flux into the tip of an extending crack in an elastic solid. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 20(3), 129-152. doi.org
- Ida, Y. (1972). Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and a theoretical model of earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(3), 751-770.
- Kagan, Y. Y. (2003). Accuracy of modern global earthquake models. *Geophysical Journal International*, 155(3), 980–1007. doi.org
- Kanamori, H., & Stewart, G. S. (1978). Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B7), 3427-3434. (Fundamento del modelo de asperezas).
- Kostrov, B. V. (1964). Self-similar problems of propagation of shear cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 28(5), 1077-1087. doi.org
- Meier, M.-A., Ampuero, J. P., & Heimpel, M. (2019). Earthquakes within earthquakes: Patterns in rupture complexity. *Geophysical Research Letters*, 46(13), 7336–7346. doi.org
- Palmer, A. C., & Rice, J. R. (1973). The growth of slip surfaces in the progressive failure of over-consolidated clay. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 332(1591), 527-548.
- Safina, S. Comunicación personal
- Scholz, C. H. (2019). *The mechanics of earthquakes and faulting* (3.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press.
- Sibson, R. H. (1985). A note on fault reactivations. *Journal of Structural Geology*, 7(6), 751-754.
- Yue, H., Lay, T., Rivera, L., An, C., Vigny, C., Tong, X., & Báez, J. C. (2014). Localizing subevents of the 2010 Maule, Chile, earthquake ( $M_w$  8.8) using a multiple point-source inversion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4), 2859–2878