

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra
con orientación en Sismología**

**Velocidades aparentes y cúmulos espacio-temporales como
precursores a grandes sismos**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Halia Azucena Reynoso Reynoso

Ensenada, Baja California, México
2019

Tesis defendida por
Halia Azucena Reynoso Reynoso

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Fidencio Alejandro Nava Pichardo
Director de tesis

Miembros del comité

Dra. Ewa Glowacka

MC. José Guadalupe Acosta Chang

Dra. Karina Garay Palmett



Dr. Efraín Gómez Arias
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Halia Azucena Reynoso Reynoso** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Sismología.

Velocidades aparentes y cúmulos espacio-temporales como precursores a grandes sismos.

Resumen aprobado por:

Fidencio Alejandro Nava Pichardo
Director de Tesis

Cúmulos espacio-temporales de sismos pequeños a moderados son una característica de la sismicidad antes de la ocurrencia de grandes sismos, su identificación puede ser útil para mejorar y complementar pronósticos sísmicos a corto y mediano plazo. Sin embargo, la detección y cuantificación de dichos cúmulos no es tarea sencilla. Se propone un método para identificar cúmulos que ocurren en ventanas espacio-temporales determinadas, mediante el análisis de velocidades aparentes. Cuando ocurren cúmulos espacio-temporales, particularmente si son dos o más, en una ventana de espacio-tiempo determinada, aparecen picos en el histograma de velocidades. Con la información y análisis de los picos se elabora matrices de velocidad aparente en el tiempo, que sirven para identificar concentraciones de sismicidad espaciales y temporales. Se aplicó el método a datos del catálogo del USGS para el sur de California y norte de Baja California, para estudiar la sismicidad previa a los sismos de Landers (1992), Hector Mine (1999), El Mayor-Cucapah (2010) y Ridgecrest (2019). Puesto que los picos de velocidad aparente aparecen poco tiempo antes de la ocurrencia de los grandes sismos, pero no ocurren u ocurren muy débilmente mucho tiempo antes o después de la ocurrencia de la mayoría de las réplicas, podrían estar relacionados con altos niveles de esfuerzo y, por tanto, tener valor como precursor y contribuir a la estimación de riesgo sísmico. Para estimar qué tan significativos son los picos de datos reales, son comparados con histogramas de velocidades aparentes de catálogos sintéticos que corresponden a la hipótesis nula.

Palabras clave: Pronósticos sísmicos, cúmulos, velocidades aparentes, California y Baja California.

Abstract of the thesis presented by **Halia Azucena Reynoso Reynoso** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Seismology.

Apparent velocities and space-time clusters as precursors to large earthquakes.

Abstract approved by:

Dr. Fidencio Alejandro Nava Pichardo
Thesis Director

Space-time clusters of small to moderate earthquakes are characteristic of seismicity before the occurrence of large earthquakes, their identification can improve and complement seismic forecasts in the short and medium terms. Nevertheless, the detection and quantification of such clusters is not an easy task. A method is proposed to identify clusters that occur in certain space-time windows, by analyzing apparent velocities. When space-time clusters occur, particularly if they are two or more, in a given space-time window, peaks appear in the velocity histogram. With the information and analysis of the peaks, apparent velocity matrices over time are made, which serve to identify spatial and temporal seismicity concentrations. The method was applied to data from the USGS catalog for southern California and northern Baja California, to study the seismicity prior to the Landers (1992), Hector Mine (1999), El Mayor-Cucapah (2010) and Ridgecrest (2019) earthquakes. Since apparent velocity peaks appear shortly before the occurrence of large earthquakes, but do not occur or occur very weakly long before or after the occurrence of most aftershocks, they could be related to high stress levels and, hence, could be valuable as a precursor and contribute to the estimation of seismic risk. To estimate how significant the actual data peaks are, they are compared with apparent velocity histograms of synthetic catalogs that correspond to the null hypothesis.

Keywords: Seismic forecast, clusters, apparent velocities, California and Baja California.

Dedicatoria

A mi mamá y mi papá.

Agradecimientos

Al CONACYT por brindarme la beca que me permitió realizar mis estudios de posgrado y al proyecto 222795 por el apoyo económico; al CICESE, por aceptarme y brindarme la oportunidad de aprender y formar parte de tan bella comunidad.

Quiero agradecer especialmente a mi director de tesis, Dr. Alejandro Nava, por sus enseñanzas, orientación, asesoría y paciencia, muchas gracias por todo.

A mi comité de tesis, Dr. Ewa Glowacka, MC. José Chang y Dra. Karina Garay, por todos sus consejos y orientación durante el desarrollo de la tesis. A Todos mis profesores del posgrado, por todas sus lecciones y enseñanzas.

A mis padres y a mis hermanos Hazel y Pipis, por las porras a larga distancia y todo su apoyo desde Puebla.

A Fabián (mi tico) que estuvo siempre conmigo apoyándome e inspirándome. A mis compañeras y amigas de sismología Ari y Lilia, con ustedes las clases fueron más fáciles y sobre todo divertidas.

A mis compañeros del posgrado, especialmente a Trejo, los parces (Lore y Dani), Gerardo, Elsie, Liza, Sebas y Tania.

A los chizos, especialmente a Mily, Josué, Osvaldo, Giss, Mary, Santi, mi familia de Ensenada. A mi gran amiga Bere, por todo su apoyo.

A Quiriat por su ayuda y paciencia, a Gustavo Arellano, Euclides Ruiz, Humberto Benítez y José Mojarro por el apoyo técnico y a Denyse Robles y Gabriela Hernández por el apoyo administrativo.

A todos, ¡gracias!

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas.....	xvi
 Capítulo 1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	2
1.1.1 El modelo de rebote elástico.....	2
1.1.2 Precursores.....	3
1.1.3 Precursores sismológicos.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
 Capítulo 2. Método	
2.1 Velocidades aparentes y existencia de picos en el histograma de velocidades.....	6
2.2 Significatividad de picos en el histograma de velocidades con referencia a histogramas de hipótesis nula.....	12
2.3 La matriz de velocidades aparentes en el tiempo (MVAT) e identificación de cúmulos.....	14
 Capítulo 3. Resultados	
3.1 Landers.....	17
3.2 Hector Mine.....	34
3.3 El Mayor-Cucapah.....	46
3.4 Ridgecrest.....	57
 Capítulo 4. Discusión y conclusiones	
Literatura citada.....	74

Lista de figuras

Figura	Página
1. Izquierda: Distribución espacial uniforme de 1000 eventos con tiempos aleatorios distribuidos uniformemente y distribuciones de distancias, intervalos de tiempos y velocidades de pares de eventos. Derecha: Distribución espacial de 1000 eventos con tiempos aleatorios distribuidos en una banda y distribuciones de distancias, tiempos de ocurrencia y velocidades entre eventos de los pares de eventos del catálogo sintético.....	7
2. Arriba: Distribución espacial de un solo cúmulo compuesto por 100 eventos distribuidos en una esfera de radio igual a 1 km. Abajo: Distribución de distancias e intervalos de tiempo entre eventos del cúmulo; los eventos están distribuidos en un año. Distribución de velocidades entre eventos del cúmulo con un pico localizado en $v = 1.3\text{km/yr}$	8
3. (A): Cúmulo representado como una esfera de radio r , separado una distancia R de un evento externo representado con un asterisco. Abajo: Tiempos de ocurrencia distribuidos alrededor de un valor central en una banda, T es el tiempo entre la ocurrencia del eventos externo y el tiempo medio del cúmulo. (B): Dos cúmulos representados ambos con esferas de radio r_1 y r_2 los centros de las esferas está separado por una distancia R y el tiempo T entre los tiempos medios de ambos cúmulos.	9
4. Arriba: Hipocentros en 3 cúmulos (indicados con los colores rojo, azul y negro), hipocentros distribuidos uniformemente en una banda (indicados con color rosa) más eventos aleatorios (indicados con cruces). Abajo: Histogramas de distribuciones r_{ij} , τ_{ij} y v_{ij} ; con líneas discontinuas de color rojo se indica la localización de R , T y V para cada par de cúmulos.	11
5. Arriba: histograma de velocidades aparentes de los eventos “observados” del catálogo sintético C3BR (línea gruesa azul), histograma de la media de 100 realizaciones de catálogos <i>HOTS</i> derivados del mismo catálogo sintético (línea de color negro) y la media de <i>HOTS</i> más/menos dos desviaciones estándar (líneas de color rojo). Abajo: La línea azul es el histograma de velocidades aparentes del catálogo C3BR y la línea roja es la distribución $2s_0$ de <i>HOTS</i> ; se indica el área de los picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar con color amarillo. Ambos histogramas, observados y <i>HOTS</i> están normalizados a área unitaria.....	13
6. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo. Los grupos corresponden a velocidades de pares de eventos de cúmulos que interactúan entre sí y con eventos aleatorios.	14
7. Arriba. Distribución de eventos que conforman el grupo 1 de la MVAT. Las velocidades del grupo corresponden al efecto de dos cúmulos, el primero con tiempos t_i indicados con triángulos invertidos y el segundo con tiempos t_j identificado con círculos azules. Abajo. Distribución de eventos que conforman el grupo 2, las velocidades corresponden a un solo cúmulo.....	15

8. Epicentros del catálogo del USGS, las estrellas indican sismos con $M > 7$: L73 es el sismo de Landers con $M=7.3$, EMC72 es el sismo de El Mayor-Cucapah con $M=7.2$, HM71 es el sismo de Hector Mine con $M=7.1$ y R71 es el sismo de Ridgecrest con $M=7.1$. El diamante al SE de L73 indica el sismo de Joshua Tree con $M=6.1$ y el diamante al W indica el sismo de Big Bear con $M=6.5$ y el diamante al SE de R71 indica el sismo de Searles Valley con $M=6.4$ 16

9. Izquierda: Grupo de epicentros asociados al sismo L73 ocurridos antes del sismo Joshua Tree. El sismo L73 está indicado con una estrella y Joshua Tree con un diamante. Derecha: Cumulativa del número de sismos (línea azul). Las líneas verticales indican el comienzo de cada ventana y las líneas verticales discontinuas indican los extremos correspondientes. La identificación de cada ventana se indica con un número o letra para cada ventana. La estrella y diamante indican el tiempo de ocurrencia de L73 y Joshua Tree, respectivamente..... 18

10. Distribución de hipocentros de la ventana 3 previa a L73, vista con azimut= 35° y elevación= 18° ; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 19

11. Arriba: Número de eventos de la ventana L73-3 en función del tiempo, se ve que a principios de 1985 hubo un incremento importante de sismicidad, el cual aparece como una curva suave y ascendente y otro incremento que inicia poco antes de 1987.5, el cual se ve como una curva con pendiente más pronunciada. Abajo: Magnitud de eventos de la ventana L73-3 en función del tiempo..... 20

12. Arriba: histograma de velocidades aparentes de la ventana L73-3 (línea N gruesa azul), histograma de la media de 100 realizaciones de catálogos *HOTS* derivados de L73-3 (línea $\langle N_0 \rangle$ de color negro) y la media más/menos dos desviaciones estándar (líneas $\langle N_0 \rangle \pm 2s_0$ de color rojo). Abajo: histograma de velocidades aparentes de L73-3 menos la media de *HOTS* (línea $N - \langle N_0 \rangle$ gruesa azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó cuatro picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observados y *HOTS* están normalizados a área unitaria..... 21

13. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo del pico con $v=10.25\text{km/yr}$ de la ventana L73-3. Se identificó cuatro grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo. Las velocidades están codificadas de acuerdo a la barra de colores de la derecha. 22

14. Distribución de eventos que conforman los cuatro grupos de la MVAT. Las velocidades del grupo 1 corresponden al efecto de dos cúmulos, el primero con tiempos t_i indicados con triángulos invertidos y el segundo con tiempos t_j identificado con círculos azules. Las velocidades de los grupos 2 y 3 corresponden a velocidades intra-cúmulo. Las velocidades del grupo 4 son de un cúmulo que interacciona con dos eventos externos tardíos. La estrella y diamante indican la localización de los sismos L73 y Joshua Tree, respectivamente..... 23

15. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 24
16. Histograma de velocidades de la ventana L73-1 (línea $N-\langle N_0 \rangle$ azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 24
17. Distribución de hipocentros de la ventana 2 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 25
18. Histograma de velocidades de la ventana L73-2 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); se identificó cuatro picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 25
19. Distribución de hipocentros de la ventana 4 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 26
20. Histograma de velocidades menos velocidad media *HOTS* de la ventana L73-4 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); se identificó tres picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.... 26
21. Distribución de hipocentros de la ventana 5 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 27
22. Histograma de velocidades menos velocidad media *HOTS* de la ventana L73-5 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar, el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 27
23. Distribución de hipocentros de la ventana 6 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 28
24. Histograma de velocidades menos velocidad media *HOTS* de la ventana L73-6 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); se identificó tres picos significativo que está arriba de dos desviaciones estándar, el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 28
25. Matriz de velocidades aparente en el tiempo del pico con $\alpha=0.038$ de la ventana L73-6. Se identificó dos grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo. 29

26. Distribución de eventos que conforman los dos grupos de la MVAT (figura 25). Las velocidades de los grupos 1 y 2 son de cúmulos cercanos espacialmente. La estrella y diamante indican la localización de los sismos L73 y Joshua Tree, respectivamente... 30
27. Distribución de hipocentros de la ventana 7 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 30
28. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana L73-7 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó tres picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar, los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.... 31
29. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de las ventanas 8, 9 y 10 previas a L73 y distribuciones $2s_0$ de HOTS; en ninguna de las ventanas se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Los histogramas, observados y $2s_0$ están normalizados a área unitaria..... 32
30. Histograma de velocidades de la ventana L73P (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); no se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observados y HOTS están normalizados a área unitaria. 33
31. Izquierda: Grupo de epicentros previos asociados al sismo HM71 que está indicado con una estrella. Derecha: Cumulativa del número de sismos (línea azul), las líneas verticales indican el comienzo de cada ventana y las líneas verticales discontinuas indican los extremos correspondientes. La identificación de cada ventana se indica con un número o letra para cada ventana. La estrella indica el tiempo de ocurrencia de HM71. 34
32. Distribución de hipocentros de la ventana 3 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 35
33. Histograma de velocidades de la ventana HM71-3 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS ($2s_0$ línea roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 35
34. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo del pico con $v=10.75\text{km/yr}$ de la ventana HM71-3. Se identificó cuatro grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo. 36
35. Distribución de eventos que conforman los cuatro grupos de la MVAT (figura 34). Las velocidades del grupo 1 corresponden al efecto de dos cúmulos. Las velocidades del grupo 2 corresponden a velocidades intra-cúmulo. Las velocidades del grupo 3 y 4 son de cúmulos individuales que interaccionan con algunos eventos externos; la estrella indica la localización del sismo HM71. 37

36. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 38
37. Histograma de velocidades de la ventana HM71-1 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 38
38. Distribución de hipocentros de la ventana 2 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 39
39. Histograma de velocidades de la ventana HM71-2 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 39
40. Distribución de hipocentros de la ventana 4 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 40
41. Histograma de velocidades de la ventana HM71-4 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 41
42. Distribución de hipocentros de la ventana 5 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 41
43. Histograma de velocidades de la ventana HM71-5 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico pequeño que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 42
44. Distribución de hipocentros de la ventana 6 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 42
45. Histograma de velocidades de la ventana HM71-6 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); se identificó tres picos pequeños que están arriba de dos desviaciones estándar, los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 43

46. Distribución de hipocentros de la ventana 7 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 43
47. Histograma de velocidades de la ventana HM71-7 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); se identificó tres picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar, los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 44
48. Histogramas de velocidades de las ventanas 8, 9 y 10 previas a HM71 (línea azul) y distribuciones $2s_0$ de *HOTS*; en ninguna de las ventanas se identificó picos significativos. Los histogramas, observados y $2s_0$ están normalizados a área unitaria... 44
49. Histograma de velocidades de la ventana HM71P (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); no se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observados y *HOTS* están normalizados a área unitaria..... 45
50. Izquierda: Grupo de epicentros previos al sismo EMC72 el cual se indica con una estrella. Derecha: Cumulativa del número de sismos (línea azul). Las líneas verticales indican el comienzo de cada ventana y las líneas verticales discontinuas indican los extremos correspondientes. La identificación de cada ventana se indica con un número o letra. La estrella indica el tiempo de ocurrencia de EMC72..... 46
51. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a EMC72, vista con azimut=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 47
52. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-1 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* ($2s_0$ línea roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados al área unitaria..... 47
53. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo del pico con $\alpha = 0.075$ de la ventana EMC72-1. Se identificó dos grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo. 48
54. Distribución de eventos que conforman los dos grupos de la MVAT. Las velocidades del grupo 1 corresponden principalmente a un cúmulo temprano y las velocidades del grupo 2 corresponden principalmente a un cúmulo tardío. La estrella indica la localización del sismo EMC72. 49
55. Distribución de hipocentros de la ventana 2 previa a EMC72, vista con azimut=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 49

56. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-2 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 50
57. Distribución de hipocentros de la ventana 3 previa a EMC72, vista con azimut=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 51
58. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-3 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos pequeños que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 51
59. Distribución de hipocentros de la ventana 4 previa a EMC72, vista con azimut=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 52
60. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-4 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico que están arriba de dos desviaciones estándar que está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria. 52
61. Distribución de hipocentros de la ventana 5 previa a EMC72, vista con azimut=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 53
62. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-5 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos pequeños que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 53
63. Distribución de hipocentros de la ventana 6 previa a EMC72, vista con azimut=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 54
64. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-6 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); no se identificó picos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria... 54
65. Distribución de hipocentros de la ventana 7 previa a EMC72, vista con azimut=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)..... 55
66. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-7 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); no se identificó picos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria... 55

67. Histograma de velocidades de las ventanas 8, 9 y 10 (líneas azules) previas a EMC72 y distribuciones $2s_0$ de *HOTS*; en ninguna de las ventanas se identificó picos significativos. Los histogramas, observados y $2s_0$ están normalizados a área unitaria. 56
68. Histograma de velocidades de la ventana EMC72P (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); no se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observados y *HOTS* están normalizados a área unitaria..... 57
69. Izquierda: Grupo de epicentros asociados al sismo Ridgecrest ocurridos antes del sismo Searles Valley. El sismo R71 está indicado con una estrella y Searles Valley con un diamante. Derecha: Cumulativa del número de sismos (línea azul). Las líneas verticales indican el comienzo de cada ventana y las líneas verticales discontinuas indican los extremos correspondientes. La identificación de cada ventana se indica con un número o letra para cada ventana. La estrella y diamante indican el tiempo de ocurrencia de R71 y Searles Valley, respectivamente..... 58
70. Distribución de hipocentros de la ventana 3 previa a R71, vista con azimut=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)... 59
71. Histograma de velocidades de la ventana R71-3 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* ($2s_0$ línea roja); se identificó dos picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar, los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 59
72. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo del pico con $\alpha = 0.0189$ de la ventana R71-3. Se identificó dos grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo..... 60
73. Distribución de eventos que conforman los dos grupos de la MVAT. Las velocidades del grupo 1 corresponden al efecto de dos cúmulos, el primero con tiempos t_i indicados con triángulos invertidos y el segundo con tiempos t_j identificado con círculos azules. Las velocidades del grupo 2 son de dos cúmulos que ocurrieron cerca espacialmente. La estrella y diamante indican la localización de los sismos R71 y Searles Valley, respectivamente. 61
74. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a R71, vista con azimut=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)... 62
75. Histograma de velocidades de la ventana R71-1 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico pequeño que está arriba de dos desviaciones estándar que está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 62

76. Distribución de hipocentros de la ventana 2 previa a R71, vista con azimut=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)... 63
77. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana R71-2 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó tres picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.... 63
78. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a R71, vista con azimut=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)... 64
79. Histograma de velocidades de la ventana R71-4 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó un pico que están arriba de dos desviaciones estándar que está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria. 65
80. Distribución de hipocentros de la ventana 5 previa a R71, vista con azimut=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)... 65
81. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana R71-5 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó dos pequeños picos arriba de dos desviaciones estándar, que están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 66
82. Distribución de hipocentros de la ventana 6 previa a R71, vista con azimut=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo)... 67
83. Histograma de velocidades de la ventana R71-6 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); no se identificó picos significativos arriba de dos desviaciones estándar, el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria..... 67
84. Histograma de velocidades de las ventanas 7, 8, 9 y 10 previas a R71 (línea azul) y distribuciones $2s_0$ de HOTS; en ninguna de las ventanas se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Los histogramas, observados y $2s_0$ están normalizados a área unitaria..... 68
85. Valores de A (indicados con estrellas grandes) y α (indicados con estrellas pequeñas) en el tiempo para los sismos L73, HM71, EMC72 y R71..... 71

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Información de A , α , magnitud mínima y número de eventos N de las diez ventanas previas y la ventana P posterior al sismo L73. Los valores de área muy pequeños y cercanos a cero se indican con líneas punteadas. Números de eventos demasiado bajos son indicados con letra itálica.....	33
2. Información de A , α , magnitud mínima y número de eventos N de las diez ventanas previas y la ventana P posterior al sismo HM71. Los valores de área muy pequeños y cercanos a cero se indican con líneas punteadas.....	45
3. Información de A , α , magnitud mínima y número de eventos N de las diez ventanas previas y la ventana P posterior al sismo EMC72. Los valores de área muy pequeños y cercanos a cero se indican con líneas punteadas. Números de eventos demasiado bajos son indicados con letra itálica.	57
4. Información de A , α , magnitud mínima y número de eventos N de las diez ventanas previas al sismo R71. Los valores de área muy pequeños y cercanos a cero se indican con líneas punteadas. Números de eventos demasiado bajos son indicados con letra itálica.....	69

Capítulo 1. Introducción

Debido a los cuantiosos daños y pérdidas que pueden ser ocasionados por terremotos, y dado que no puede impedirse la ocurrencia de éstos, sería conveniente saber cuándo ocurrirá en un lugar dado el próximo sismo de gran magnitud, para poder tomar medidas preventivas que reduzcan los efectos adversos del sismo. Un importante objetivo de la sismología es desarrollar métodos para estimar cuándo ocurrirá el próximo sismo de gran magnitud en una región determinada.

La predicción determinística es intrínsecamente imposible, porque no se conoce suficientemente bien el mecanismo de ruptura y no es posible conocer con suficiente detalle la resistencia, la deformación y el esfuerzo para cada punto del volumen involucrado en la ocurrencia de un sismo (Crampin, 1999). De lo anterior y del hecho que el medio sismogénico se comporta como sistema críticamente autorganizado (Bak et al., 1987; Bak y Tang, 1989), es necesario considerar las componentes imponderables del proceso como componentes aleatorias y tratarlas por métodos estadístico-probabilísticos para calcular el peligro sísmico.

Llamamos peligro sísmico a la probabilidad de ocurrencia de uno o más sismos en una ventana de espacio, tiempo y magnitud determinada. La declaración de una estimación significativa de peligro sísmico, junto con medidas de qué tan confiable, significativa y robusta es, constituye un pronóstico sísmico.

El análisis estadístico de la ocurrencia de grandes sismos está limitado por la extensión temporal de los catálogos sísmicos (públicos o privados) y por la cobertura espacial de la o las redes cuyas observaciones reportan. La mayor parte de los catálogos tiene corta extensión comparada con los intervalos, usualmente grandes, entre sismos de gran magnitud para una región determinada; por lo que los pronósticos a largo plazo basados en estos catálogos tienen pobre definición temporal (Rikitake, 1976).

Para tratar de lograr mejor definición temporal, la sismología se apoya en el uso de *precursores*: fenómenos observables que preceden a los terremotos (Stein and Wysession, 2003) y que se considera están relacionados con los altos niveles de esfuerzo que deben existir para que pueda ocurrir un gran sismo.

En este trabajo se propone un método para identificar, a través del análisis de velocidades aparentes que describiremos más adelante, cúmulos espacio-temporales de sismos pequeños a moderados que ocurren en un área determinada. Dado que dichos cúmulos ocurren más frecuentemente

en condiciones de alto esfuerzo (Lippiello et al., 2012), su identificación y cuantificación pueden ser útiles como observación precursora.

1.1 Antecedentes

Los antecedentes generales del presente trabajo son los modelos del proceso sismogénico y los intentos de estimación del peligro sísmico; éstos incluyen análisis de las estadísticas de ocurrencias de sismos de gran magnitud y estudios de precursores.

1.1.1 El modelo de rebote elástico

El modelo de rebote elástico (Reid, 1910) propone la existencia de un proceso de acumulación de esfuerzo del terreno tal que si el esfuerzo es mayor al que éste puede resistir, el terreno falla y se genera una fractura que permite liberar la energía acumulada. El modelo de rebote elástico es, en principio, correcto, pero es un esquema demasiado simplificado (Chui, 2009) ya que según él modelo el ciclo se repite sin cambios, ya que considera implícitamente un terreno homogéneo en elasticidad, resistencia, deformación y esfuerzo, e implica la misma caída de esfuerzo en toda la falla única.

La realidad no es tan sencilla, es necesario considerar que el medio es altamente heterogéneo y tener en cuenta que los procesos se retroalimentan, por lo que el medio es un sistema críticamente auto-organizado (Ito y Matsuzaki, 1990; Bak y Chen, 1991; Bak et al., 1994). Además, no se conoce suficientemente bien el proceso de ruptura ni qué la dispara; tampoco es posible conocer en detalle el estado de esfuerzo ni la resistencia de cada punto del medio en que puede ocurrir un sismo, por lo que la predicción determinista de los sismos es imposible.

Por lo anterior, y dado que los pronósticos basados en las estadísticas de sismos anteriores no tienen suficiente resolución temporal, es necesario complementar éstos con observaciones y pronósticos basados en precursores.

1.1.2 Precursores

Los precursores, fenómenos observables que ocurren antes de grandes sismos, pueden aportar información útil para modificar y mejorar pronósticos a mediano y corto plazo. Hasta la fecha no existe algún precursor que ocurra si y solo si va a ocurrir un sismo (Ohnaka, 2013), por lo cual es importante contar con el mayor número de precursores.

En la literatura se ha reportado diferentes tipos de precursores; algunos ejemplos de precursores no sismológicos son: cambios en el flujo, presión, concentración de radón y cambios en el nivel del agua subterránea (Richon et al., 2003; Wang y Manga, 2009; Deb et al., 2018), cambios en la topografía, campos electromagnéticos, resistividad de las rocas y comportamiento animal (Rikitake, 1976; Cicerone et al., 2009; Wyss, 1991; Wyss, 1997).

1.1.3 Precursores sismológicos

Los precursores sismológicos están relacionados con características de la sismicidad de fondo, esto es, de sismos pequeños a medianos que ocurren antes de un terremoto.

Varios estudios consideran como precursores a los cambios en la razón de ocurrencia de la sismicidad de fondo, por ejemplo: sismos y/o sismicidad *precursores*, *patrón de dona* y quietud sísmica (Bouchon et. al., 2013; Wyss y Habermann, 1988; Chen et al., 1999; Yamashita, T. y Knopoff, L., 1992). En la literatura se ha reportado, entre otros, cambios en la razón V_p / V_s (e.g. Rikitake, 1976), cambios en el valor b de la relación Gutenberg-Richter antes de grandes sismos (e.g. Scholz, 1968; Papazachos, 1975; Smith, 1981; Nuannin et al., 2005), en las dimensiones fractales de la sismicidad de fondo (Hirabayashi et al., 1992; Nakaya y Hashimoto, 2002 y Nakaya, 2005), y cambios en la entropía de la sismicidad de fondo (Utsu, 1999; Despaigne, 2017).

Se ha reportado agrupaciones de actividad sísmica o “enjambres precursores” antes de terremotos en California (Kanamori, 1981). Tanto los estudios de dimensión fractal como los de entropía, observan mayores concentraciones espaciales de la sismicidad de fondo (Enescu e Ito, 2001; Hirabayashi et al., 1992; Márquez et al., 2012; Despaigne, G., 2017), las que concuerdan con las concentraciones o cúmulos espacio temporales que proponemos como precursores.

1.2 Justificación

La implementación y estudio de precursores sísmicos es importante en los ámbitos científico y social porque contribuyen a mejorar el pronóstico sísmico, a partir del cual es posible disminuir el riesgo asociado con la ocurrencia de terremotos.

1.3 Hipótesis

En una región donde el esfuerzo es suficientemente alto para que pueda ocurrir próximamente un terremoto, los sismos de pequeña y mediana magnitud que constituyen la sismicidad de fondo presentan cúmulos espacio-temporales de sismicidad con mayor frecuencia y en mayor número, que cuando el nivel de esfuerzos es bajo y no se espera que pueda ocurrir un sismo grande.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Elaborar e implementar un método para identificar y cuantificar la ocurrencia de cúmulos espacio-temporales en la sismicidad de fondo y explorar el posible valor de dicha ocurrencia como precursor a la ocurrencia de sismos de gran magnitud.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar e implementar un método para identificar la posible presencia de cúmulos espacio-temporales de sismos en la sismicidad de fondo, basado en la observación de picos en los histogramas de velocidades aparentes.
2. Desarrollar e implementar un método para la identificación y cuantificación de cúmulos, basado en la distribución temporal de las velocidades aparentes identificadas en el punto anterior.
3. Probar los métodos mediante su aplicación a catálogos sintéticos.

4. Aplicar los métodos a catálogos reales y determinar si verdaderamente los cúmulos espacio-temporales aparecen preferentemente para tiempos cortos antes de la ocurrencia de grandes sismos.
5. Explorar qué información adicional puede extraerse de dichos cúmulos.

Capítulo 2. Método

2.1 Velocidades aparentes y existencia de picos en el histograma de velocidades.

Sea un conjunto de eventos ordenados $e_i = (t_i, x_i, y_i, z_i, M_i)$; $i = 1, \dots, N$ con tiempos $t_i < t_j$ para $i < j$, con coordenadas x_i, y_i, z_i y magnitudes M_i , que ocurren durante un intervalo de tiempo $[t_1, t_N]$ dentro de un volumen con límites $[x_{\min}, x_{\max}], [y_{\min}, y_{\max}], [z_{\min}, z_{\max}]$. En un conjunto de N eventos hay $N_p = N(N-1)/2$ pares de eventos (e_i, e_j) , $i < j$; el tiempo entre la ocurrencia de cada par es $\tau_{ij} = t_j - t_i$ y la distancia entre sus hipocentros es $r_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}$.

Para cada par de eventos la distancia r_{ij} entre ellos, dividida entre el intervalo τ_{ij} define una velocidad por tener unidades de distancia entre tiempo:

$$v_{ij} = \frac{r_{ij}}{\tau_{ij}}; \quad (1)$$

estas v_{ij} son *velocidades aparentes* cuyo valor puede ir desde cero, para eventos ocurridos a tiempos distintos en el mismo lugar con $r_{ij} = 0$, hasta infinito, para eventos ocurridos en distintos lugares al mismo tiempo con $\tau_{ij} = 0$.

Las velocidades aparentes de pares de datos que no pertenecen a algún cúmulo, estarán distribuidas aleatoriamente; como mostraremos más adelante, un histograma de estas velocidades tendrá forma suave determinada por la geometría de la región de estudio y por la distribución espacial de los sismos.

La figura 1 (izquierda) muestra hipocentros distribuidos uniformemente en un cubo, con tiempos aleatorios con distribución uniforme. Este tipo de distribución no es apropiada para la región de estudio, pues en el sur de California y el norte de Baja California la sismicidad tiende a concentrarse en agrupamientos alargados relacionados con las fallas locales; este tipo de distribución espacial puede modelarse como una distribución uniforme en una banda; la figura 1, (derecha) muestra una distribución espacial como la mencionada con tiempos aleatorios distribuidos uniformemente. Las curvas en la parte

baja de la figura 1 son las distribuciones de distancias r , (en kilómetros) diferencias entre tiempos de ocurrencia τ (en años; unidad que será abreviada como “yr”) y velocidades aparentes v (en km/yr) de cada distribución de hipocentros. Los valores N de los histogramas fueron divididos por el número total de pares de cada catálogo sintético.

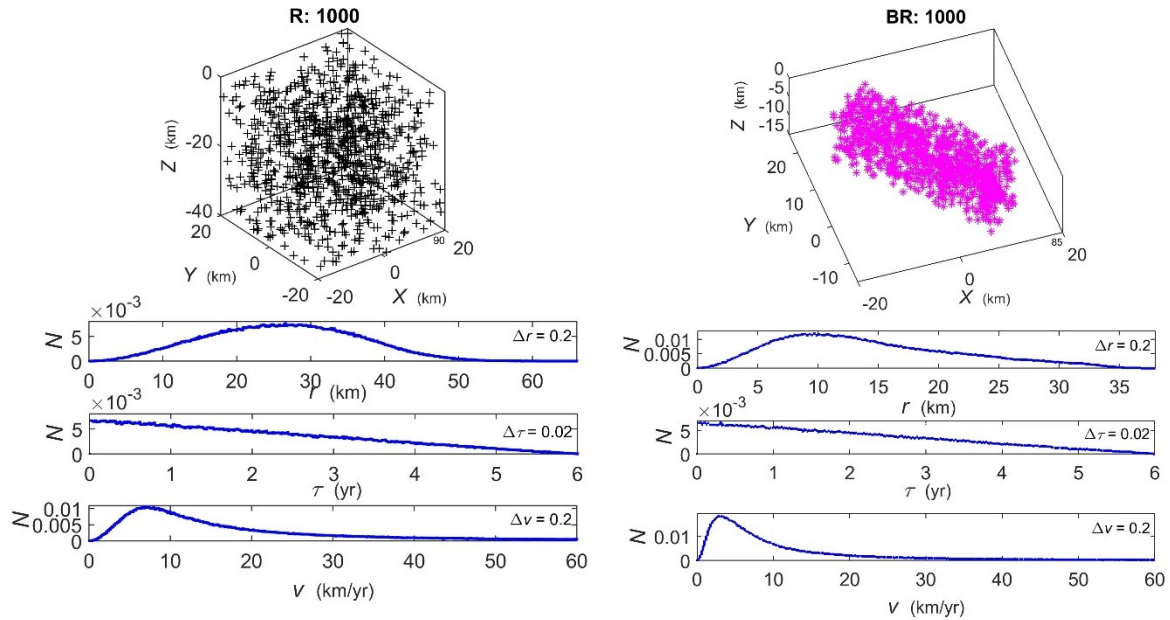


Figura 1. Izquierda: Distribución espacial uniforme de 1000 eventos con tiempos aleatorios distribuidos uniformemente y distribuciones de distancias, intervalos de tiempos y velocidades de pares de eventos. Derecha: Distribución espacial de 1000 eventos con tiempos aleatorios distribuidos en una banda y distribuciones de distancias, tiempos de ocurrencia y velocidades entre eventos de los pares de eventos del catálogo sintético.

Las distribuciones de distancias entre eventos de ambos catálogos sintéticos tienen mayor abundancia en intervalos determinados por las dimensiones espaciales de cada catálogo. Las distribuciones de velocidades aparentes reflejan las características de cada catálogo; la distribución de velocidades del catálogo de eventos distribuidos en una banda tiene un pico mejor definido y velocidades más bajas que la distribución de velocidades del catálogo de eventos distribuidos uniformemente tanto en espacio como en tiempo.

Se ha encontrado que en ambientes de alto esfuerzo los hipocentros pertenecientes a la sismicidad de fondo tienden a agruparse y que la agrupación espacial y temporal de la sismicidad representa una herramienta potencial para el pronóstico de sismos grandes (Lippiello et al., 2012).

Si la sismicidad incluye cúmulos espacio-temporales, podemos modelar cada cúmulo como una distribución esférica de hipocentros con radio r y duración 2τ . Para los sismos de un mismo cúmulo las distancias entre los pares de hipocentros estarán dentro de un rango pequeño $2r$. Aun cuando el tiempo de ocurrencia entre cada par puede ser muy pequeño, en general la mayor parte de las velocidades aparentes tendrán valores dentro de un pequeño rango de bajas velocidades.

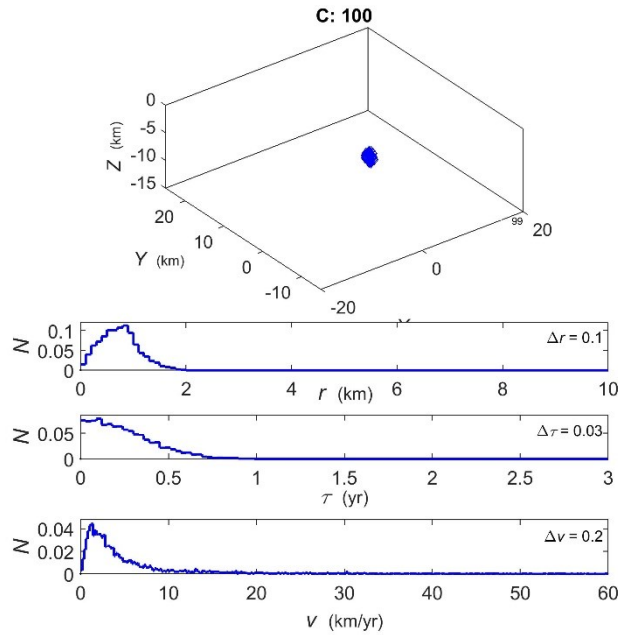


Figura 2. Arriba: Distribución espacial de un solo cúmulo compuesto por 100 eventos distribuidos en una esfera de radio igual a 1 km. Abajo: Distribución de distancias e intervalos de tiempo entre eventos del cúmulo; los eventos están distribuidos en un año. Distribución de velocidades entre eventos del cúmulo con un pico localizado en $v = 1.3 \text{ km/yr}$.

En la figura 2 se muestra un cúmulo espacio-temporal que contiene 100 hipocentros distribuidos de forma uniforme en una esfera de radio igual a 1 km y tiempos distribuidos en un año; también se muestra sus correspondientes distribuciones r , τ y v . La distribución de distancias entre hipocentros tiene un máximo en $r = 0.85 \text{ km}$ y la distribución de intervalos de tiempo tiene un máximo en $\tau = 0.1050 \text{ yr}$. En éste ejemplo se muestra un sólo cúmulo, por lo que el pico de velocidad localizado en $v = 1.3 \text{ km/yr}$ corresponde a velocidades aparentes intra-cúmulo. La máxima velocidad en este ejemplo fue $v = 7026.73 \text{ km/yr}$ pero la mayoría de las velocidades son menores de 10 km/yr . El pico de baja velocidad de este ejemplo es característico para eventos intra-cúmulo, de acuerdo con lo que hemos observado en las distribuciones de otros cúmulos.

La figura 3(A) muestra las velocidades aparentes entre un cúmulo y un evento fuera de él; el cúmulo se representa como una esfera y el evento externo como un asterisco. R es la distancia entre el evento externo y el centro del cúmulo, T el intervalo entre el tiempo de origen del evento externo y el tiempo medio del cúmulo y τ el tiempo de duración del cúmulo; si el cúmulo tiene n eventos, para cada evento externo habrá n velocidades aparentes que van desde $V_{\min}$ hasta $V_{\max}$, donde

$$V_{\min} = \frac{R-r}{T+\tau}, \quad V_{\max} = \frac{R+r}{T-\tau}. \quad (2)$$

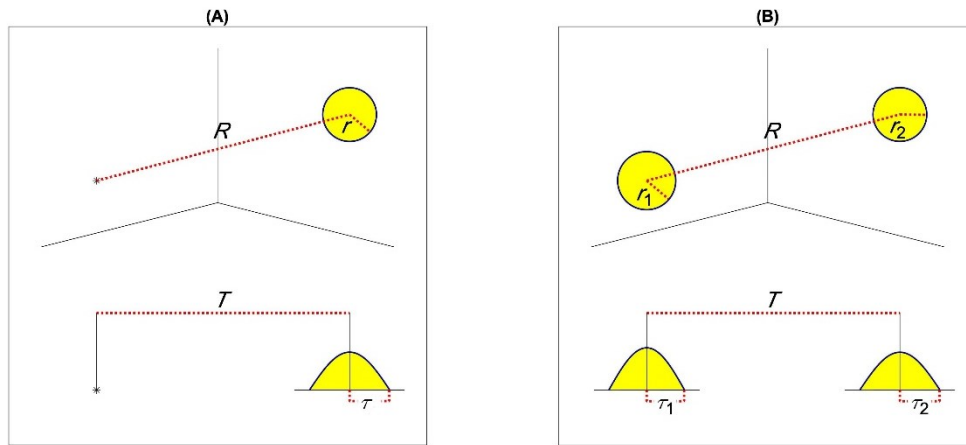


Figura 3. (A): Cúmulo representado como una esfera de radio r , separado una distancia R de un evento externo representado con un asterisco. Abajo: Tiempos de ocurrencia distribuidos alrededor de un valor central en una banda, T es el tiempo entre la ocurrencia del evento externo y el tiempo medio del cúmulo. (B): Dos cúmulos representados ambos con esferas de radio r_1 y r_2 ; los centros de las esferas están separados por una distancia R y el tiempo T entre los tiempos medios de ambos cúmulos.

Cuando en la sismicidad hay más de un cúmulo espacio-temporal, para cada par de cúmulos, las distancias entre los hipocentros y los intervalos entre tiempos de ocurrencia de cada par de eventos (donde cada evento pertenece a un cúmulo diferente), así como las velocidades aparentes de estos pares, estarán dentro de rangos pequeños.

Para estimar las velocidades aparentes para diferentes pares de cúmulos en la figura 3(B), representamos cada uno como una esfera de radio r donde la distancia que separa los centros de las esferas es igual a R . Los tiempos de ocurrencia entre eventos de cada grupo están distribuidos alrededor de un valor central en una banda de ancho 2τ . La velocidad aparente V para los eventos que estén en el centro de los cúmulos y que ocurran a la mitad de las bandas de tiempo será:

$$V = \frac{R}{T}, \quad (3)$$

donde T es el tiempo total entre los tiempos centrales de cada cúmulo y las velocidades aparentes estarán entre las velocidades $V_{\min}$ y $V_{\max}$, donde

$$V_{\min} = \frac{R - r_1 - r_2}{T + \tau_1 + \tau_2} \quad \text{y} \quad V_{\max} = \frac{R + r_1 + r_2}{T - \tau_1 - \tau_2}. \quad (4)$$

Si R y T son grandes con respecto a r y τ , las velocidades aparentes entre cúmulos estarán dentro de un rango pequeño que aparecerá como un pico en el histograma de velocidades aparentes. Si T es pequeño con respecto a los intervalos de tiempos de ocurrencia τ entre eventos, el denominador de $V_{\max}$ puede ser muy pequeño (o cero) y las velocidades aparentes estarán muy extendidas en la distribución, por tanto, sus amplitudes serán pequeñas en el histograma de velocidades. Si R es pequeño con respecto a r entre los eventos, las velocidades aparentes pueden ser muy pequeñas.

La comparación de la amplitud de cada pico de velocidades inter-cúmulos con la del nivel de otras velocidades aparentes aporta información respecto al número de eventos de cada par de cúmulos; su ancho está relacionado con las dimensiones y duración de los cúmulos, pero principalmente con el tiempo T entre ellos.

La Figura 4 muestra una realización sintética más realista que involucra 3 cúmulos (C), sismicidad distribuida uniformemente en una banda (BR), que simula las características de una falla en California, y eventos completamente aleatorios (R) distribuidos uniformemente en el volumen. Más adelante nos referiremos a este catálogo sintético como C3BR. En la distribución de r se observa tres picos alrededor de la R de cada par de cúmulos ($R_{12} = 18.841\text{km}$, $R_{13} = 12.083\text{km}$ y $R_{23} = 26.702\text{km}$) y un pico que corresponde a cortas distancias intra-cúmulo. En la distribución de τ se indica T para cada par de cúmulos ($T_{12} = 2\text{yr}$, $T_{13} = 3.5\text{yr}$ y $T_{23} = 1.85\text{yr}$). El pico en la distribución v para cúmulos muy cercanos en tiempo, por ejemplo T_{23} , está extendido y tiene baja altura aun cuando los cúmulos están más separados en distancia. El pico más alto es para los cúmulos 1 y 3 que aunque están más cerca en distancia que los cúmulos 2 y 3, están más separados en tiempo.

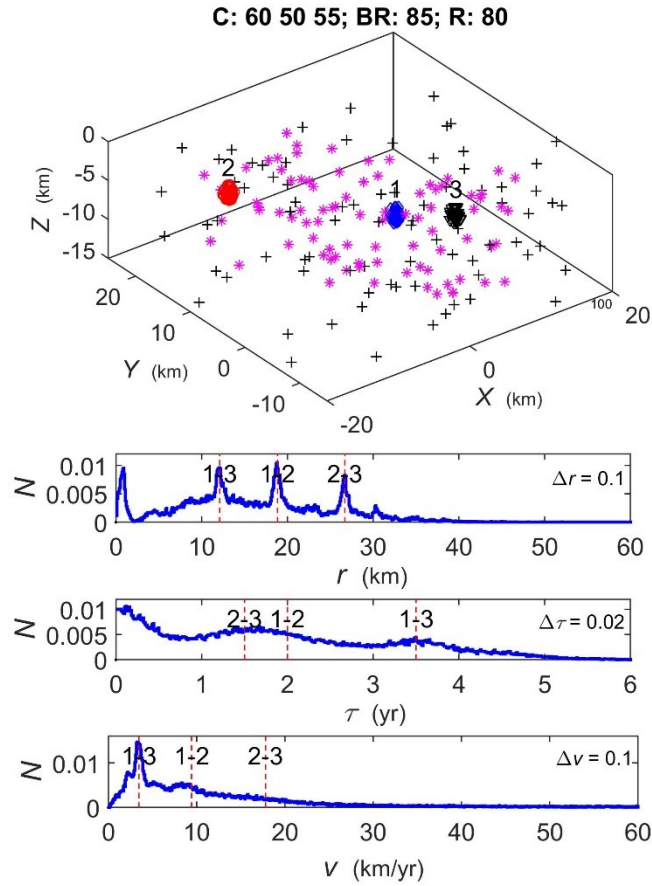


Figura 4. Arriba: Hipocentros en 3 cúmulos (indicados con los colores rojo, azul y negro), hipocentros distribuidos uniformemente en una banda (indicados con color rosa) más eventos aleatorios (indicados con cruces). Abajo: Histogramas de distribuciones r_{ij} , τ_{ij} y v_{ij} ; con líneas discontinuas de color rojo se indica la localización de R , T y V para cada par de cúmulos.

Para determinar si la presencia de cúmulos espacio-temporales varía en el tiempo, se establece ventanas temporales, que pueden traslaparse, y se lleva a cabo el análisis de velocidades aparentes para cada ventana; esto es, para cada ventana se elabora un histograma que abarca el rango de velocidades para el cual ocurren picos significativos (que tengan poca probabilidad de ocurrir por casualidad) que indican la posible agrupación espacio-temporal de eventos.

2.2 Significatividad de picos en el histograma de velocidades con referencia a histogramas de hipótesis nula.

Si suponemos que los picos observados en un histograma de velocidades reflejan la existencia de cúmulos espacio-temporales, es importante determinar qué tan significativos son dichos picos o qué tan posible es que hayan ocurrido al azar. Por tanto, comparamos lo observado con histogramas de velocidades aparentes de catálogos sintéticos que corresponden a la hipótesis nula, i.e., que no tienen cúmulos espacio-temporales, pero que tienen el mismo número de eventos, la misma duración y las mismas dimensiones espaciales que los datos observados.

Consideramos tres tipos de catálogos sintéticos de hipótesis nula:

- Catálogos *HO* con hipocentros y tiempos de ocurrencia generados aleatoriamente con probabilidad uniforme. Como ya se ha mencionado, dichos catálogos no son satisfactorios pues la sismicidad en regiones como California y Baja California (donde aplicaremos el método de identificación de cúmulos) no está distribuida uniformemente en el espacio, sino que tiende a concentrarse en la cercanía de fallas.
- Para modelar las concentraciones espaciales de la sismicidad en la región de estudio elaboramos catálogos *HOT* que tienen las mismas localizaciones del catálogo original y tiempos generados aleatoriamente con probabilidad uniforme.
- Para modelar con condiciones aún más estrictas elaboramos catálogos *HOTS* que mantienen localizaciones y tiempos de arribo originales (del catálogo real o sintético de estudio) y únicamente intercambian aleatoriamente tiempos entre eventos, de modo que conservan las distribuciones originales de intervalos y de distancias pero no hay agrupaciones espacio-temporales. Por tanto, para comparar con velocidades de datos reales utilizaremos velocidades aparentes de catálogos *HOTS*.

La figura 5 muestra con una línea azul el histograma de velocidades aparentes del catálogo sintético C3BR que contiene: eventos distribuidos en una banda, tres cúmulos y eventos aleatorios; la línea de color negro indica el histograma de la media de 100 realizaciones de catálogos *HOTS* derivados del mismo catálogo sintético. Líneas rojas delgadas muestran la media más/menos dos desviaciones estándar ($2s_0$). Aquí y en el resto del trabajo los histogramas observados y *HOTS* son normalizados para que la sección mostrada tenga área unitaria, para ello se calculó el área para cada histograma observado (parte

positiva) y se dividió cada valor del histograma por dicha área. En el caso de los histogramas sintéticos, se calculó el área (parte positiva) de la media de los HOTS y se dividió cada valor del histograma de la media de los HOTS. El mismo procedimiento se llevó a cabo para los histogramas $2s_0$.

Los picos mayores a $2s_0$ (o menores de $-2s_0$) tienen pocas probabilidades de ocurrir por casualidad si la sismicidad no contiene cúmulos espacio-temporales.

Para facilitar la comparación entre los histogramas de velocidades observados y *HOTS*, se resta la media de las realizaciones *HOTS* a la distribución “observada” de eventos y se grafica la distribución $2s_0$ de *HOTS*. Posteriormente se identifica picos significativos; para cada pico se determina la velocidad v_x que corresponde al punto más alto de cada pico y se selecciona el rango de velocidad $[v_1, v_2]$, que se mide desde el punto más alto hasta a la amplitud $2s_0$ para cada lado.

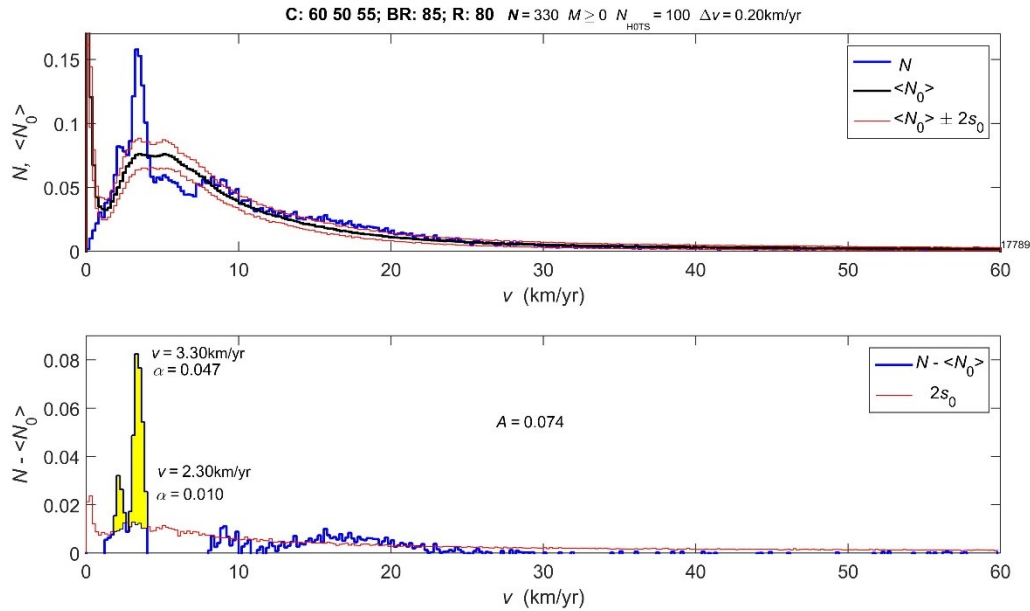


Figure 5. Arriba: histograma de velocidades aparentes de los eventos “observados” del catálogo sintético C3BR (línea gruesa azul), histograma de la media de 100 realizaciones de catálogos *HOTS* derivados del mismo catálogo sintético (línea de color negro) y la media de *HOTS* más/menos dos desviaciones estándar (líneas de color rojo). Abajo: La línea azul es el histograma de velocidades aparentes del catálogo C3BR y la línea roja es la distribución $2s_0$ de *HOTS*; se indica el área de los picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar con color amarillo. Ambos histogramas, observados y *HOTS* están normalizados a área unitaria.

En la figura 5 (abajo) se muestra la resta del histograma de velocidades aparentes del catálogo sintético C3BR menos la media de los catálogos *HOTS*. El área α de cada pico arriba de $2s_0$ que es una medida de la importancia de cada pico, está sombreada con color amarillo; v es la velocidad con altura máxima de cada uno de los picos; A es el área total del histograma de eventos observados arriba de $2s_0$, lo que nos da una medida del nivel total de agrupación espacio-temporal.

2.3 La matriz de velocidades aparentes en el tiempo (MVAT) e identificación de cúmulos.

Para determinar la causa de los picos en los histogramas de velocidades aparentes, después de seleccionar algún pico y su correspondiente rango de velocidad, graficamos en el espacio $t_j \times t_i$ las velocidades v_{ij} que están dentro de dicho rango como círculos codificados por color de acuerdo a la escala de velocidades aparentes mostrada en la figura.

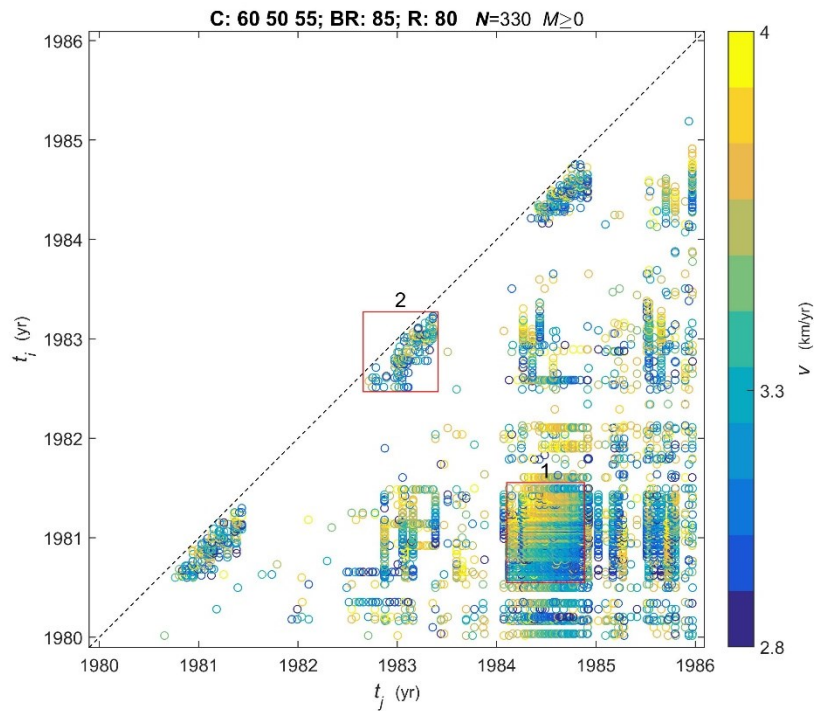


Figura 6. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo. Los grupos corresponden a velocidades de pares de eventos de cúmulos que interactúan entre sí y con eventos aleatorios.

En la matriz de velocidad aparente en el tiempo de la figura 6, que corresponde al pico de velocidad $v=3.30\text{km/yr}$ e intervalo $[v_1, v_2]=[2.8, 4]$ (figura 5) podemos identificar grupos y los tiempos t_i y t_j que los limitan. En la matriz se identifica un grupo principal 1 y tres grupos localizados cerca de la diagonal de igual tiempo de ocurrencia, es decir, tiempos cortos entre eventos que son tiempos intra-cúmulo. Las alineaciones con grosor de un punto corresponden a velocidades aparentes debidas a un punto y un cúmulo; los puntos aislados son velocidades aparentes debidas a un par de puntos aislados.

Para conocer las características de la sismicidad que da origen a los picos de las velocidades aparentes, graficamos en el espacio los eventos i y j que conforman a los grupos de la MVAT (figura 7).

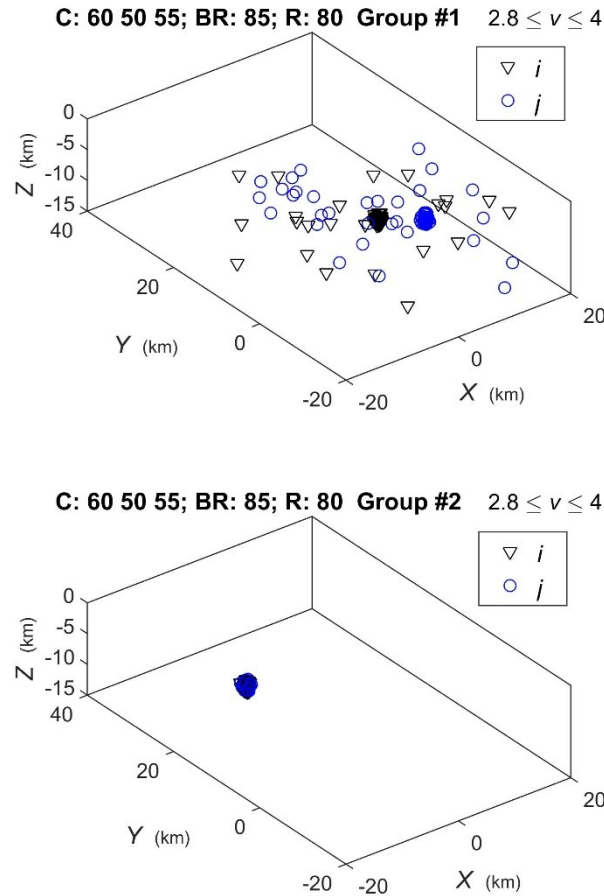


Figura 7. Arriba. Distribución de eventos que conforman el grupo 1 de la MVAT. Las velocidades del grupo corresponden al efecto de dos cúmulos, el primero con tiempos t_i indicados con triángulos invertidos y el segundo con tiempos t_j identificado con círculos azules. Abajo. Distribución de eventos que conforman el grupo 2, las velocidades corresponden a un solo cúmulo.

Capítulo 3. Resultados

Para explorar si la sismicidad real presenta picos en el histograma de velocidades aparentes que pudieran estar relacionados con la próxima ocurrencia de grandes sismos, se aplicó el método para la identificación de velocidades aparentes al estudio de los cuatro grandes sismos ($M > 7$) del catálogo del USGS para los años 1970 a 2019, localizados entre las longitudes 115°W y 118.4°W y latitudes 32°N y 36.5°N .

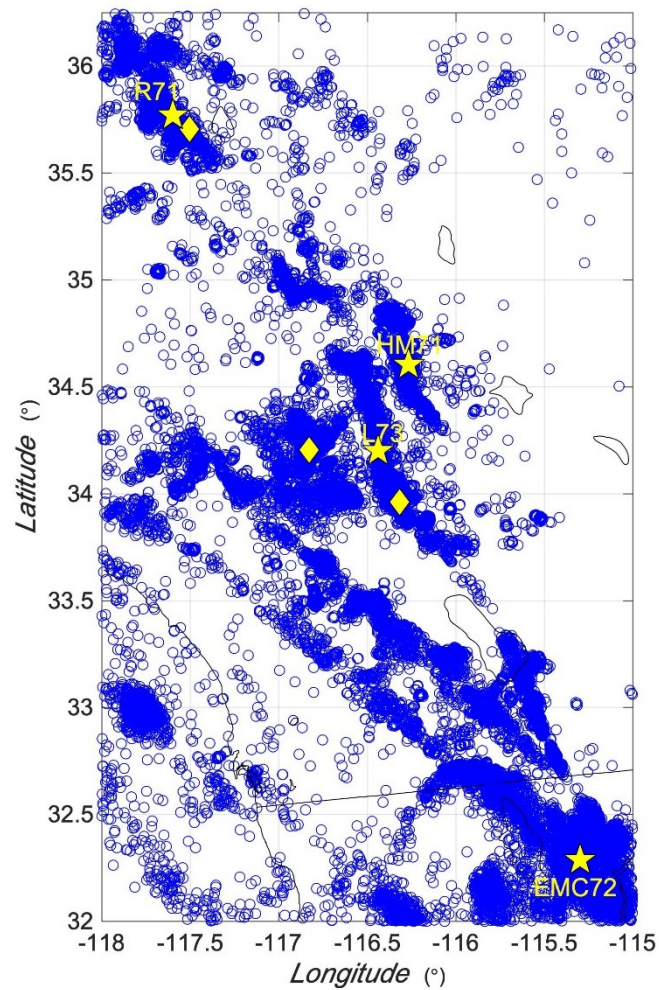


Figura 8. Epicentros del catálogo del USGS, las estrellas indican sismos con $M > 7$: L73 es el sismo de Landers con $M=7.3$, EMC72 es el sismo de El Mayor-Cucapah con $M=7.2$, HM71 es el sismo de Hector Mine con $M=7.1$ y R71 es el sismo de Ridgecrest con $M=7.1$. El diamante al SE de L73 indica el sismo de Joshua Tree con $M=6.1$ y el diamante al W indica el sismo de Big Bear con $M=6.5$ y el diamante al SE de R71 indica el sismo de Searles Valley con $M=6.4$.

La sismicidad asociada con los cuatro eventos principales mencionados anteriormente parece estar distribuida en grupos alargados. Se seleccionó sub-catálogos con hipocentros ocurridos en grupos que contienen a los eventos principales. Posteriormente para ver si era posible identificar picos de velocidad aparente y si éstos picos estaban presentes todo el tiempo o aparecían sólo antes de los grandes terremotos, se seleccionó ventanas con eventos previos y, excepto para Ridgecrest, posteriores a la ocurrencia de los sismos principales. Es preciso destacar que para realizar el análisis e identificación de velocidades aparentes las ventanas deben tener buena definición temporal y un espacio suficientemente grande como para contener cúmulos bien separados en tiempo y poder detectar así picos significativos de velocidad aparente. Después de aplicar el método para la identificación de picos de velocidades aparentes a ventanas de diferente longitud temporal, decidimos que cuatro años de duración representa un tamaño de ventana adecuado para identificar cúmulos y evitar que éstos sean separados artificialmente en diferentes ventanas. Utilizamos cuatro años de duración para las ventanas de los cuatro sismos estudiados.

3.1 Landers

El sismo más grande del catálogo es el sismo de Landers, ocurrido el 28 de junio de 1992 en longitud 116.4315°W , latitud 34.2032°N , profundidad 2.79 km y con $M_w = 7.3$, al cual nos referiremos de ahora en adelante como L73. La figura 9 (izquierda) muestra los epicentros previos al sismo L73 y al sismo de Joshua Tree ocurrido el 23 de abril de 1992 y $M_w = 6.1$, que puede considerarse como un pre-evento del sismo de Landers.

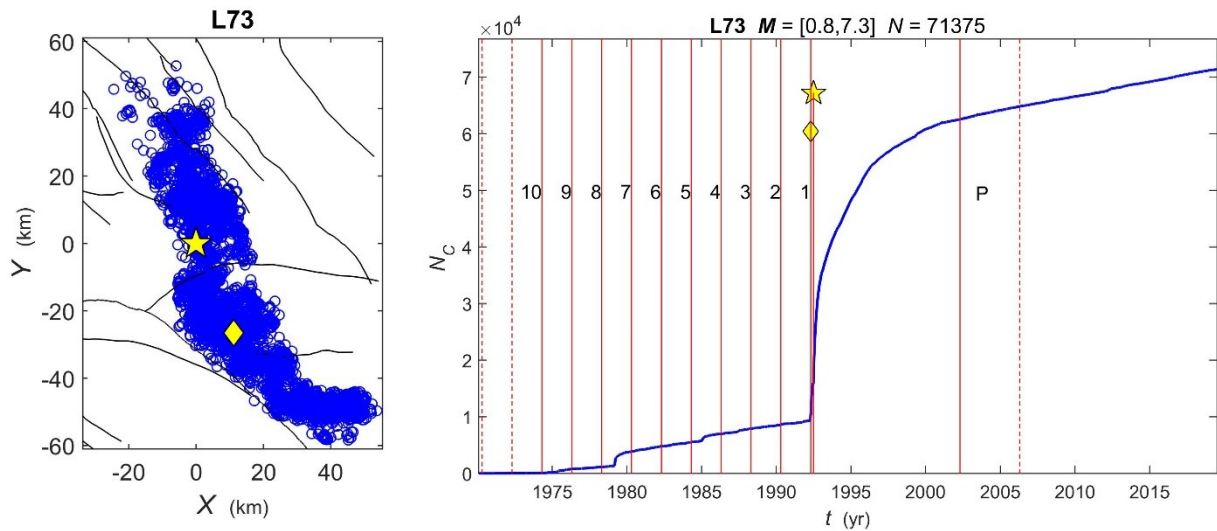


Figura 9. Izquierda: Grupo de epicentros asociados al sismo L73 ocurridos antes del sismo Joshua Tree. El sismo L73 está indicado con una estrella y Joshua Tree con un diamante. Derecha: Cumulativa del número de sismos (línea azul). Las líneas verticales indican el comienzo de cada ventana y las líneas verticales discontinuas indican los extremos correspondientes. La identificación de cada ventana se indica con un número o letra para cada ventana. La estrella y diamante indican el tiempo de ocurrencia de L73 y Joshua Tree, respectivamente.

Las ventanas de tiempo están referidas al evento principal; se eligió diez ventanas de tiempo previas al sismo L73, la primera ventana inicia justo antes de la ocurrencia del sismo de Joshua Tree. Se eligió también una ventana de tiempo posterior a la mayor actividad de réplicas del sismo L73, donde se espera que los niveles de esfuerzo sean bajos; cada ventana tiene duración de cuatro años y tienen traslape de dos años.

Para cada ventana se eligió una magnitud mínima de modo que el número de eventos estuviera en el rango de 400 a 550 sismos, lo cual ayuda a identificar con mayor precisión picos significativos en los histogramas y facilita la identificación de grupos en la matriz MVAT. Cuando el número de eventos para la magnitud mínima es menor de 400, simplemente se trabajó con el número disponible; se aplicó el mismo criterio para los otros tres sismos principales estudiados.

A continuación se muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de las ventanas del sismo L73, comenzando con la ventana 3 debido a que ésta tiene el mayor valor de A (área total del histograma de eventos observados arriba de $2s_0$) y el pico más conspicuo, por lo que será nuestra referencia para juzgar los resultados de otras ventanas.

Ventana L73-3

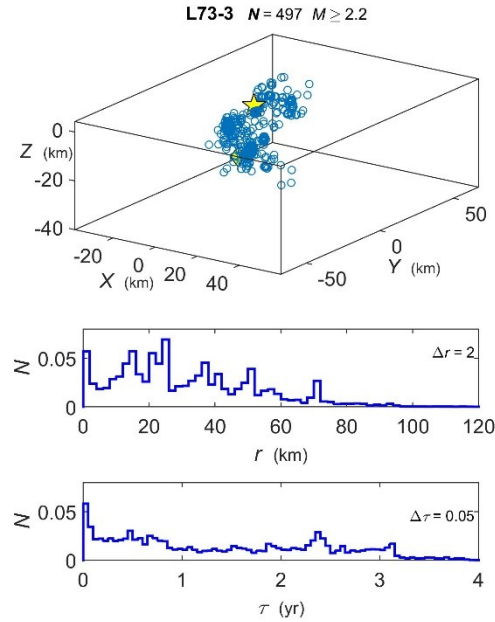


Figura 10. Distribución de hipocentros de la ventana 3 previa a L73, vista con $\text{azimut}=35^\circ$ y $\text{elevación}=18^\circ$; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La ventana 3 previa a L73 abarca cuatro años desde $t_1 = 1984.3092$ hasta $t_2 = 1988.3092$ y contiene 497 sismos con $M_w \geq 2.2$. La figura 10 muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo). Como se puede ver, las distribuciones son muy diferentes a las de los catálogos sintéticos; a simple vista no es sencillo identificar cúmulos espacio-temporales.

La figura 11 (arriba) muestra el número cumulativo de eventos de la ventana L73-3 en función del tiempo; se puede ver saltos o incrementos repentinos del número de sismos en determinados intervalos de tiempo, pero a simple vista no es posible identificar con certeza el origen de dichos saltos.

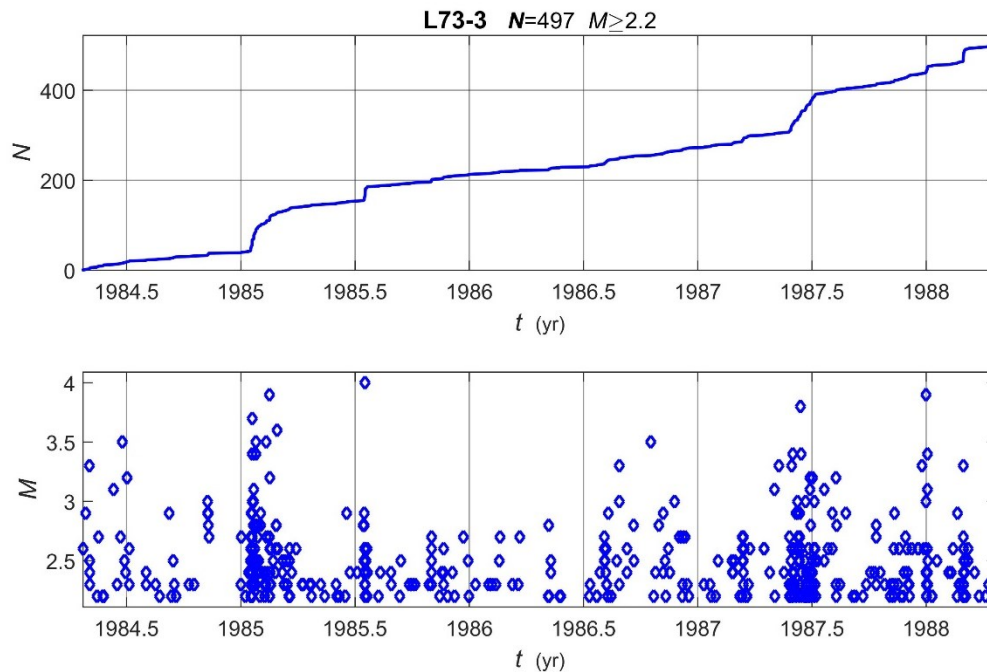


Figura 11. Arriba: Número de eventos de la ventana L73-3 en función del tiempo, se ve que a principios de 1985 hubo un incremento importante de sismicidad, el cual aparece como una curva suave y ascendente y otro incremento que inicia poco antes de 1987.5, el cual se ve como una curva con pendiente más pronunciada. Abajo: Magnitud de eventos de la ventana L73-3 en función del tiempo.

En la figura 11 (abajo) se muestra la magnitud en función del tiempo de los eventos de la ventana L73-3. Se observa que a principios de 1985 hubo un episodio de alta sismicidad, tras varios eventos ocurrió un evento con magnitud máxima, pero no mucho mayor que las demás magnitudes del episodio, y posteriormente el número de eventos y sus magnitudes decrecieron rápidamente con el tiempo; la forma de decaimiento parece coincidir con la relación empírica del decaimiento de réplicas de la ley de Omori (1894). Poco antes de 1987.5 se ve otro episodio de alta sismicidad, pero dicho episodio no decae de la misma forma que el descrito anteriormente, por lo cual ninguno de los episodios corresponde a la ocurrencia de una secuencia premonitor-evento principal-réplicas.

Se muestra en la figura 12 los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana L73-3, con las mismas convenciones usadas en la figura 5 (histograma de velocidades observado como línea azul gruesa y las otras líneas representan los histogramas *HOTS*). En la misma figura (abajo) se muestra la parte positiva de $N - \langle N_0 \rangle$.

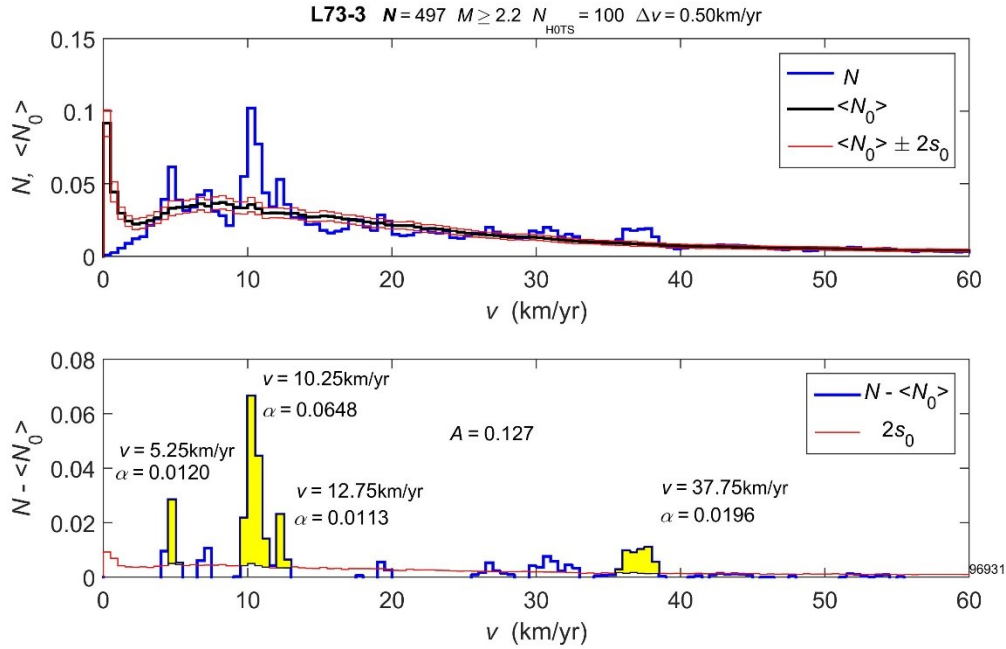


Figura 12. Arriba: histograma de velocidades aparentes de la ventana L73-3 (línea N gruesa azul), histograma de la media de 100 realizaciones de catálogos *HOTS* derivados de L73-3 (línea $\langle N_0 \rangle$ de color negro) y la media más/menos dos desviaciones estándar (líneas $\langle N_0 \rangle \pm 2s_0$ de color rojo). Abajo: histograma de velocidades aparentes de L73-3 menos la media de *HOTS* (línea $N - \langle N_0 \rangle$ gruesa azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea $2s_0$ roja); se identificó cuatro picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observados y *HOTS* están normalizados a área unitaria.

Como se observa en la figura 12 hay varios picos claramente por encima de la media más dos desviaciones estándar de *HOTS*, así como valles por debajo de la media menos dos desviaciones estándar de *HOTS*; dado que estamos interesados en concentraciones de velocidades aparentes, nos enfocamos en el análisis de los picos. Cada valor por encima de la media más dos desviaciones estándar tiene probabilidad ≤ 0.125 (T. de Chebyshev) de ocurrir al azar, únicamente debido a tiempos de ocurrencia y combinaciones de localizaciones hipocentrales aleatorias; pero, para ser más estrictos, consideramos significativos a picos con amplitudes máximas mayores de tres desviaciones estándar.

El pico que es notoriamente mayor, localizado en el rango de velocidad $[v_1, v_2] = [9.5, 11.5]$, tiene altura máxima para $v = 10.25 \text{ km/yr}$, la probabilidad de ocurrencia al azar del valor máximo del pico es $P_r = 0.000578$ y tiene $\alpha = 0.0648$ que como se mostrará más adelante, se debe a la ocurrencia de dos cúmulos que ocurrieron en la ventana de tiempo L73-3.

La figura 13 muestra la matriz de velocidad aparente para el intervalo de velocidades alrededor de $v=10.25\text{km/yr}$ del pico más alto de L73-3 (figura 12), donde identificamos de forma visual varios grupos principales, el más grande (grupo 1) localizado en $t_i=[1984.99,1985.28]$ y $t_j=[1987.37,1987.65]$, dos más pequeños (grupo 2 y 3) localizados cerca de la diagonal de igual tiempo de ocurrencia y que por tanto son mayormente velocidades intra-cúmulo. Elegimos un cuarto grupo (grupo 4), que tiene corto tiempo $t_i=[1984.66,1984.76]$ y más largo $t_j=[1987.33,1987.69]$.

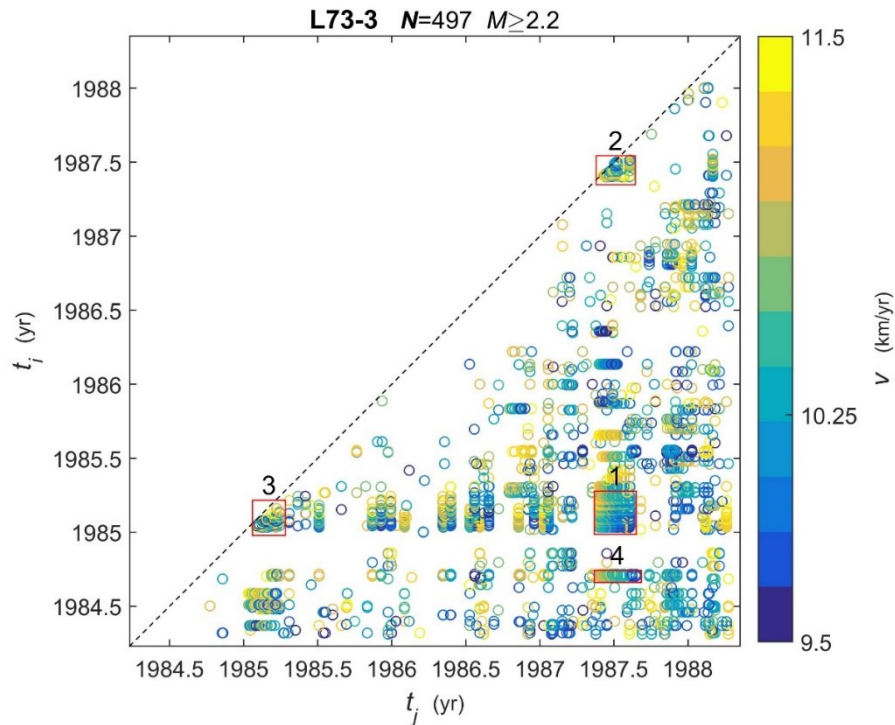


Figura 13. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo del pico con $v=10.25\text{km/yr}$ de la ventana L73-3. Se identificó cuatro grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo. Las velocidades están codificadas de acuerdo a la barra de colores de la derecha.

La figura 14 muestra la distribución espacial de los eventos i y j (representados con triángulos invertidos y círculos azules respectivamente) que conforman a los cuatro grupos de la MVAT (figura 13). Se observa que las velocidades del grupo 1 corresponden a eventos que están distribuidos principalmente en dos cúmulos. Las velocidades de los grupos 2 y 3 son intra-cúmulo; las velocidades del grupo 4 son de dos eventos que ocurrieron casi en el mismo lugar y del segundo cúmulo del grupo 1.

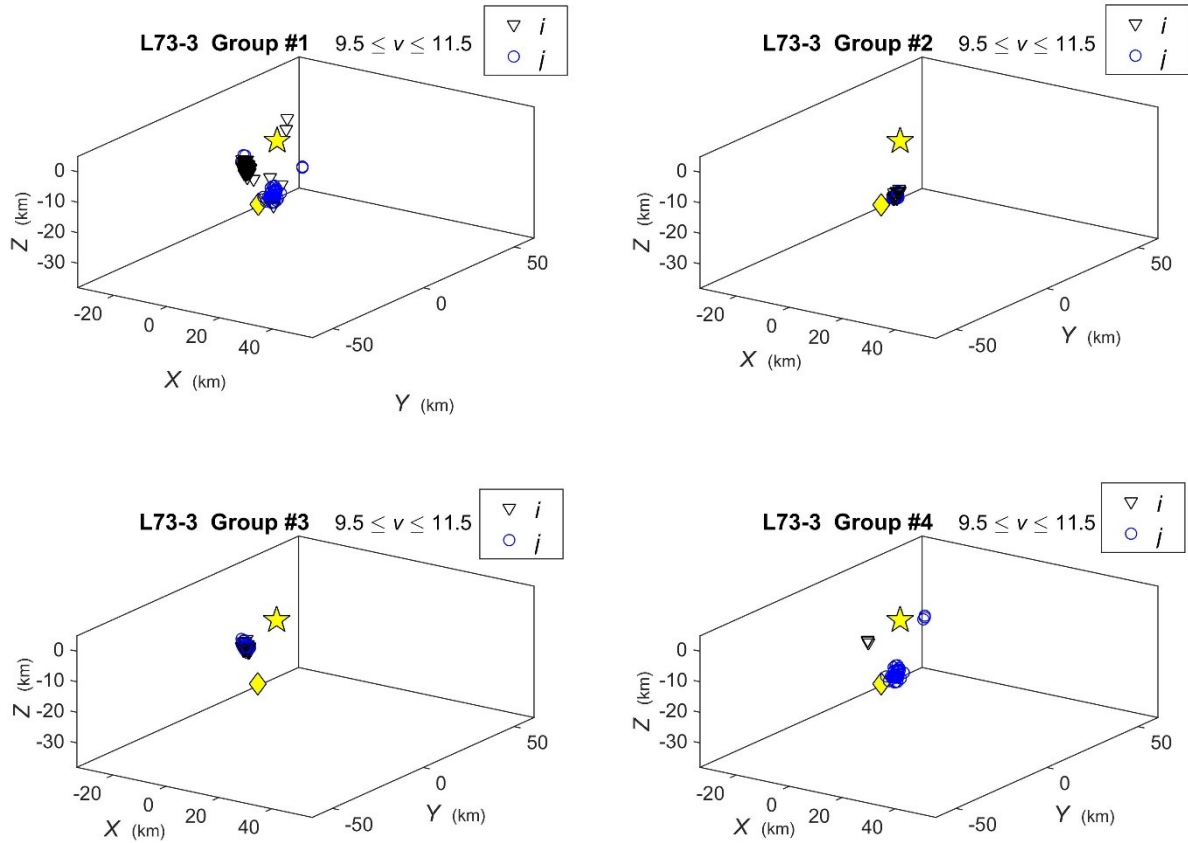


Figura 14. Distribución de eventos que conforman los cuatro grupos de la MVAT. Las velocidades del grupo 1 corresponden al efecto de dos cúmulos, el primero con tiempos t_i indicados con triángulos invertidos y el segundo con tiempos t_j identificado con círculos azules. Las velocidades de los grupos 2 y 3 corresponden a velocidades intra-cúmulo. Las velocidades del grupo 4 son de un cúmulo que interacciona con dos eventos externos tardíos. La estrella y diamante indican la localización de los sismos L73 y Joshua Tree, respectivamente.

Ventana L73-1

La ventana 1 previa a L73 abarca desde $t_1 = 1992.30920$ hasta $t_2 = 1988.30920$ y contiene 432 sismos con $M_w \geq 2.2$, se eligió la ventana de modo que no incluye al sismo de Joshua Tree ni sus réplicas ya que si hubiera habido monitoreo antes de dicho sismo, dicho monitoreo hubiera terminado al ocurrir el evento precursor de Joshua Tree. En la figura 15 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana L73-1.

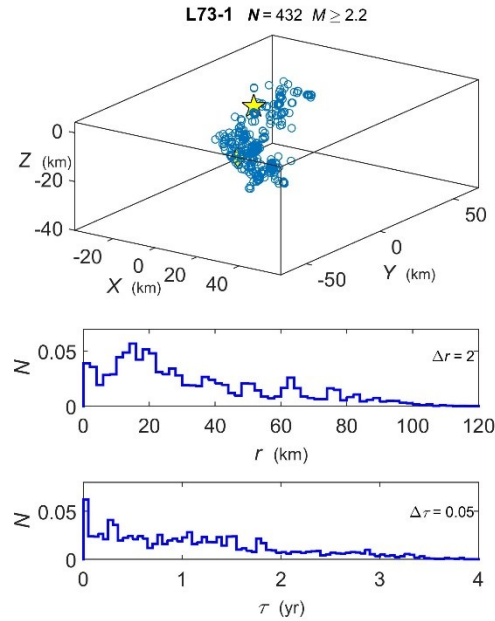


Figura 15. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a L73, vista con azimuth=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

Se muestra en la figura 16 los resultados del análisis de velocidades aparentes, la línea azul gruesa es el histograma de velocidades aparentes de los eventos de la ventana L73-1 y la línea roja corresponde al histograma $2s_0$; se identificó dos pequeños picos.

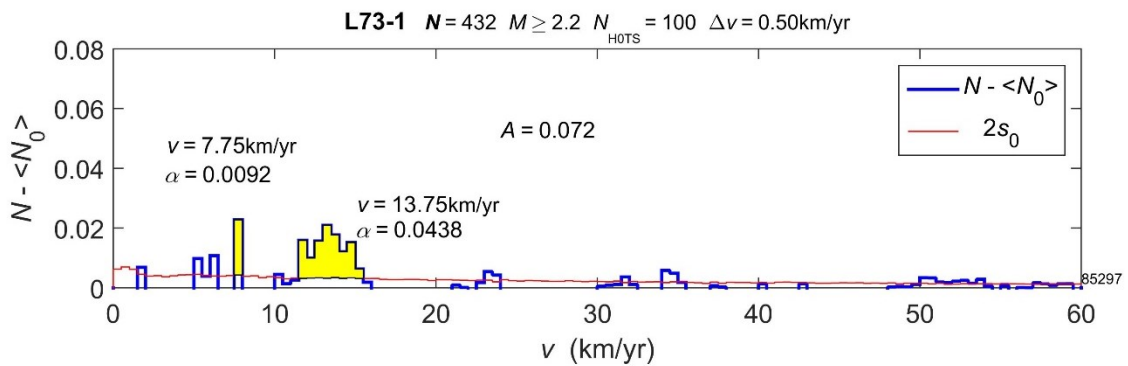


Figura 16. Histograma de velocidades de la ventana L73-1 (línea $N - \langle N_0 \rangle$ azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana L73-2

La ventana 2 previa a L73 abarca desde $t_1 = 1990.30920$ hasta $t_2 = 1986.30920$ y contiene 457 sismos con $M_w \geq 2.3$. En la figura 17 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

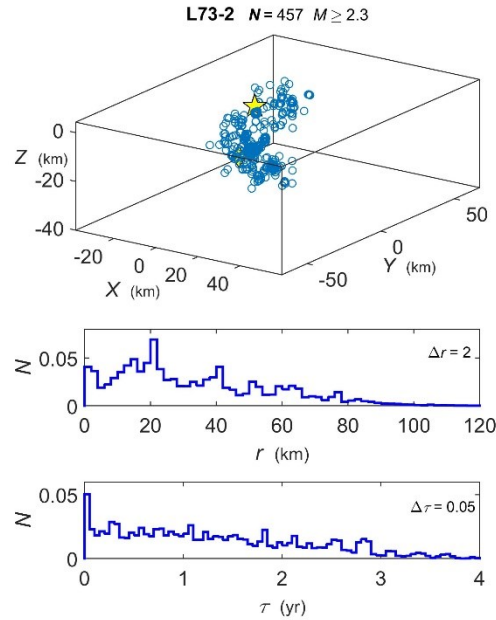


Figura 17. Distribución de hipocentros de la ventana 2 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 18 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de L73-2. Se identificó cuatro pequeños picos, el mayor con $\alpha = 0.0125$.

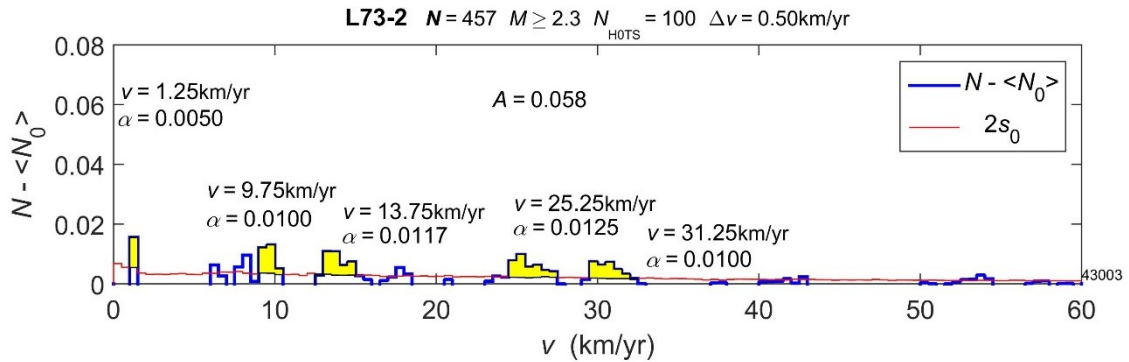


Figura 18. Histograma de velocidades de la ventana L73-2 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó cuatro picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana L73-4

La ventana 4 previa a L73 abarca desde $t_1 = 1986.30920$ hasta $t_2 = 1982.30920$ y contiene 441 sismos con $M_w \geq 2.1$. En la figura 19 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

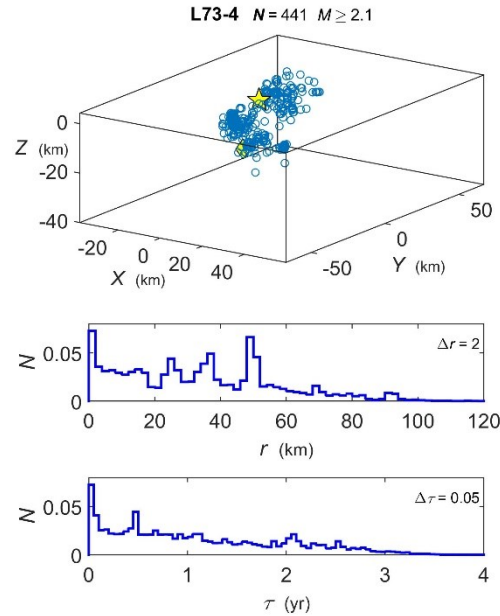


Figura 19. Distribución de hipocentros de la ventana 4 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 20 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana L73-4. Se identificó tres pequeños picos, el mayor con $\alpha = 0.0368$.

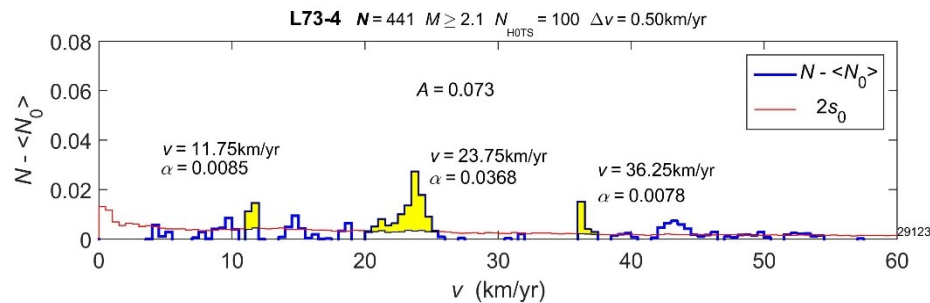


Figura 20. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana L73-4 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó tres picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana L73-5

La ventana 5 previa a L73 abarca desde $t_1 = 1984.30920$ hasta $t_2 = 1980.30920$ y contiene 449 sismos con $M_w \geq 1.9$. En la figura 21 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

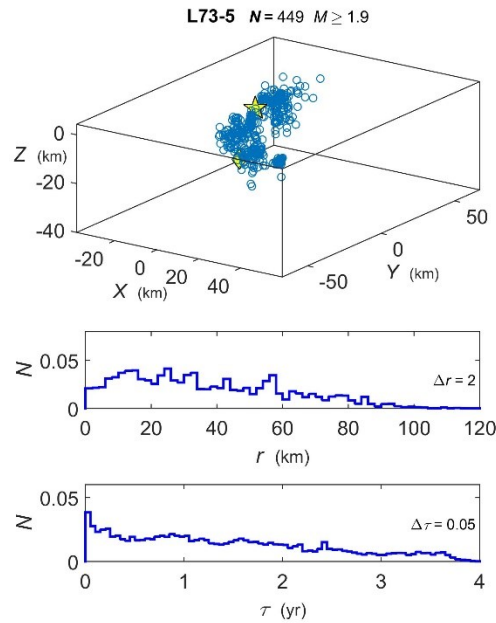


Figura 21. Distribución de hipocentros de la ventana 5 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 22 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana L73-5. Se muestra un pequeño pico que no es significativo, que tiene área mucho menor al área del mayor pico de L73-3.

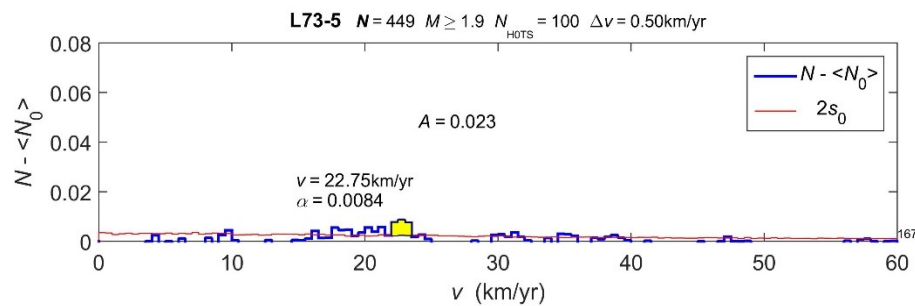


Figura 22. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana L73-5 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar, el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana L73-6

La ventana 6 previa a L73 abarca desde $t_1 = 1982.30920$ hasta $t_2 = 1978.30920$ y contiene 508 sismos con $M_w \geq 2.2$. En la figura 23 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

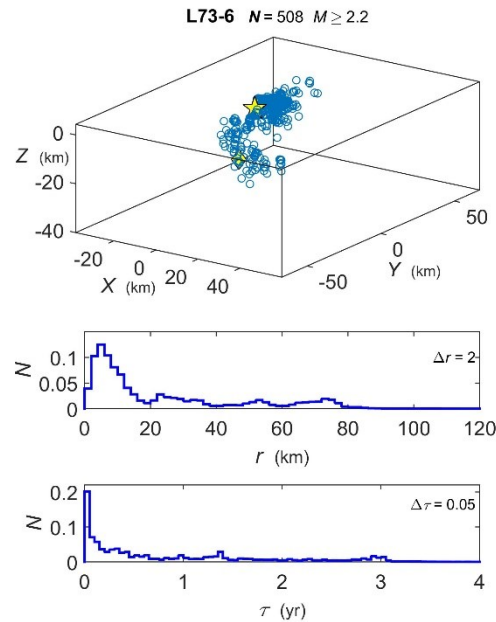


Figura 23. Distribución de hipocentros de la ventana 6 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 24 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana L73-6; se identificó tres picos significativos, el mayor con $\alpha = 0.0383$.

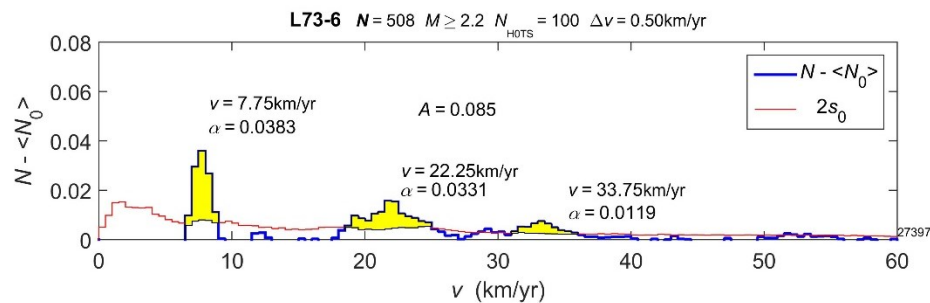


Figura 24. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana L73-6 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó tres picos significativo que está arriba de dos desviaciones estándar, el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

La figura 25 muestra la matriz de velocidad aparente en el tiempo del pico más alto de L73-6 con $v = 7.75 \text{ km/yr}$ y $\alpha = 0.0383$ y $[v_1, v_2] = [6.5, 9]$ (figura 24) donde identificamos varios grupos principales pero seleccionamos únicamente los dos grupos con mayor concentración de velocidades.

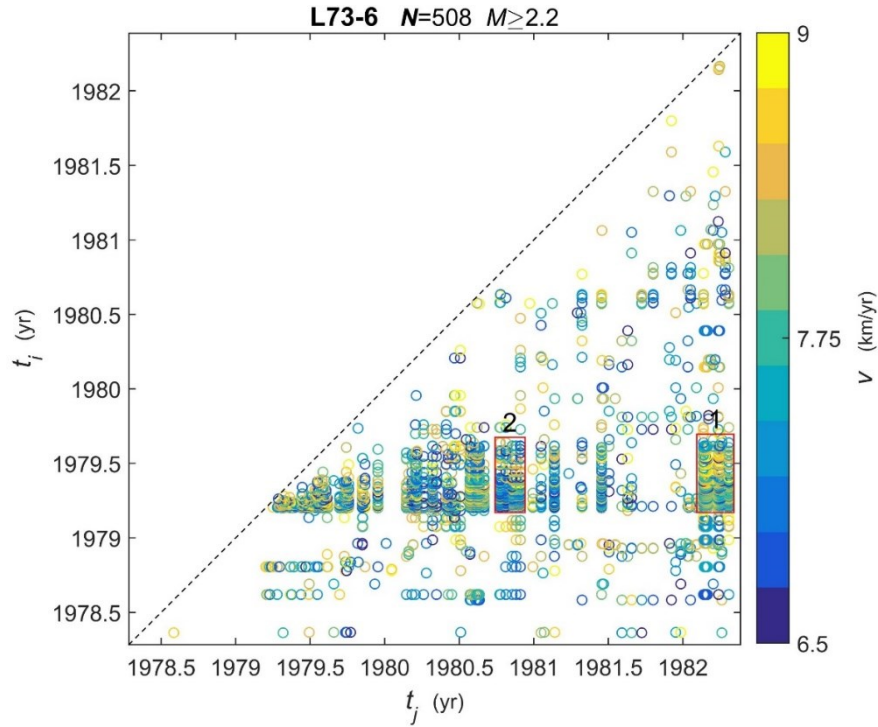


Figura 25. Matriz de velocidades aparente en el tiempo del pico con $\alpha = 0.038$ de la ventana L73-6. Se identificó dos grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo.

El grupo 1 (figura 25) está localizado en $t_i = [1979.17, 1979.70]$ y $t_j = [1982.09, 1982.34]$ y el grupo 2 en $t_i = [1979.17, 1979.68]$ y $t_j = [1980.74, 1980.94]$. La figura 26 muestra la distribución espacial de los eventos que conforman a los dos grupos de la MVAT (figura 25). Las velocidades de los grupos 1 y 2 son de eventos distribuidos en dos cúmulos cercanos espacialmente.

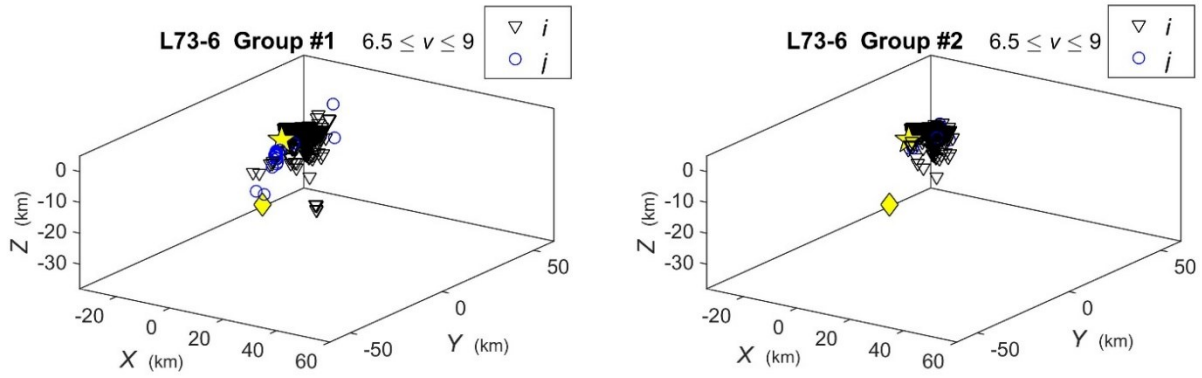


Figura 26. Distribución de eventos que conforman los dos grupos de la MVAT (figura 25). Las velocidades de los grupos 1 y 2 son de cúmulos cercanos espacialmente. La estrella y diamante indican la localización de los sismos L73 y Joshua Tree, respectivamente.

Ventana L73-7

La ventana 7 previa a L73 abarca desde $t_1 = 1980.30920$ hasta $t_2 = 1976.30920$ y contiene 484 sismos con $M_w \geq 2.2$. En la figura 27 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

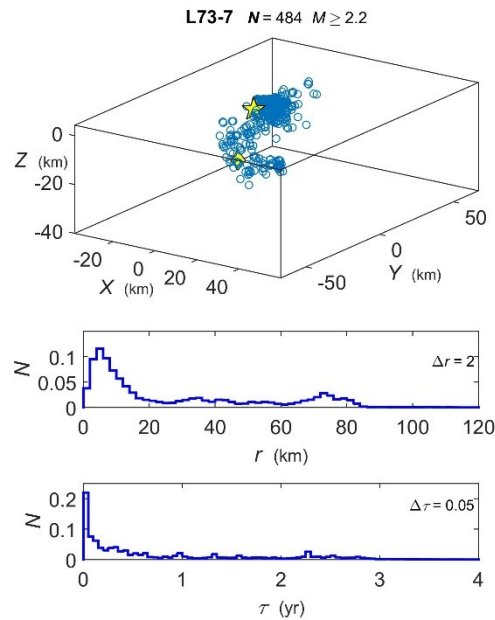


Figura 27. Distribución de hipocentros de la ventana 7 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=18°; se indica la ubicación del sismo L73 con una estrella de color amarillo y de Joshua Tree con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 28 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana L73-7. Se identificó cuatro pequeños picos, el mayor con $\alpha = 0.0478$.

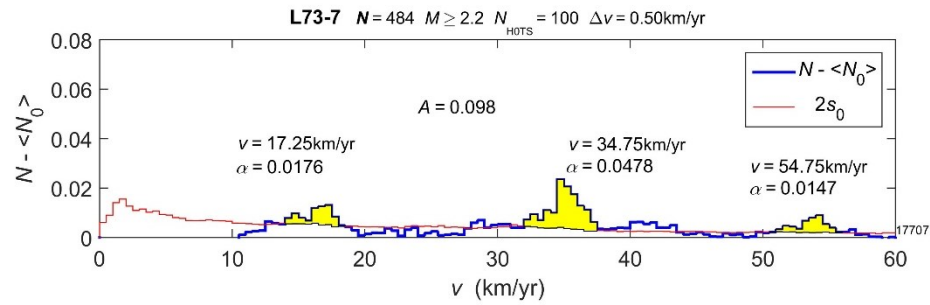


Figura 28. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana L73-7 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó tres picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar, los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventanas L73-8, 9 y 10

La figura 29 muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de las ventanas 8, 9 y 10 previas al sismo L73, donde no identificamos picos significativos

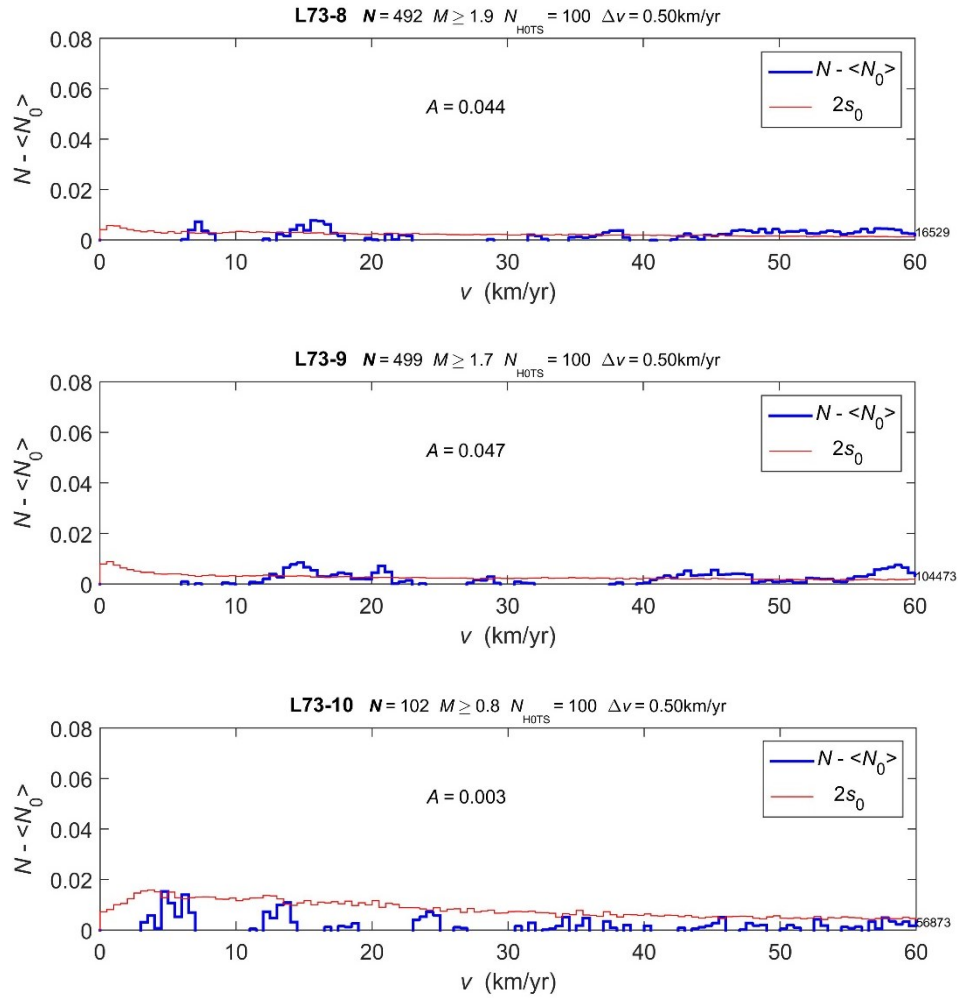


Figura 29. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de las ventanas 8, 9 y 10 previas a L73 y distribuciones $2s_0$ de HOTS; en ninguna de las ventanas se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Los histogramas, observados y $2s_0$ están normalizados a área unitaria.

Ventana L73P

La figura 30 muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de la ventana L73P posterior al sismo L73, donde no identificamos picos significativos que indiquen la posible ocurrencia de cúmulos.

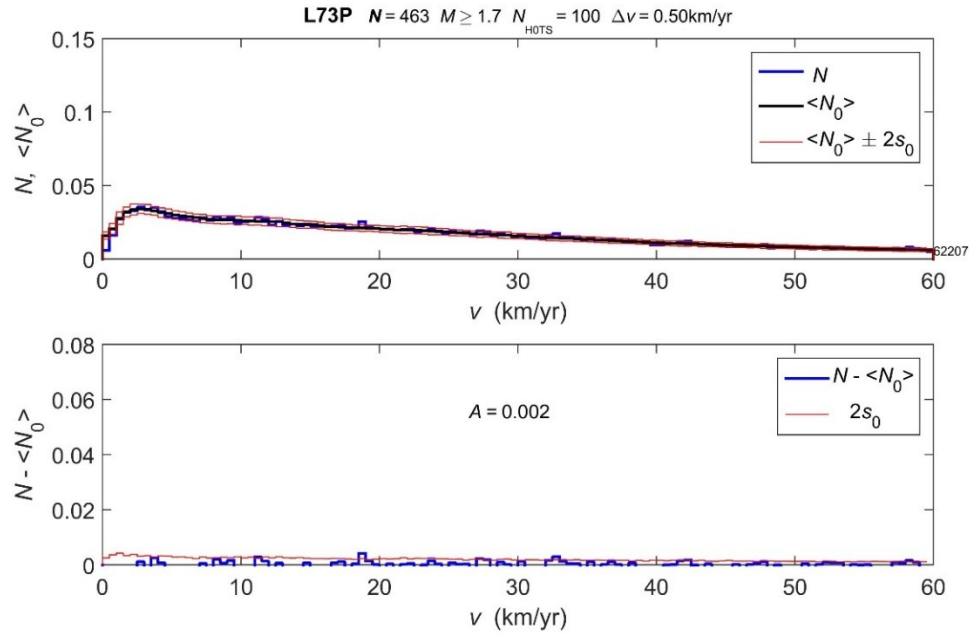


Figura 30. Histograma de velocidades de la ventana L73P (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); no se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observados y HOTS están normalizados a área unitaria.

A continuación se muestra una tabla con la información de área A arriba de dos desviaciones estándar, área del pico máximo $\alpha_{\max}$, magnitud mínima y número de eventos de cada ventana asociada al sismo L73.

Tabla 1. Información de A , α , magnitud mínima y número de eventos N de las diez ventanas previas y la ventana P posterior al sismo L73. Los valores de área muy pequeños y cercanos a cero se indican con líneas punteadas. Números de eventos demasiado bajos son indicados con letra itálica.

W	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	P
A	0.003	0.047	0.044	0.098	0.085	0.023	0.073	0.127	0.058	0.072	0.002
$\alpha_{\max}$	--	--	--	0.0478	0.0383	--	0.0368	0.0648	0.0125	0.0438	--
$M \geq$	0.8	1.7	1.9	2.2	2.2	1.9	2.1	2.2	2.3	2.2	1.7
N	102	499	492	484	508	449	441	497	457	432	463

3.2 Hector Mine

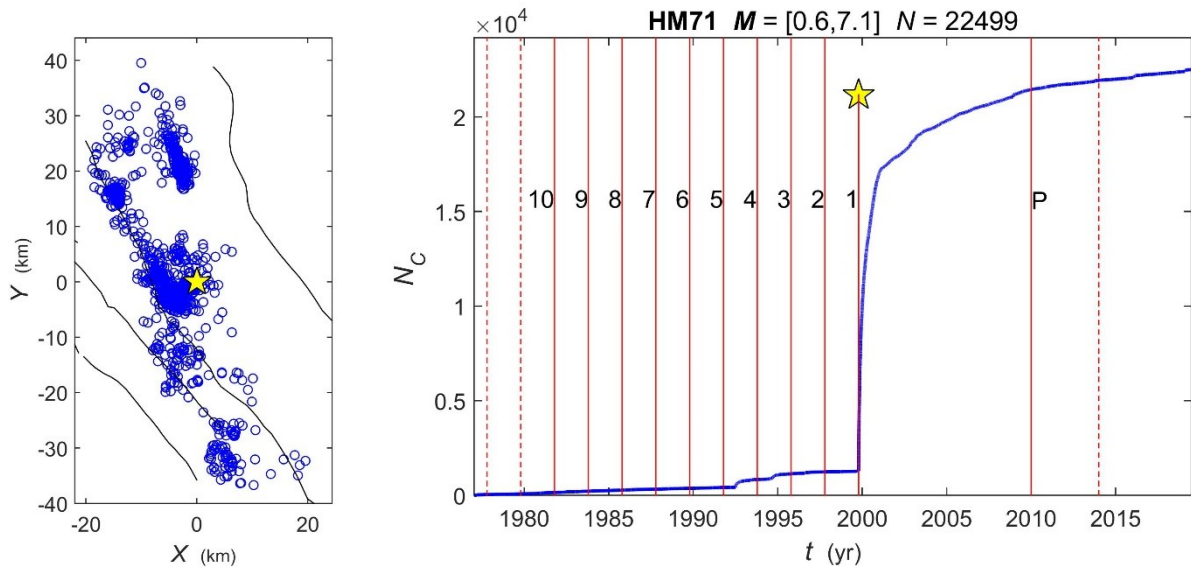


Figura 31. Izquierda: Grupo de epicentros previos asociados al sismo HM71 que está indicado con una estrella. Derecha: Cumulativa del número de sismos (línea azul), las líneas verticales indican el comienzo de cada ventana y las líneas verticales discontinuas indican los extremos correspondientes. La identificación de cada ventana se indica con un número o letra para cada ventana. La estrella indica el tiempo de ocurrencia de HM71.

El sismo de Hector Mine, ocurrió el 16 de octubre de 1999 en longitud 116.265°W , latitud 34.603°N , profundidad 13.73 km y $M_w = 7.1$; nos referiremos a este sismo de ahora en adelante como HM71. La figura 31 (izquierda) muestra los epicentros previos al sismo HM71. Se eligió diez ventanas de tiempo previas y una ventana de tiempo posterior a la mayor actividad de réplicas del sismo HM71, donde se espera que los niveles de esfuerzo sean bajos; cada ventana tiene duración de cuatro años y tiene traslape de dos años.

A continuación se muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de las ventanas del sismo HM71, comenzando con la ventana 3 debido a que ésta tiene el mayor valor de A , por lo que será nuestra referencia para juzgar los resultados de otras ventanas.

Ventana HM71-3

La ventana 3 previa a HM71 abarca cuatro años desde $t_1 = 1995.790$ hasta $t_2 = 1991.790$ y contiene 477 sismos con $M_w \geq 1.7$. La figura 32 muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

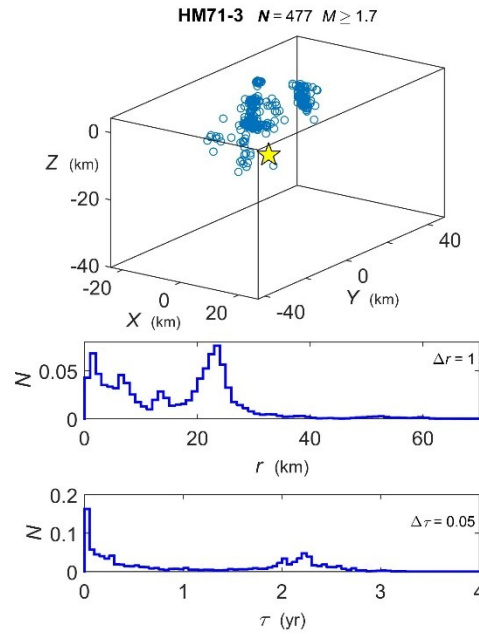


Figura 32. Distribución de hipocentros de la ventana 3 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

Se muestra en la figura 33 el resultado del análisis de velocidades de la ventana HM71-3; la línea azul gruesa es el histograma de velocidades de eventos observados y la línea roja corresponde al histograma $2s_0$ descrito anteriormente.

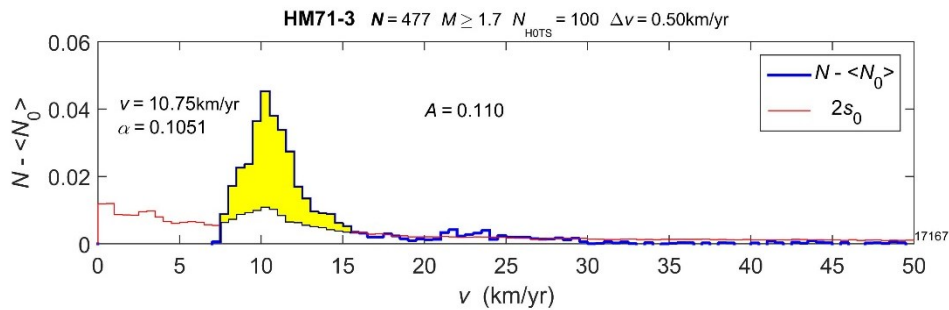


Figura 33. Histograma de velocidades de la ventana HM71-3 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS ($2s_0$ línea roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

El pico en la figura 33 es demasiado grande como para aparecer únicamente debido a tiempos de ocurrencia y combinaciones de localizaciones hipocentrales aleatorias. El pico localizado en el rango de velocidad $[v_1, v_2] = [7.5, 14.0]$, tiene altura máxima para $v = 10.75 \text{ km/yr}$, la probabilidad de ocurrencia al

azar del valor máximo del pico es $P_r = 0.006265$ y tiene área $\alpha = 0.1051$ debido al efecto de dos cúmulos que ocurrieron en la ventana de tiempo HM71-3.

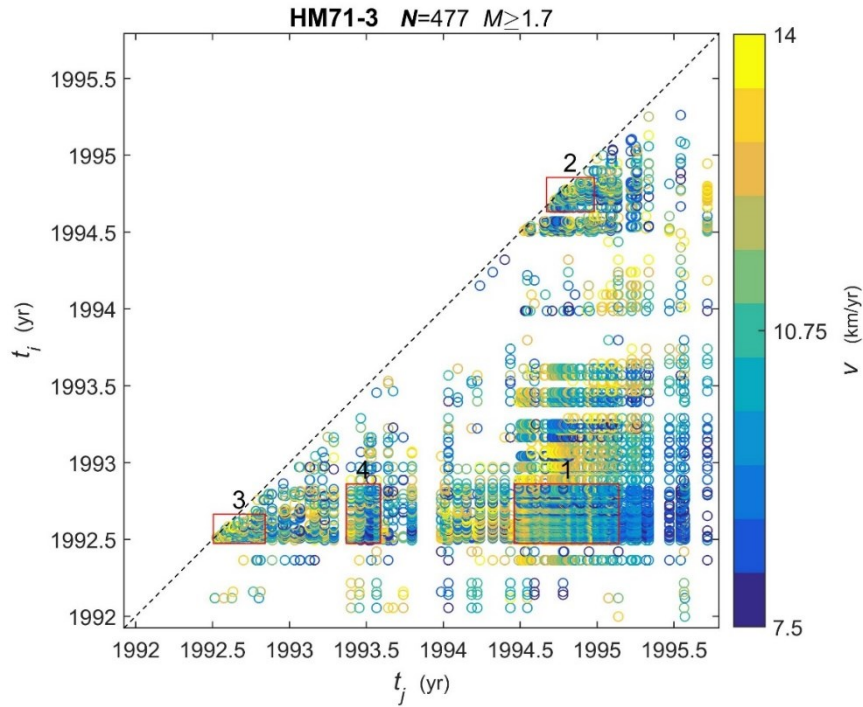


Figura 34. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo del pico con $v = 10.75 \text{ km/yr}$ de la ventana HM71-3. Se identificó cuatro grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo.

La figura 34 muestra la matriz de velocidad aparente en el tiempo para las velocidades alrededor de $v = 10.75 \text{ km/yr}$ del pico más alto de HM71-3 (figura 33), donde identificamos varios grupos principales, el más grande (grupo 1) localizado en $t_i = [1992.473, 1992.861]$ y $t_j = [1994.461, 1995.141]$, dos más pequeños (grupo 2 y 3) localizados cerca de la diagonal de igual tiempo de ocurrencia y que por tanto tienen alta probabilidad de ser velocidades intra-cúmulo. Elegimos un cuarto grupo (grupo 4), que tiene tiempo $t_i = [1992.47, 1992.86]$ y $t_j = [1993.37, 1993.59]$.

La figura 35 muestra la distribución espacial de los eventos i y j que conforman a los cuatro grupos de la MVAT (figura 34). Las velocidades del grupo 1 corresponden a eventos que están distribuidos principalmente en dos cúmulos.

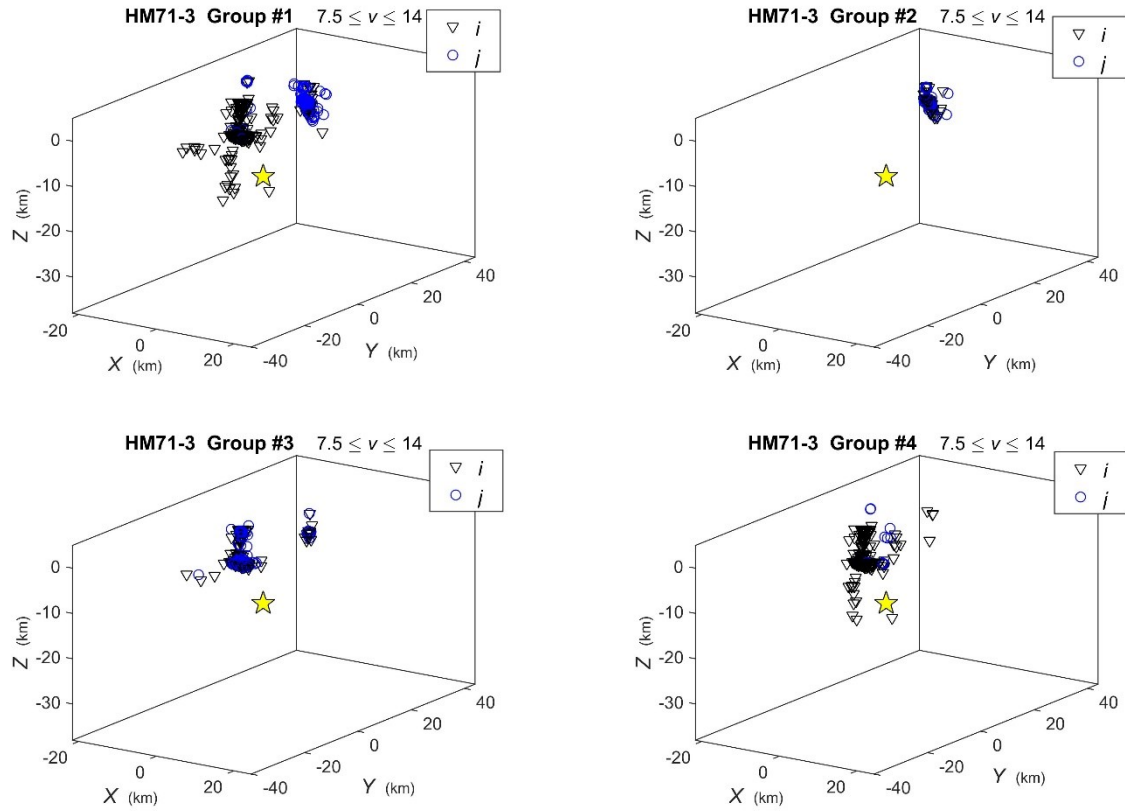


Figura 35. Distribución de eventos que conforman los cuatro grupos de la MVAT (figura 34). Las velocidades del grupo 1 corresponden al efecto de dos cúmulos. Las velocidades del grupo 2 corresponden a velocidades intra-cúmulo. Las velocidades del grupo 3 y 4 son de cúmulos individuales que interaccionan con algunos eventos externos; la estrella indica la localización del sismo HM71.

Ventana HM71-1

La ventana 1 previa a HM71 abarca desde $t_1 = 1999.790$ hasta $t_2 = 1995.790$ y contiene 165 sismos con $M_w \geq 0.9$. En la figura 36 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana HM71-1.

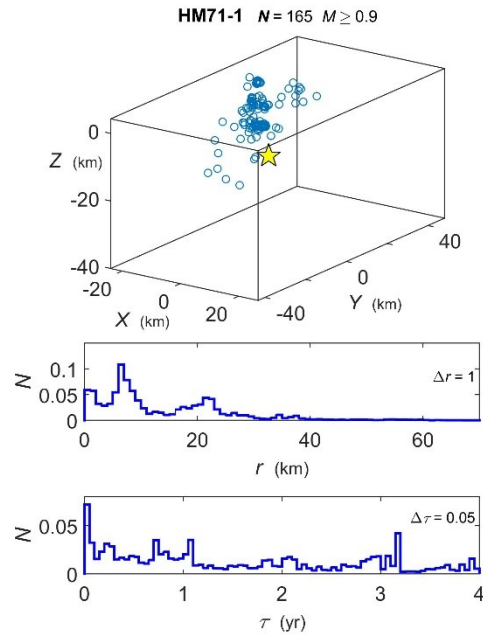


Figura 36. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

Se muestra en la figura 37 los resultados del análisis de velocidades aparentes, la línea azul gruesa es el histograma de velocidades aparentes los eventos de la ventana HM71-1 y la línea roja corresponde al histograma $2s_0$; se identificó dos pequeños picos.

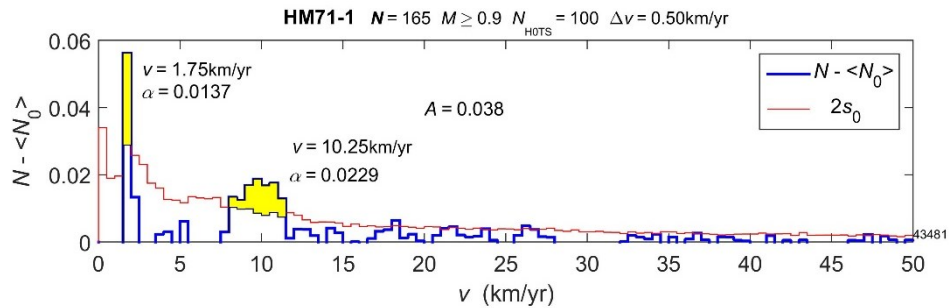


Figura 37. Histograma de velocidades de la ventana HM71-1 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana HM71-2

La ventana 2 previa a HM71 abarca desde $t_1 = 1997.7901$ hasta $t_2 = 1993.7901$ y contiene 403 sismos con $M_w \geq 0.7$. En la figura 38 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

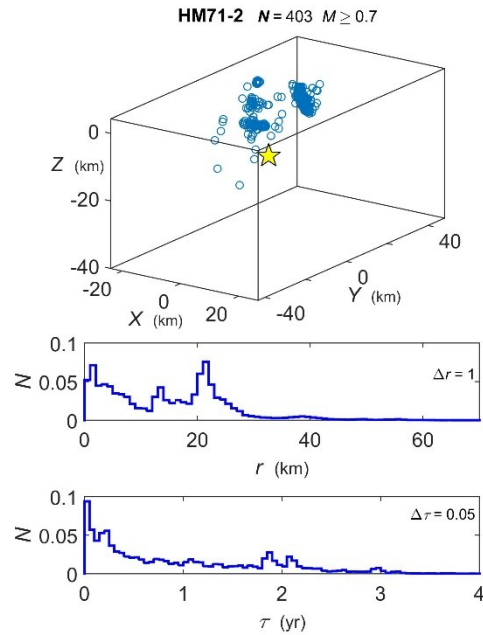


Figura 38. Distribución de hipocentros de la ventana 2 previa a L73, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

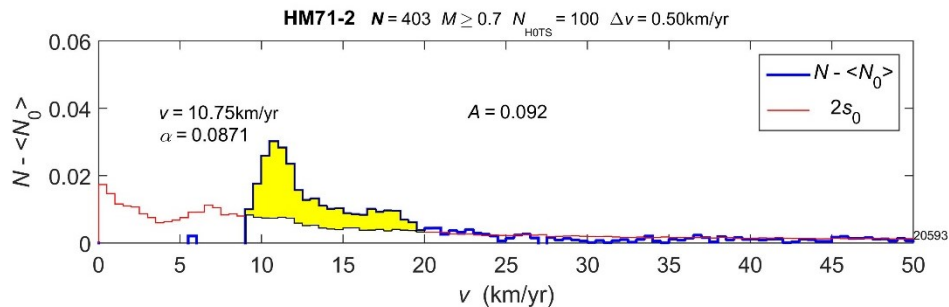


Figura 39. Histograma de velocidades de la ventana HM71-2 (línea azul) y distribución $2\sigma_0$ de HOTS (línea $2\sigma_0$ roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2\sigma_0$, están normalizados a área unitaria.

La figura 39 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de HM72-2. Se identificó un pico con $\alpha=0.0871$. El pico tiene base muy ancha y asimétrica que indica que está constituido por al menos dos picos con velocidades parecidas, que corresponden al efecto de dos cúmulos.

Ventana HM71-4

La ventana 4 previa a HM71 abarca desde $t_1=1993.7901$ hasta $t_2=1989.7901$ y contiene 469 sismos con $M_w \geq 1$. En la figura 40 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

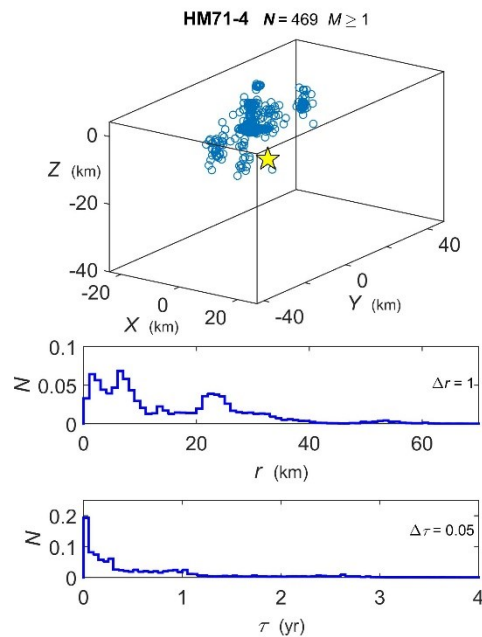


Figura 40. Distribución de hipocentros de la ventana 4 previa a HM71, vista con azimuth=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 41 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana L73-4. Se identificó un pico ancho con $\alpha=0.0437$. Este pico es producto de cúmulos cercanos en el tiempo.

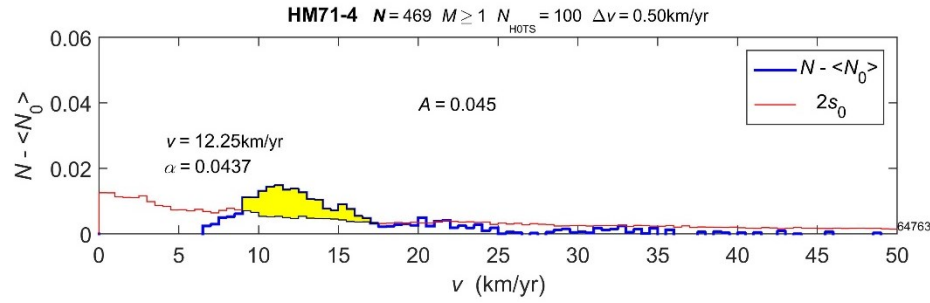


Figura 41. Histograma de velocidades de la ventana HM71-4 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana HM71-5

La ventana 5 previa a HM71 abarca desde $t_1 = 1991.7901$ hasta $t_2 = 1987.7901$ y contiene escasos 89 sismos con $M_w \geq 1.3$. En la figura 42 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

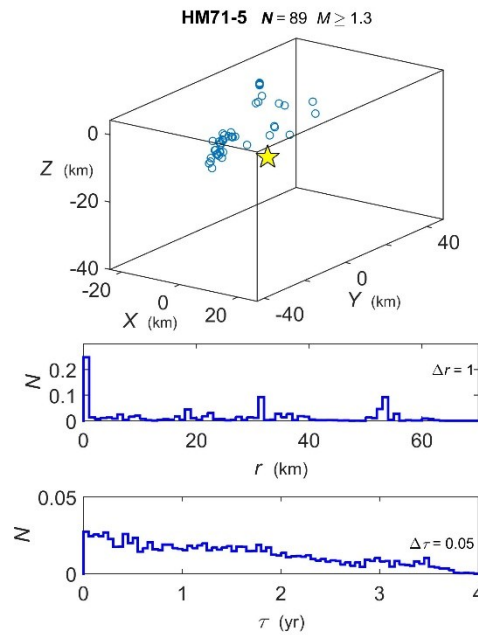


Figura 42. Distribución de hipocentros de la ventana 5 previa a HM71, vista con azimut=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 43 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana HM71-5. Se identificó un pequeño pico arriba de $2s_0$.

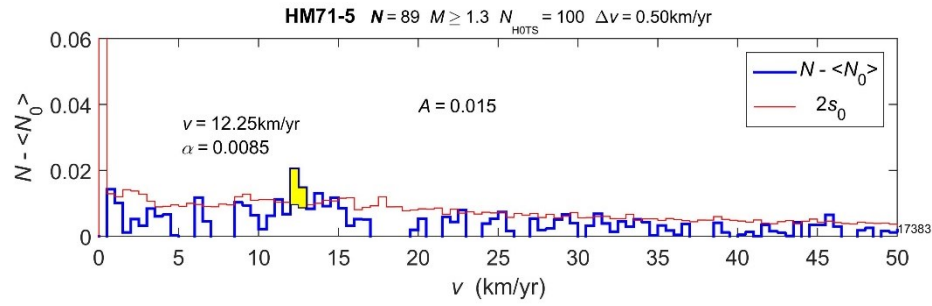


Figura 43. Histograma de velocidades de la ventana HM71-5 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico pequeño que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana HM71-6

La ventana 6 previa a L73 abarca desde $t_1 = 1989.7901$ hasta $t_2 = 1985.7901$ y contiene 97 sismos con $M_w \geq 1.3$. En la figura 44 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

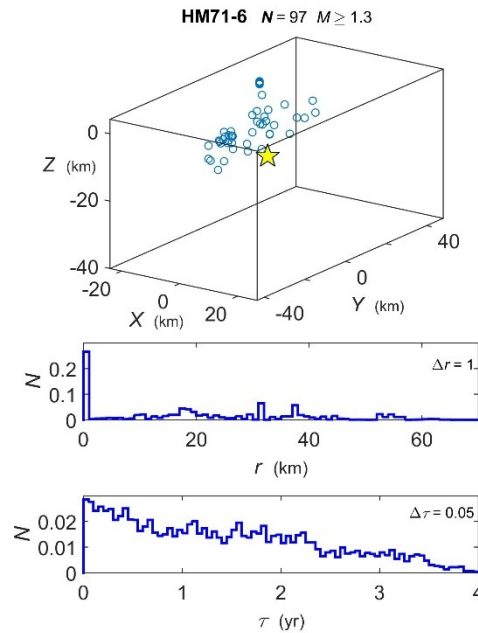


Figura 44. Distribución de hipocentros de la ventana 6 previa a HM71, vista con azimuth=35° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 45 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana HM71-6; se identificó un pequeño pico arriba de $2s_0$.

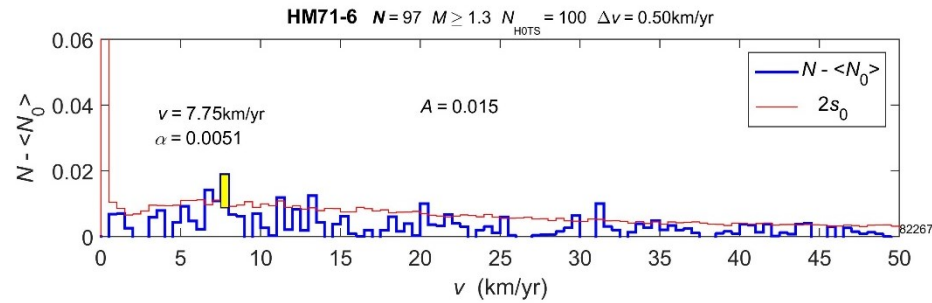


Figura 45. Histograma de velocidades de la ventana HM71-6 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); se identificó tres picos pequeños que están arriba de dos desviaciones estándar, los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana HM71-7

La ventana 7 previa a HM71 abarca desde $t_1 = 1987.7901$ hasta $t_2 = 1983.7901$ y contiene 112 sismos con $M_w \geq 1.3$. En la figura 46 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

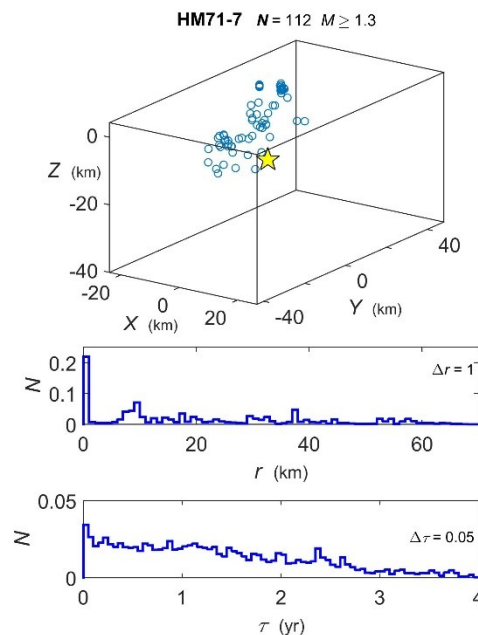


Figura 46. Distribución de hipocentros de la ventana 7 previa a HM71, vista con $\text{azimut}=35^\circ$ y $\text{elevación}=16^\circ$; se indica la ubicación del sismo HM71 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 47 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana L73-7. Se identificó dos pequeños picos arriba de $2s_0$.

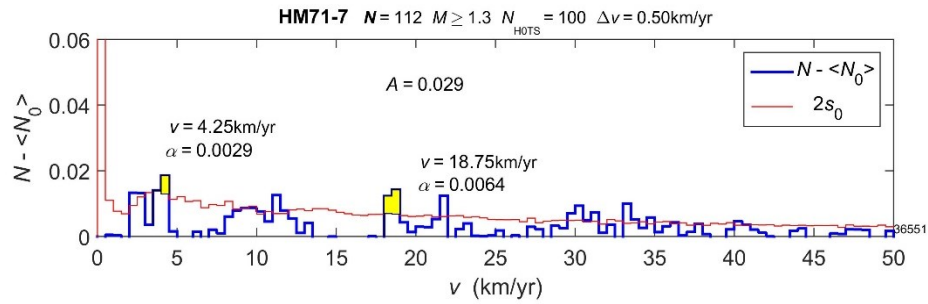


Figura 47. Histograma de velocidades de la ventana HM71-7 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó tres picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar, los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventanas HM71-8, 9 y 10

La figura 48 muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de las ventanas 8, 9 y 10 previas al sismo HM71, donde no identificamos picos significativos.

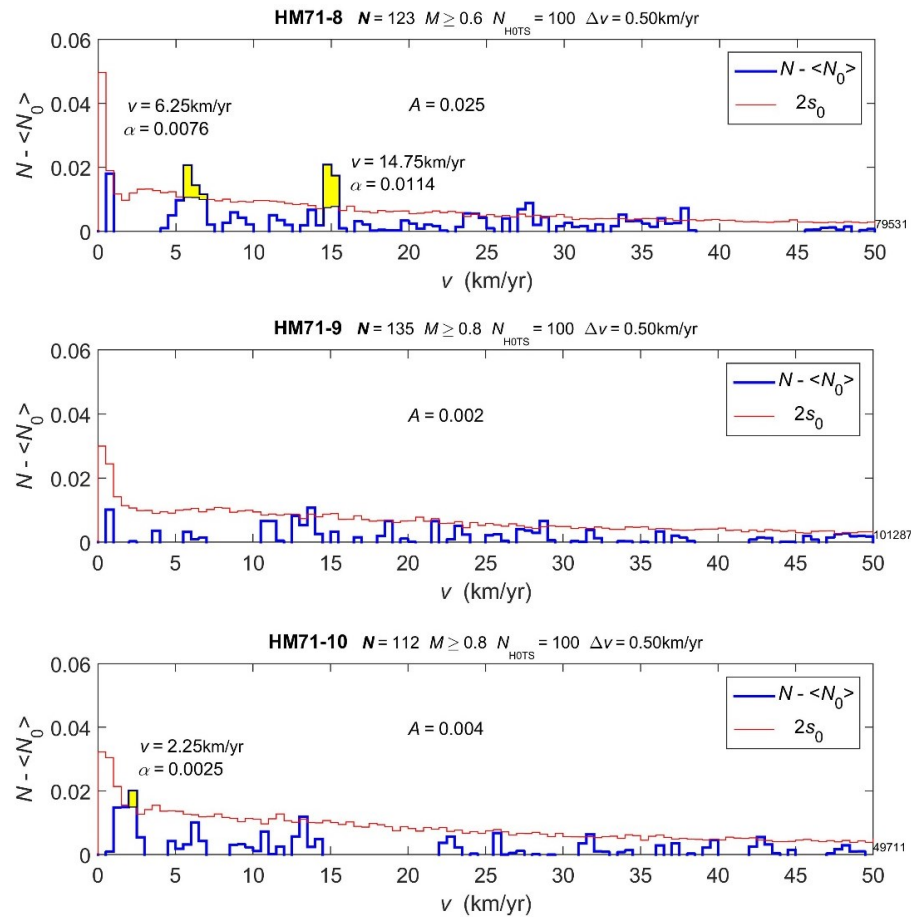


Figura 48. Histogramas de velocidades de las ventanas 8, 9 y 10 previas a HM71 (línea azul) y distribuciones $2s_0$ de HOTS; en ninguna de las ventanas se identificó picos significativos. Los histogramas, observados y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana HM71P

La figura 49 muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de la ventana HM71P posterior al sismo HM71, donde no identificamos picos significativos que indiquen la posible ocurrencia de cúmulos.

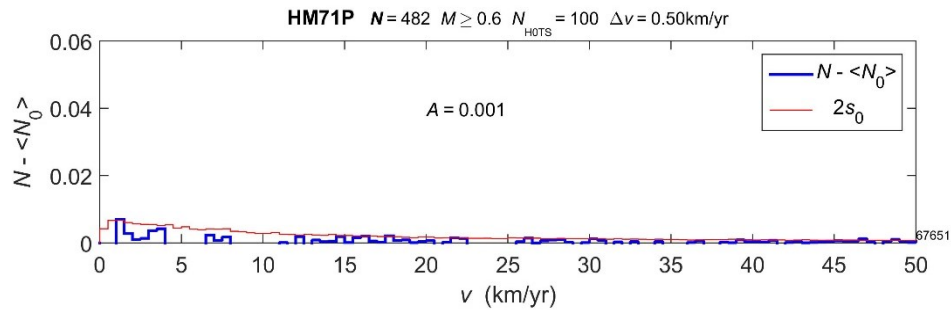


Figura 49. Histograma de velocidades de la ventana HM71P (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); no se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observados y HOTS están normalizados a área unitaria.

A continuación se muestra una tabla con la información de área A arriba de dos desviaciones estándar, área del pico máximo α_{max} , magnitud mínima y número de eventos de cada ventana asociada al sismo HM71.

Tabla 2. Información de A , α , magnitud mínima y número de eventos N de las diez ventanas previas y la ventana P posterior al sismo HM71. Los valores de área muy pequeños y cercanos a cero se indican con líneas punteadas.

W	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	P
A	0.004	0.002	0.025	0.029	0.015	0.015	0.045	0.11	0.092	0.038	0.001
α_{max}	0.003	--	0.011	0.006	0.005	0.0085	0.0437	0.105	0.0871	0.0229	--
$M \geq$	0.8	0.8	0.6	1.3	1.3	1.3	1.0	1.7	0.7	0.9	0.6
N	112	135	123	112	97	89	469	477	403	165	482

3.3 El Mayor-Cucapah

El sismo del Mayor-Cucapah, ocurrió el 4 de abril de 2010 en longitud 115.295°W , latitud 32.286°N , profundidad 9.99 km y $M_w = 7.2$; nos referiremos a este sismo de ahora en adelante como EMC72. La figura 50 (izquierda) muestra los epicentros previos al sismo EMC72. Se eligió diez ventanas de tiempo previas y una ventana de tiempo posterior a la mayor actividad de réplicas del sismo EMC72, donde se espera que los niveles de esfuerzo sean bajos. Cada ventana tiene duración de cuatro años y tienen traslape de dos años.

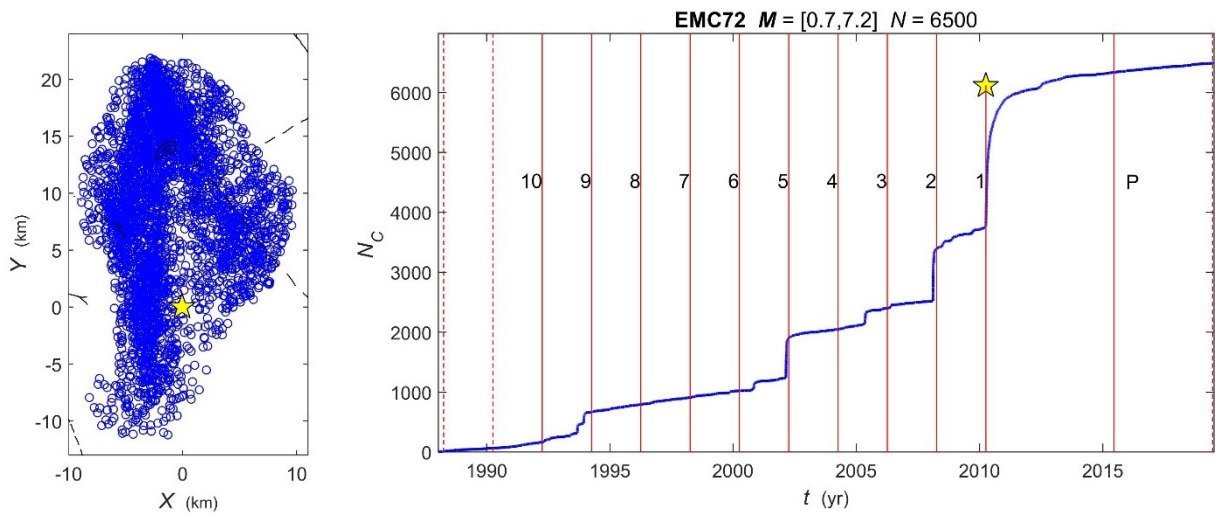


Figura 50. Izquierda: Grupo de epicentros previos al sismo EMC72 el cual se indica con una estrella. Derecha: Cumulativa del número de sismos (línea azul). Las líneas verticales indican el comienzo de cada ventana y las líneas verticales discontinuas indican los extremos correspondientes. La identificación de cada ventana se indica con un número o letra. La estrella indica el tiempo de ocurrencia de EMC72.

A continuación se muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de las ventanas del sismo EMC72, la ventana 1 tiene el mayor valor de A y será nuestra referencia para juzgar los resultados de otras ventanas.

Ventana EMC72-1

La ventana 1 previa a EMC72 abarca cuatro años desde $t_1 = 2010.2573$ hasta $t_2 = 2006.2573$ y contiene 479 sismos con $M_w \geq 2.4$. La figura 51 muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

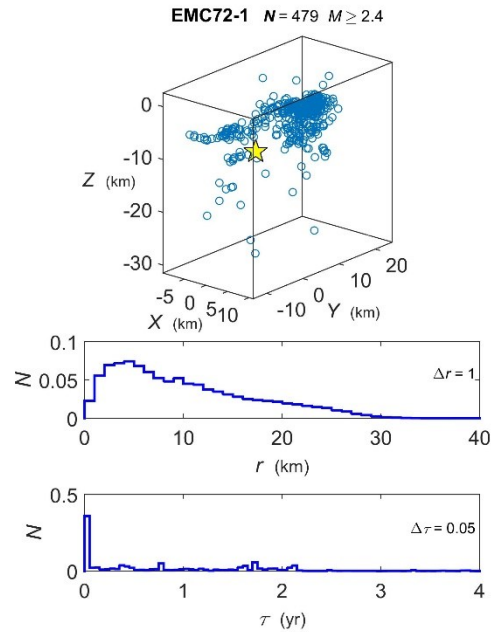


Figura 51. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a EMC72, vista con azimuth=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 52 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana EMC72-1, la línea azul gruesa es el histograma de velocidades de eventos observados y las otras líneas corresponden a los histogramas *HOTS* descritos anteriormente.

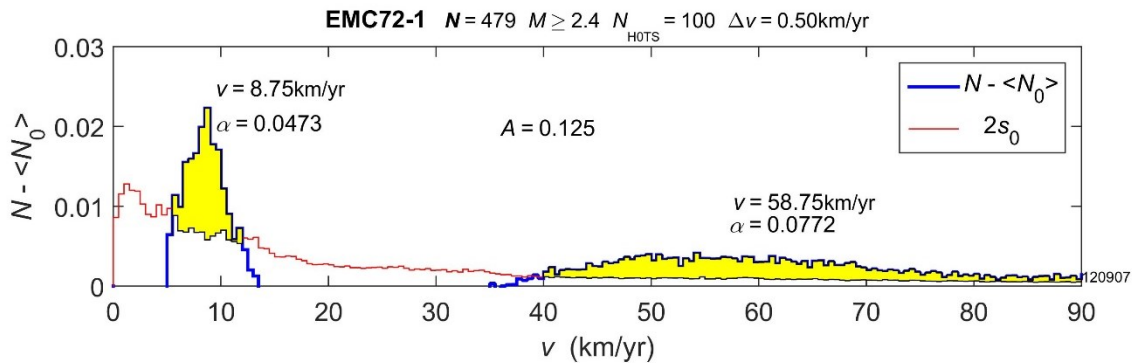


Figura 52. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-1 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* ($2s_0$ línea roja); se identificó un pico significativo que está arriba de dos desviaciones estándar el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados al área unitaria.

La figura 53 muestra la matriz de velocidad aparente en el tiempo del pico de EMC72-1 con $v=8.75\text{ km/yr}$, la probabilidad de ocurrencia al azar del valor máximo del pico es $P_r=0.010932$. Identificamos dos grupos principales, el grupo 1 localizado en $t_i=[2008.08232,2008.61465]$ y $t_j=[2009.94210,2010.28575]$ y el grupo 2 localizado en $t_i=[2006.29666,2006.45838]$ y $t_j=[2008.09579,2008.61465]$. Las velocidades del segundo pico con $v=58.75\text{ km/yr}$ corresponden a dos cúmulos muy cercanos en tiempo.

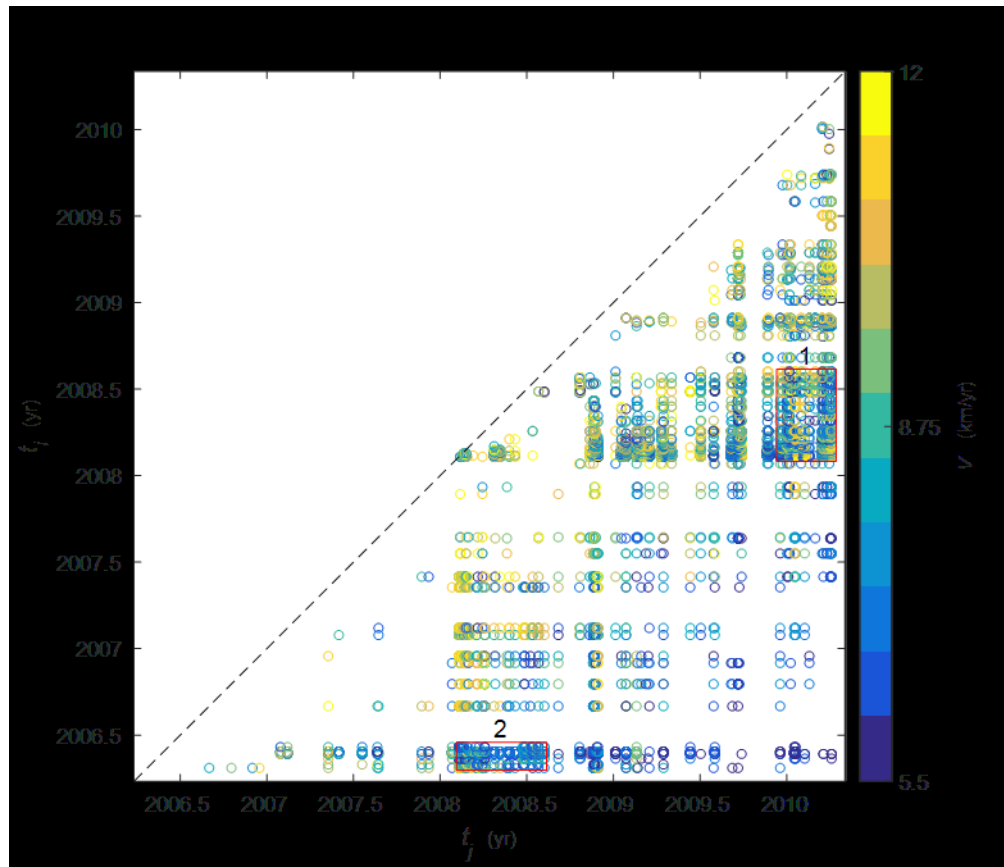


Figura 53. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo del pico con $\alpha = 0.075$ de la ventana EMC72-1. Se identificó dos grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo.

La figura 54 muestra la distribución espacial de los eventos i y j (representados con triángulos invertidos y círculos azules respectivamente) que conforman a los dos grupos de la MVAT (figura 53). Las velocidades de los grupos 1 y 2 son de eventos distribuidos cada uno en un cúmulo.

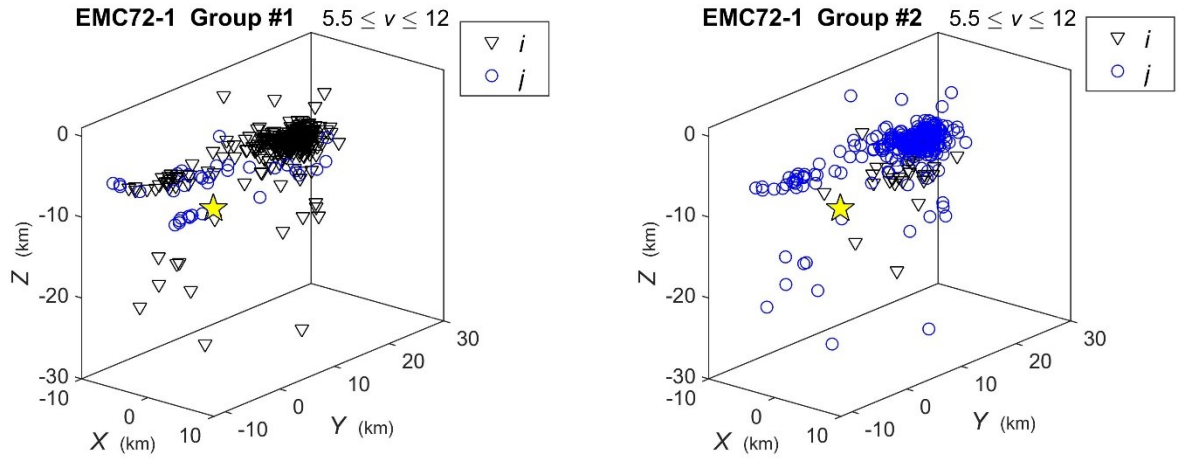


Figura 54. Distribución de eventos que conforman los dos grupos de la MVAT. Las velocidades del grupo 1 corresponden principalmente a un cúmulo temprano y las velocidades del grupo 2 corresponden principalmente a un cúmulo tardío. La estrella indica la localización del sismo EMC72.

Ventana EMC72-2

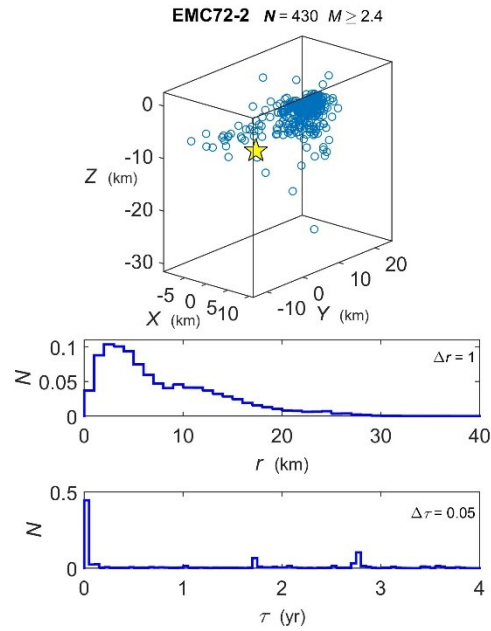


Figura 55. Distribución de hipocentros de la ventana 2 previa a EMC72, vista con azimut=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La ventana 2 previa a EMC72 abarca cuatro años desde $t_1 = 2008.2573$ hasta $t_2 = 2004.2573$ y contiene 430 sismos con $M_w \geq 2.4$. En la figura 55 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana EMC72-2.

La figura 56 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de EMC72-2. Se identificó dos picos, el mayor con $\alpha = 0.0227$.

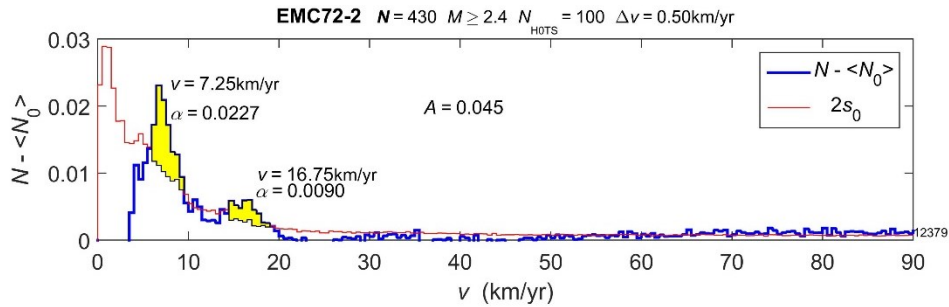


Figura 56. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-2 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana EMC72-3

La ventana 3 previa a EMC72 abarca cuatro años desde $t_1 = 2006.2573$ hasta $t_2 = 2002.2573$ y contiene 496 sismos con $M_w \geq 1.4$. En la figura 57 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana EMC72-3.

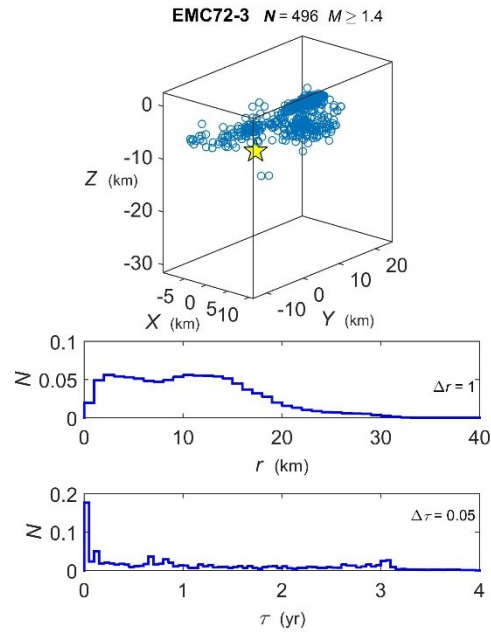


Figura 57. Distribución de hipocentros de la ventana 3 previa a EMC72, vista con azimuth=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 58 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de EMC72-3. Se identificó dos pequeños picos, el mayor con $\alpha = 0.0123$.

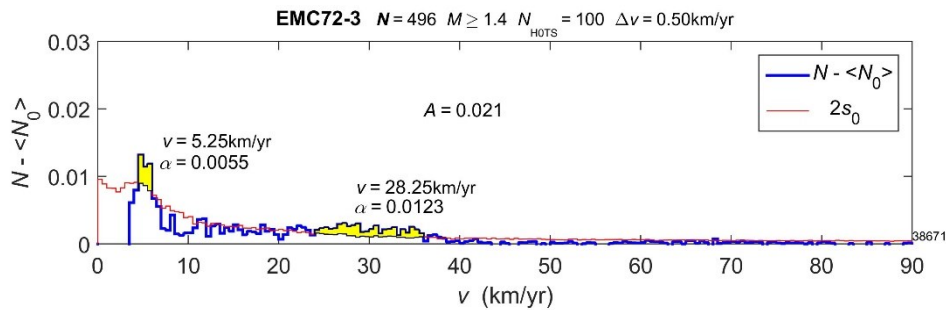


Figura 58. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-3 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos pequeños que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana EMC72-4

La ventana 4 previa a EMC72 abarca cuatro años desde $t_1 = 2004.2573$ hasta $t_2 = 2000.2573$ y contiene 500 sismos con $M_w \geq 2.2$. En la figura 59 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana EMC72-4.

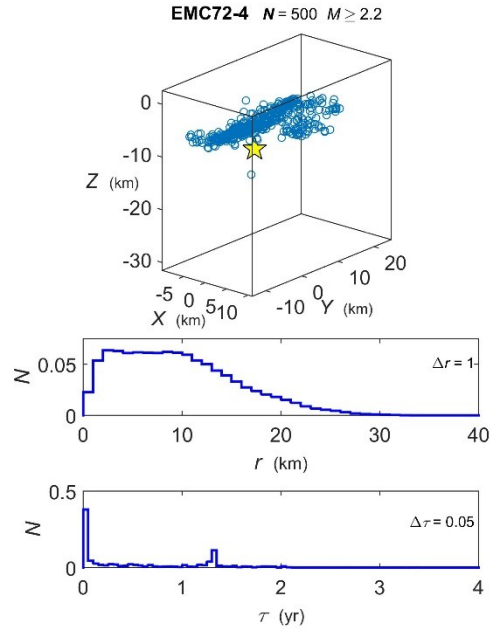


Figura 59. Distribución de hipocentros de la ventana 4 previa a EMC72, vista con azimuth=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 60 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de EMC72-4. Se identificó un pico con $\alpha = 0.0544$ cuyas velocidades corresponden al efecto de dos cúmulos.

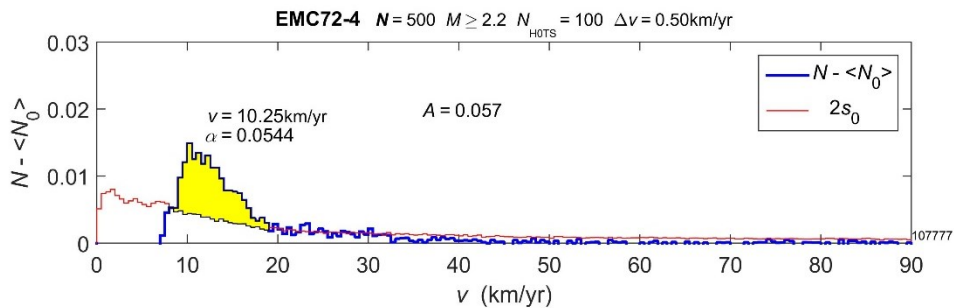


Figura 60. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-4 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico que están arriba de dos desviaciones estándar que está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana EMC72-5

La ventana 5 previa a EMC72 abarca cuatro años desde $t_1 = 2002.2573$ hasta $t_2 = 1998.2573$ y contiene 496 sismos con $M_w \geq 2.2$. En la figura 61 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana EMC72-5.

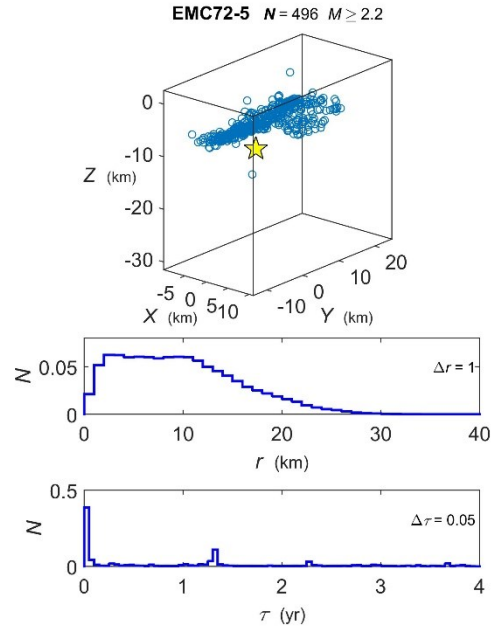


Figura 61. Distribución de hipocentros de la ventana 5 previa a EMC72, vista con azimuth=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 62 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de EMC72-5. Se identificó un pico con $\alpha = 0.0236$.

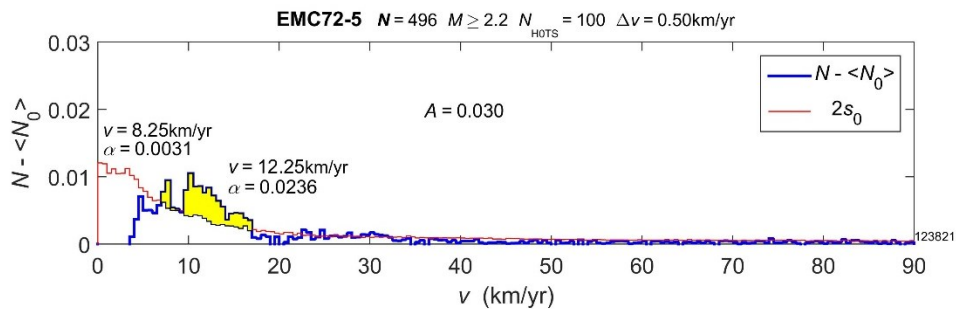


Figura 62. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-5 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó dos picos pequeños que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana EMC72-6

La ventana 6 previa a EMC72 abarca cuatro años desde $t_1 = 2000.2573$ hasta $t_2 = 1996.2573$ y contiene 223 sismos con $M_w \geq 1.4$. En la figura 63 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana EMC72-6.

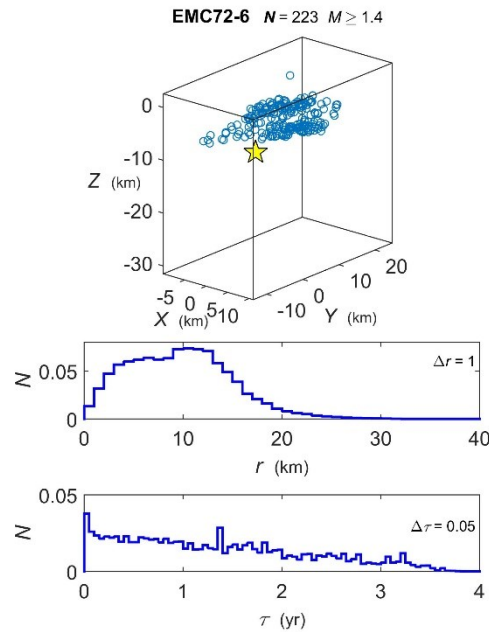


Figura 63. Distribución de hipocentros de la ventana 6 previa a EMC72, vista con azimuth=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 64 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de EMC72-6; no se identificó picos arriba de $2s_0$.

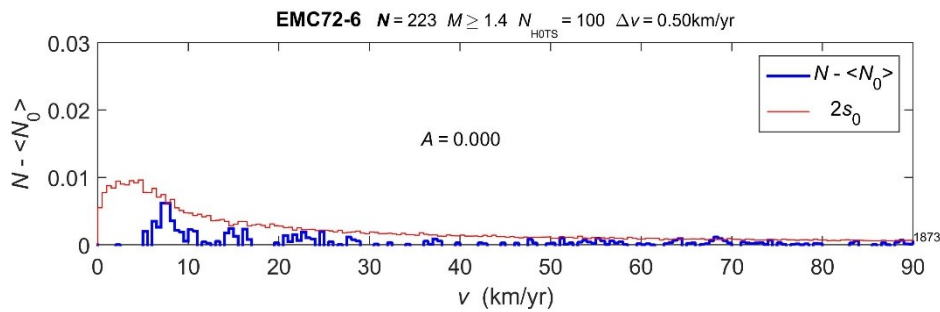


Figura 64. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-6 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); no se identificó picos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana EMC72-7

La ventana 7 previa a EMC72 abarca cuatro años desde $t_1 = 1998.2573$ hasta $t_2 = 1994.2573$ y contiene 240 sismos con $M_w \geq 1.4$. En la figura 65 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana EMC72-7.

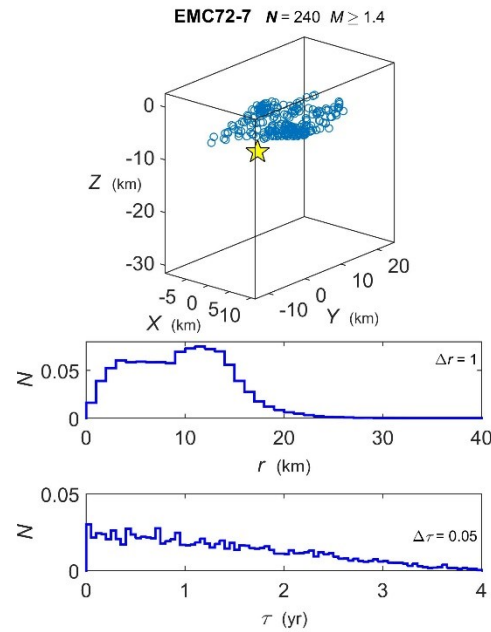


Figura 65. Distribución de hipocentros de la ventana 7 previa a EMC72, vista con azimuth=40° y elevación=20°; se indica la ubicación del sismo EMC72 con una estrella de color amarillo (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 66 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de EMC72-7; no se identificó picos arriba de $2s_0$.

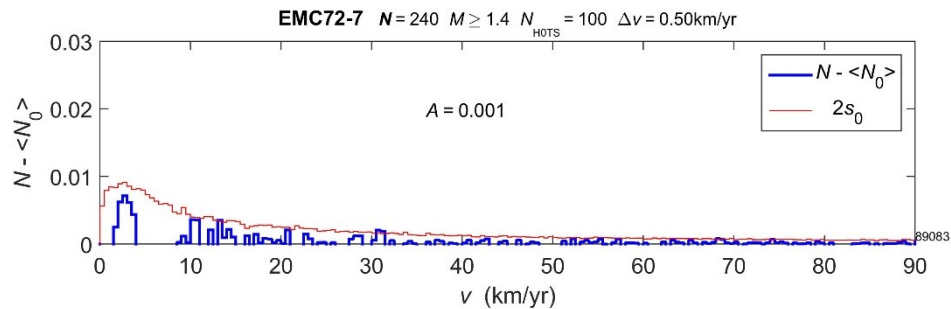


Figura 66. Histograma de velocidades de la ventana EMC72-7 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); no se identificó picos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventanas EMC72-8, 9 y 10

La figura 67 muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de las ventanas 8, 9 y 10 previas al sismo EMC72, donde no identificamos picos significativos.

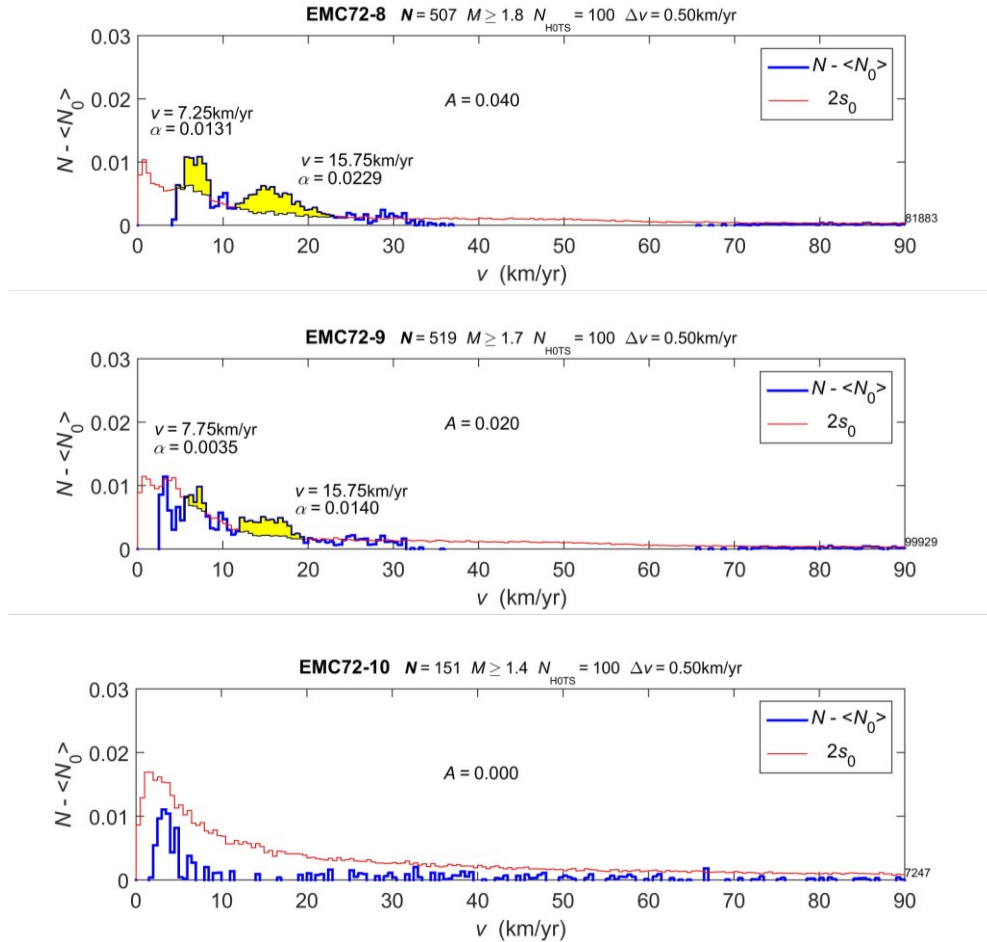


Figura 67. Histograma de velocidades de las ventanas 8, 9 y 10 (líneas azules) previas a EMC72 y distribuciones $2s_0$ de *HOTS*; en ninguna de las ventanas se identificó picos significativos. Los histogramas, observados y $2s_0$ están normalizados a área unitaria.

Ventana EMC72P

La figura 68 muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de la ventana EMC72P posterior al sismo EMC72, donde no identificamos picos significativos que indiquen la posible ocurrencia de cúmulos.

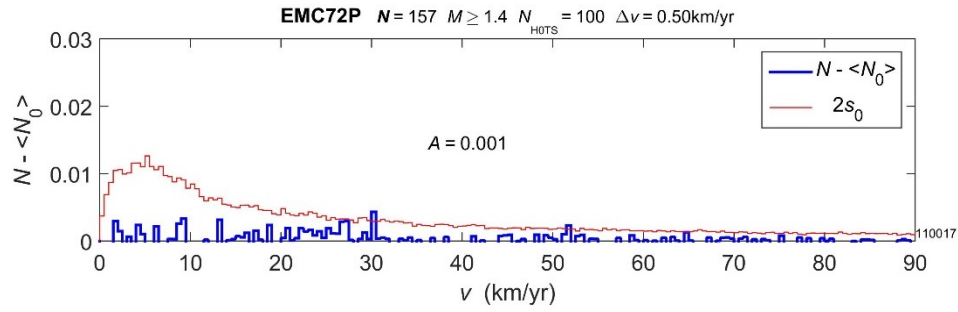


Figura 68. Histograma de velocidades de la ventana EMC72P (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); no se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Ambos histogramas, observados y HOTS están normalizados a área unitaria.

A continuación se muestra una tabla con la información de área A arriba de dos desviaciones estándar, área del pico máximo $\alpha_{\max}$, magnitud mínima y número de eventos de cada ventana asociada al sismo EMC72.

Tabla 3. Información de A , α , magnitud mínima y número de eventos N de las diez ventanas previas y la ventana P posterior al sismo EMC72. Los valores de área muy pequeños y cercanos a cero se indican con líneas punteadas. Números de eventos demasiado bajos son indicados con letra itálica.

W	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	P
A	0.000	0.020	0.040	0.001	0	0.03	0.057	0.021	0.045	0.125	0.001
$\alpha_{\max}$	--	0.014	0.023	--	--	0.024	0.054	0.012	0.023	0.077	--
$M_{\geq}$	1.4	1.7	1.8	1.4	1.4	2.2	2.2	1.4	2.4	2.4	1.4
N	<i>151</i>	519	507	240	223	496	500	496	430	479	<i>157</i>

3.4 Ridgecrest

El sismo de Ridgecrest, ocurrió el 6 de julio de 2019 en longitud -117.599°W , latitud 35.770°N , profundidad 8.00km y con $M_w = 7.1$, al cual nos referiremos de ahora en adelante como R71. La figura 69 (izquierda)

muestra los epicentros previos al sismo R71 y al sismo de Searles Valley ocurrido el 4 de julio de 2019 y $M_w = 6.4$, que puede considerarse como un pre-evento del sismo de Ridgecrest.

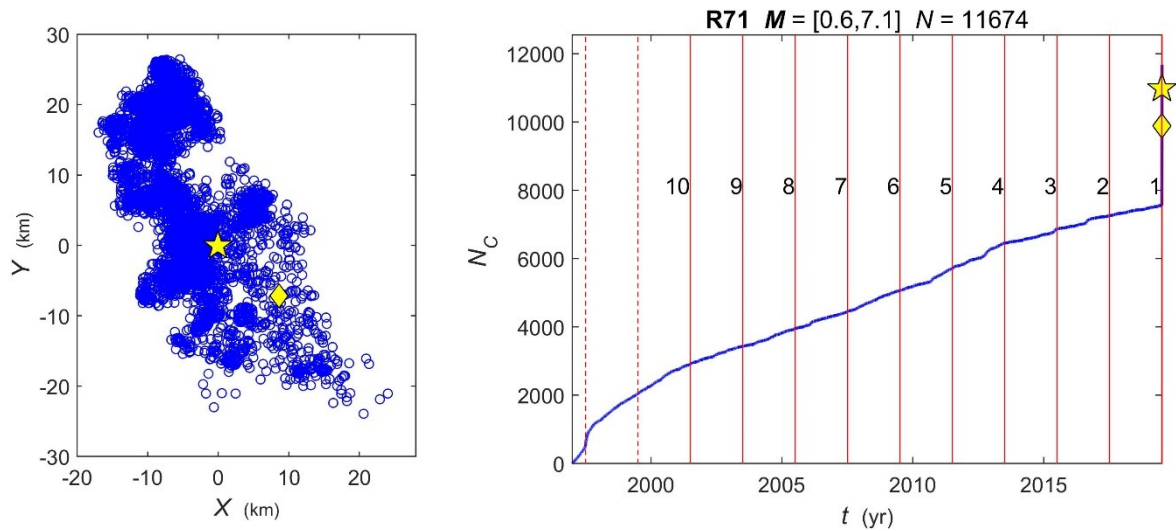


Figura 69. Izquierda: Grupo de epicentros asociados al sismo Ridgecrest ocurridos antes del sismo Searles Valley. El sismo R71 está indicado con una estrella y Searles Valley con un diamante. Derecha: Cumulativa del número de sismos (línea azul). Las líneas verticales indican el comienzo de cada ventana y las líneas verticales discontinuas indican los extremos correspondientes. La identificación de cada ventana se indica con un número o letra para cada ventana. La estrella y diamante indican el tiempo de ocurrencia de R71 y Searles Valley, respectivamente.

Las ventanas de tiempo están relacionadas con el evento principal; se eligió diez ventanas de tiempo previas al sismo R71, la primera ventana inicia justo antes de la ocurrencia del sismo de Searles Valley; cada ventana tiene duración de cuatro años y tienen traslape de dos años.

A continuación se muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de las ventanas del sismo R71, comenzando con la ventana 3 que tiene el mayor valor de A , por lo que será nuestra referencia para juzgar los resultados de otras ventanas.

Ventana R71-3

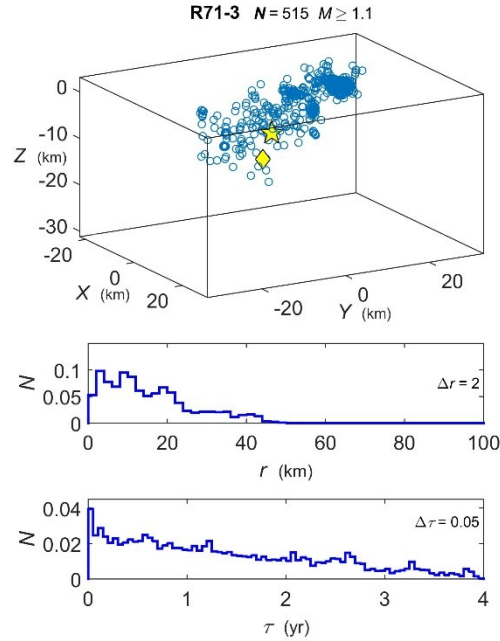


Figura 70. Distribución de hipocentros de la ventana 3 previa a R71, vista con azimuth=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La ventana 3 previa a R71 abarca cuatro años desde $t_1 = 2015.506$ hasta $t_2 = 2011.506$ y contiene 515 sismos con $M_w \geq 1.1$. La figura 70 muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

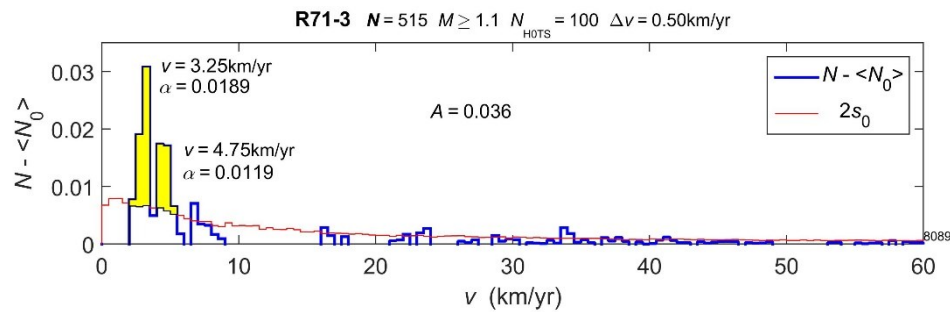


Figura 71. Histograma de velocidades de la ventana R71-3 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS ($2s_0$ línea roja); se identificó dos picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar, los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Se muestra en la figura 71 (arriba) los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana R71-3 donde hay picos claramente por encima de la media más dos desviaciones estándar de H0TS. El pico mayor en $v = 3.25 \text{ km/yr}$ tiene área $\alpha = 0.0189$ y se debe a la ocurrencia de dos grupos que ocurrieron en la ventana de tiempo R71-3; la probabilidad de ocurrencia al azar del valor máximo del pico es $P_r = 0.00880$.

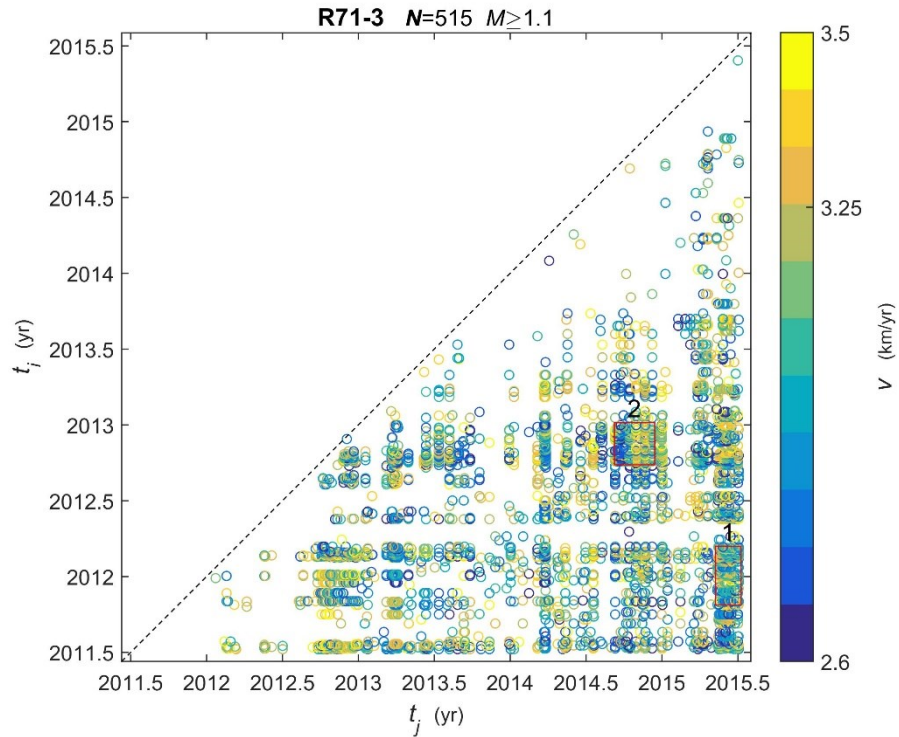


Figura 72. Matriz de velocidades aparentes en el tiempo del pico con $\alpha = 0.0189$ de la ventana R71-3. Se identificó dos grupos principales los cuales están encerrados con cuadros de color rojo.

La figura 72 muestra la matriz de velocidad aparente para dicho pico en el rango de velocidades $[v_1, v_2] = [2.6, 3.5]$ donde seleccionamos dos grupos principales, el grupo 1 localizado en $t_i = [2011.81, 2012.20]$ y $t_j = [2015.35, 2015.52]$ y el grupo 2 con $t_i = [2012.74, 2013.02]$ y $t_j = [2014.69, 2014.95]$.

La figura 73 muestra la distribución espacial de los eventos i y j que conforman a los dos grupos de la MVAT (figura 72). Se observa que las velocidades del grupo 1 corresponden a eventos que están distribuidos principalmente en dos cúmulos más eventos externos. Las velocidades del grupo 2 es de dos cúmulos que ocurrieron muy cerca espacialmente.

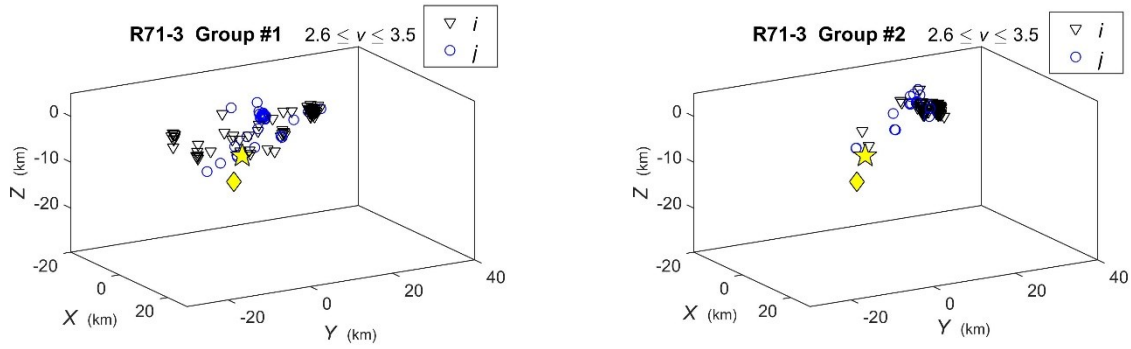


Figura 73. Distribución de eventos que conforman los dos grupos de la MVAT. Las velocidades del grupo 1 corresponden al efecto de dos cúmulos, el primero con tiempos t_i indicados con triángulos invertidos y el segundo con tiempos t_j identificado con círculos azules. Las velocidades del grupo 2 son de dos cúmulos que ocurrieron cerca espacialmente. La estrella y diamante indican la localización de los sismos R71 y Searles Valley, respectivamente.

La ventana 1 previa a R71 abarca desde $t_1 = 2019.506$ hasta $t_2 = 2015.506$ y contiene 549 sismos con $M_w \geq 0.8$, se eligió la ventana de modo que no incluye al sismo de Searles Valley ni sus réplicas. En la figura 74 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo) de los sismos de la ventana R71-1.

Ventana R71-1

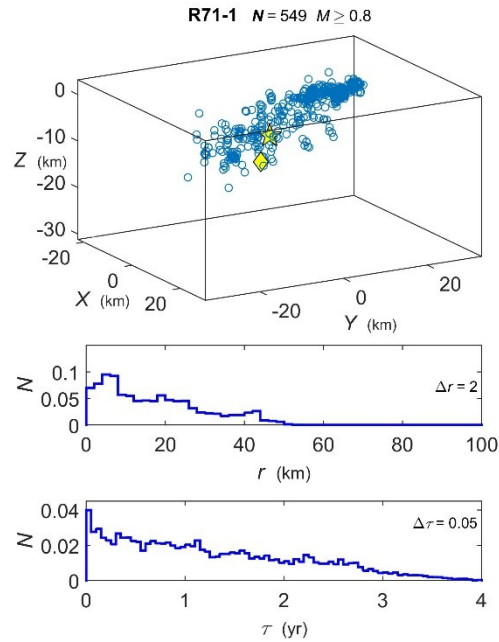


Figura 74. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a R71, vista con $\text{azimut}=60^\circ$ y $\text{elevación}=16^\circ$; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

Se muestra en la figura 75 los resultados del análisis de velocidades aparentes, la línea azul gruesa es el histograma de velocidades aparentes los eventos de la ventana R71-1 y la línea roja corresponde al histograma $2s_0$; se identificó un pequeño pico.

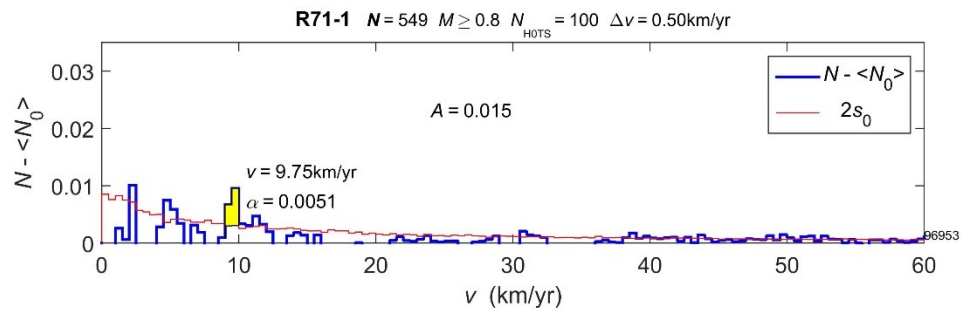


Figura 75. Histograma de velocidades de la ventana R71-1 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea $2s_0$ roja); se identificó un pico pequeño que está arriba de dos desviaciones estándar que está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana R71-2

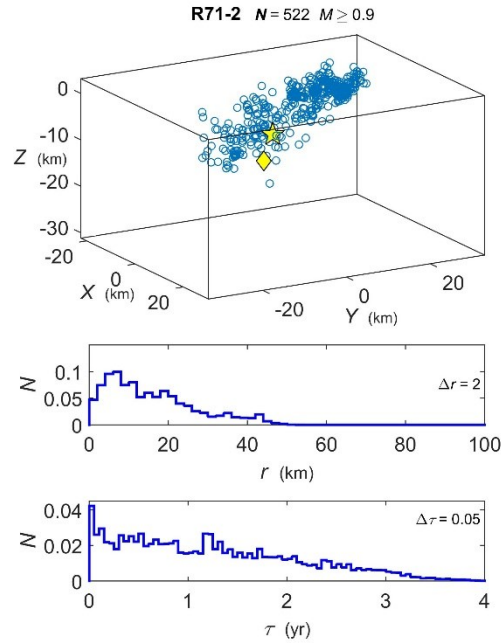


Figura 76. Distribución de hipocentros de la ventana 2 previa a R71, vista con azimuth=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La ventana 2 previa a R71 abarca desde $t_1 = 2017.506$ hasta $t_2 = 2013.506$ y contiene 522 sismos con $M_w \geq 0.9$. En la figura 76 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

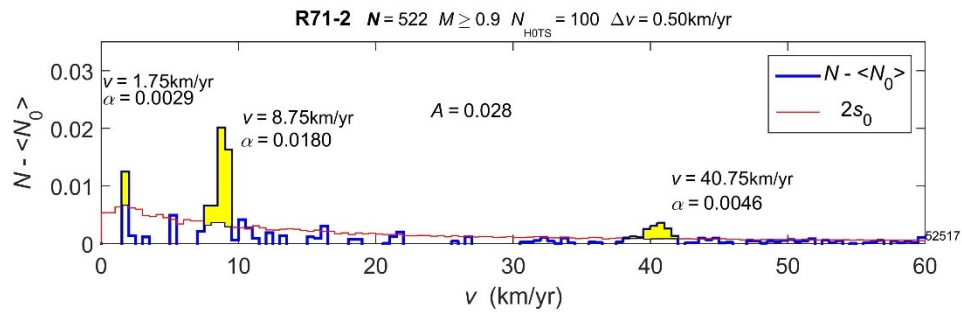


Figura 77. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana R71-2 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó tres picos significativos que están arriba de dos desviaciones estándar los cuales están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

La figura 77 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de R71 -2. Se identificó tres picos, el mayor con $\alpha=0.0180$, cuyas velocidades corresponden al efecto de dos cúmulos.

Ventana R71-4

La ventana 4 previa a R71 abarca desde $t_1 = 2013.506$ hasta $t_2 = 2009.506$ y contiene 550 sismos con $M_w \geq 1.2$. En la figura 78 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

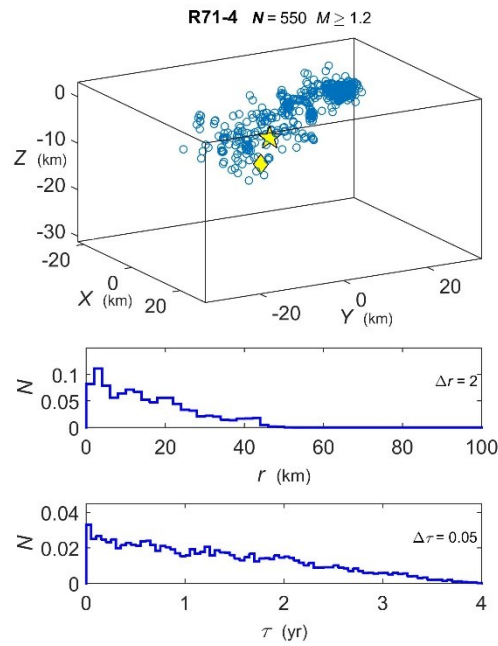


Figura 78. Distribución de hipocentros de la ventana 1 previa a R71, vista con azimuth=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 79 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana R71-4. Se identificó un pico con $\alpha=0.0106$.

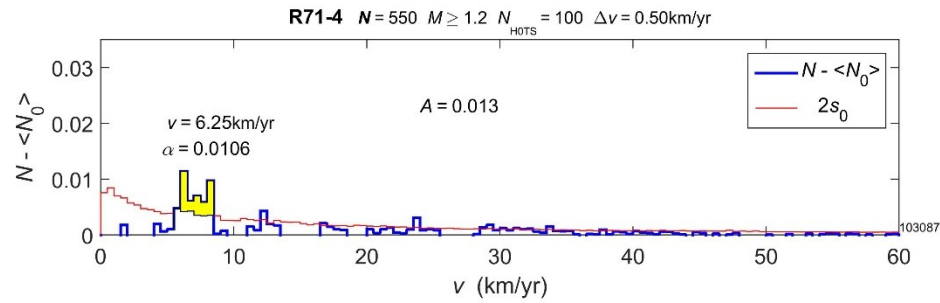


Figura 79. Histograma de velocidades de la ventana R71-4 (línea azul) y distribución $2s_0$ de *HOTS* (línea roja); se identificó un pico que están arriba de dos desviaciones estándar que está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana R71-5

La ventana 5 previa a R71 abarca desde $t_1 = 2011.506$ hasta $t_2 = 2007.506$ y contiene 481 sismos con $M_w \geq 1.2$. En la figura 80 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

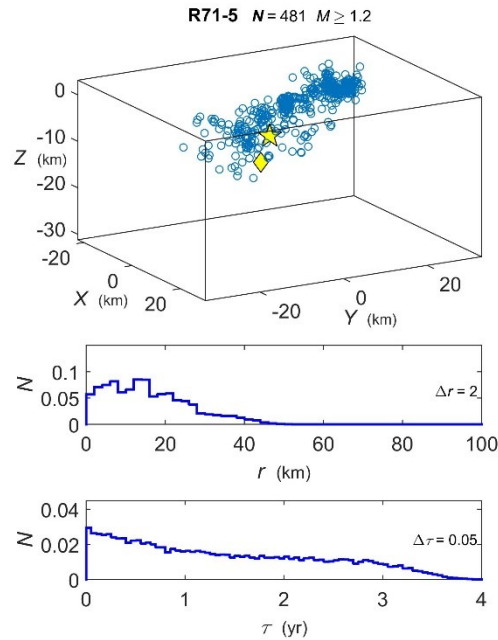


Figura 80. Distribución de hipocentros de la ventana 5 previa a R71, vista con azimuth=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 81 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana R71-5. Se identificó dos pequeños picos arriba de $2s_0$.

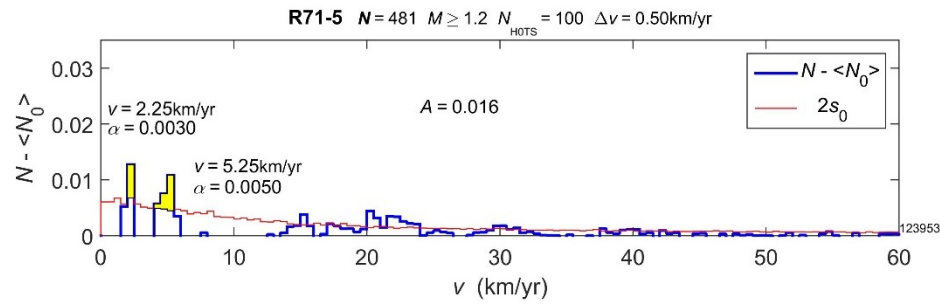


Figura 81. Histograma de velocidades menos velocidad media HOTS de la ventana R71-5 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); se identificó dos pequeños picos arriba de dos desviaciones estándar, que están sombreados con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventana R71-6

La ventana 6 previa a R71 abarca desde $t_1 = 2009.506$ hasta $t_2 = 2005.506$ y contiene 482 sismos con $M_w \geq 1.1$. En la figura 82 se muestra la distribución de los hipocentros (arriba), el histograma de r (centro) y τ (abajo).

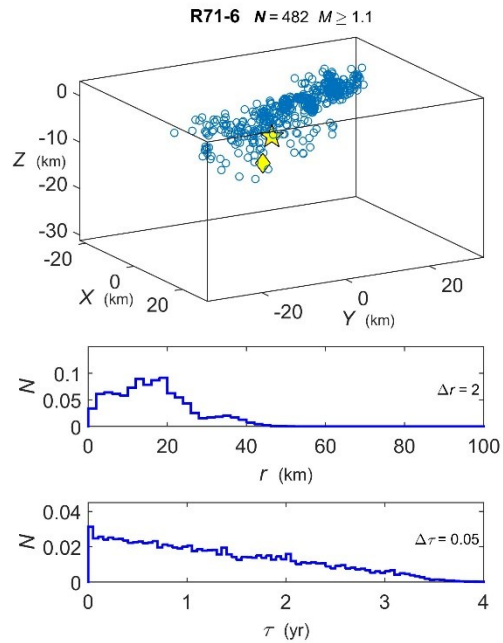


Figura 82. Distribución de hipocentros de la ventana 6 previa a R71, vista con azimut=60° y elevación=16°; se indica la ubicación del sismo R71 con una estrella de color amarillo y de Searles Valley con un diamante (arriba), histogramas de r (centro) y τ (abajo).

La figura 83 muestra los resultados del análisis de velocidades aparentes de la ventana R71-6; no se identificó picos significativos.

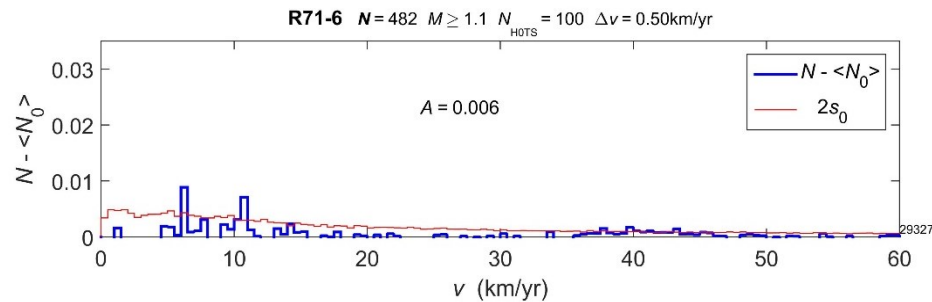


Figura 83. Histograma de velocidades de la ventana R71-6 (línea azul) y distribución $2s_0$ de HOTS (línea roja); no se identificó picos significativos arriba de dos desviaciones estándar, el cual está sombreado con color amarillo. Ambos histogramas, observado y $2s_0$, están normalizados a área unitaria.

Ventanas R71-7, 8, 9 y 10

La figura 84 muestra los resultados de los análisis de velocidades aparentes de las ventanas 7, 8, 9 y 10 previas al sismo R71, donde no identificamos picos significativos.

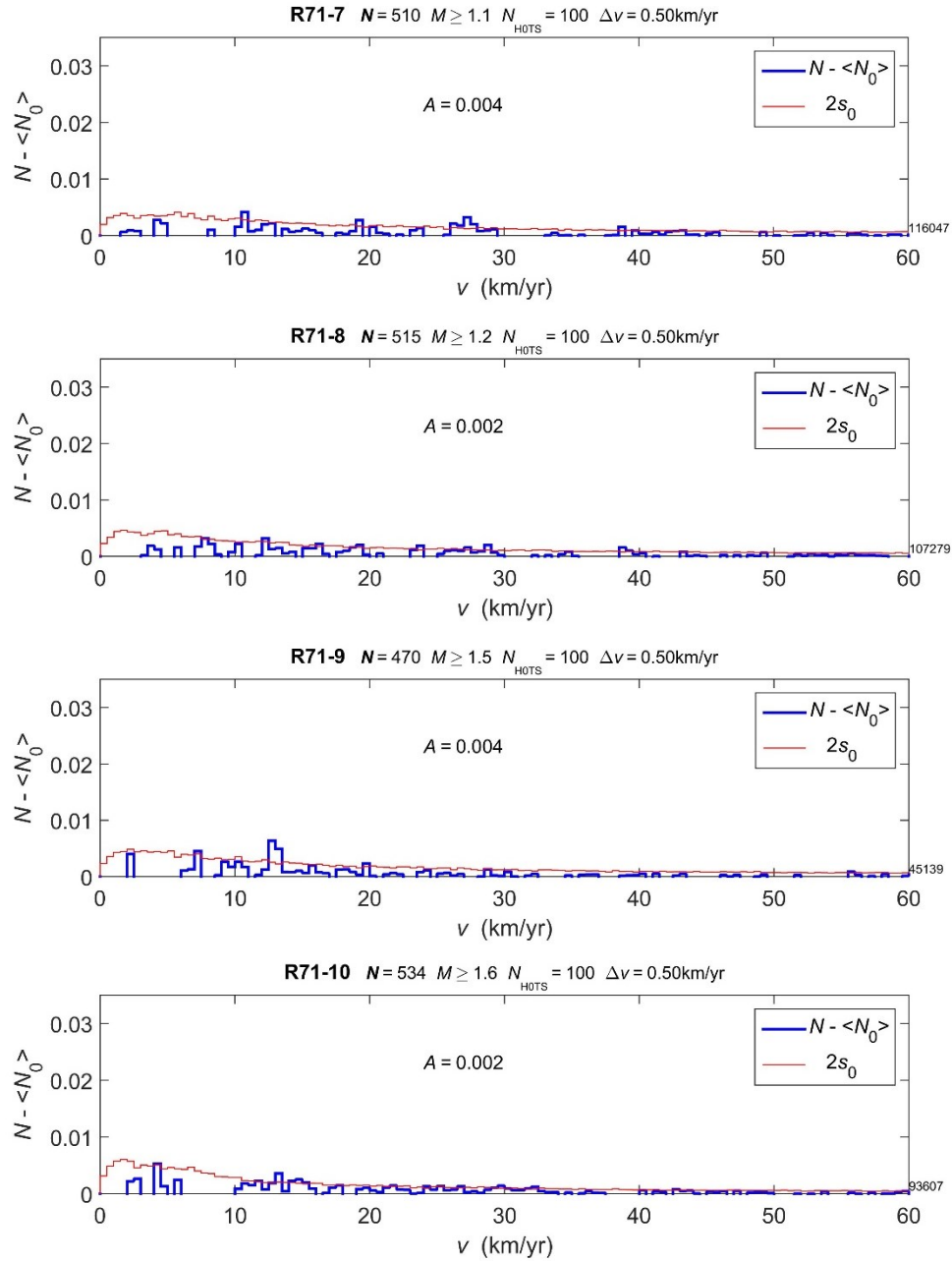


Figura 84. Histograma de velocidades de las ventanas 7, 8, 9 y 10 previas a R71 (línea azul) y distribuciones $2s_0$ de HOTS; en ninguna de las ventanas se identificó picos significativos que estén arriba de dos desviaciones estándar. Los histogramas, observados y $2s_0$ están normalizados a área unitaria.

A continuación se muestra una tabla con la información de área A arriba de dos desviaciones estándar, área del pico máximo $\alpha_{\max}$, magnitud mínima y número de eventos de cada ventana asociada al sismo R71.

Tabla 4. Información de A , α , magnitud mínima y número de eventos N de las diez ventanas previas al sismo R71. Los valores de área muy pequeños y cercanos a cero se indican con líneas punteadas. Números de eventos demasiado bajos son indicados con letra itálica.

W	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
A	0.002	0.004	0.002	0.004	0.006	0.016	0.013	0.036	0.028	0.015
$\alpha_{\max}$	--	--	--	--	--	--	0.0106	0.0189	0.0180	0.0051
$M \geq$	1.6	1.5	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	0.9	0.8
N	534	470	515	510	482	481	550	515	522	549

Capítulo 4. Discusión y conclusiones

Aun cuando a simple vista en algunas de las distribuciones espaciales de sismos parece haber presencia de agrupamientos, éstos no necesariamente ocurrieron en intervalos cortos de tiempo. Si se analiza únicamente la cumulativa del número de eventos en el tiempo, los saltos o incrementos súbitos en la sismicidad, son comúnmente asociados con sismos de tamaño intermedio y sus réplicas, que son sólo un tipo de cúmulos espacio-temporales. La identificación de picos de velocidades aparentes es una herramienta útil para determinar la posible existencia de varios tipos de cúmulos espacio-temporales y las matrices de velocidad aparente en el tiempo, permiten determinar su localización y tiempo de ocurrencia.

El método para la identificación de picos en histogramas de velocidades aparentes, así como la elaboración de matrices de velocidades aparentes en el tiempo, permitió localizar y cuantificar cúmulos espacio-temporales en sub-catálogos de ventanas de tiempo previas, poco antes de la ocurrencia de los sismos principales ($M > 7.0$) del catálogo del USGS para el sur de California y el norte de Baja California. Para los cuatro sismos principales se seleccionó ventanas de tiempo, cada una con cuatro años de duración y traslape de dos años, previas a cada sismo y, excepto para R71, una ventana de tiempo posterior con duración de 4 años, pasada la mayor cantidad de réplicas. A continuación se enlista los resultados para los cuatro sismos principales del catálogo (ver representación gráfica en figura 85).

- Para el sismo de Landers, L73, se identificó un pico de velocidad aparente significativo en la ventana tres previa al sismo, con $A=0.127$ y $\alpha=0.0648$ que corresponde a la ocurrencia de dos cúmulos. En la ventana seis previa al sismo L73 hubo otro un pico de menor altura, con valor máximo en $A=0.0856$ y $\alpha=0.0383$, dicho pico corresponde a un solo cúmulo. Para las demás ventanas previas al sismo y en la ventana posterior no hubo picos significativos.
- Para el sismo de Hector Mine, HM71, hubo un pico significativo en la ventana 3 previa al sismo, con $A=0.110$ y velocidad $\alpha=0.105$ corresponde a la ocurrencia de dos cúmulos. Se identificó un pico en la ventana 2 previa al sismo, con $\alpha=0.092$ y $A=0.0871$ respectivamente; en las demás ventanas anteriores al sismo no hubo picos significativos. No se identificó picos en la ventana posterior al sismo.
- Para el sismo de El Mayor-Cucapah, EMC72, en la ventana 1 previa al sismo hubo un pico significativo con $A=0.125$ y $\alpha=0.047$. Se identificó un pico en la ventana cuatro previa al sismo, con $A=0.057$ y $\alpha=0.54$ respectivamente. En las demás ventanas previas al sismo EMC71 no hubo picos significativos ni en la ventana posterior.

- Para el sismo de Ridgecrest, R71, en la ventana 3 previa al sismo hubo un pico significativo localizado en $A=0.036$, con $\alpha=0.0189$. En las demás ventanas previas al sismo R71 no hubo picos significativos.

Se identificó picos significativos de velocidades aparentes en las ventanas previas, cercanas a la ocurrencia de los sismos L73, HM71, EMC72 y R71. En algunas de las demás ventanas hubo picos pero éstos no sobresalen mayormente de las $2s_0$, por lo que no los consideramos significativos. En ninguna de las ventanas posteriores a los sismos principales se identificó picos, para los sub-catálogos de dichas ventanas los histogramas de datos reales estuvieron por debajo o no sobresalieron suficientemente de las $2s_0$.

La figura 85 muestra los valores de la A y α en el tiempo de cada una de las ventanas previas y (excepto para R71) ventanas posteriores a los sismos principales del catálogo de California.

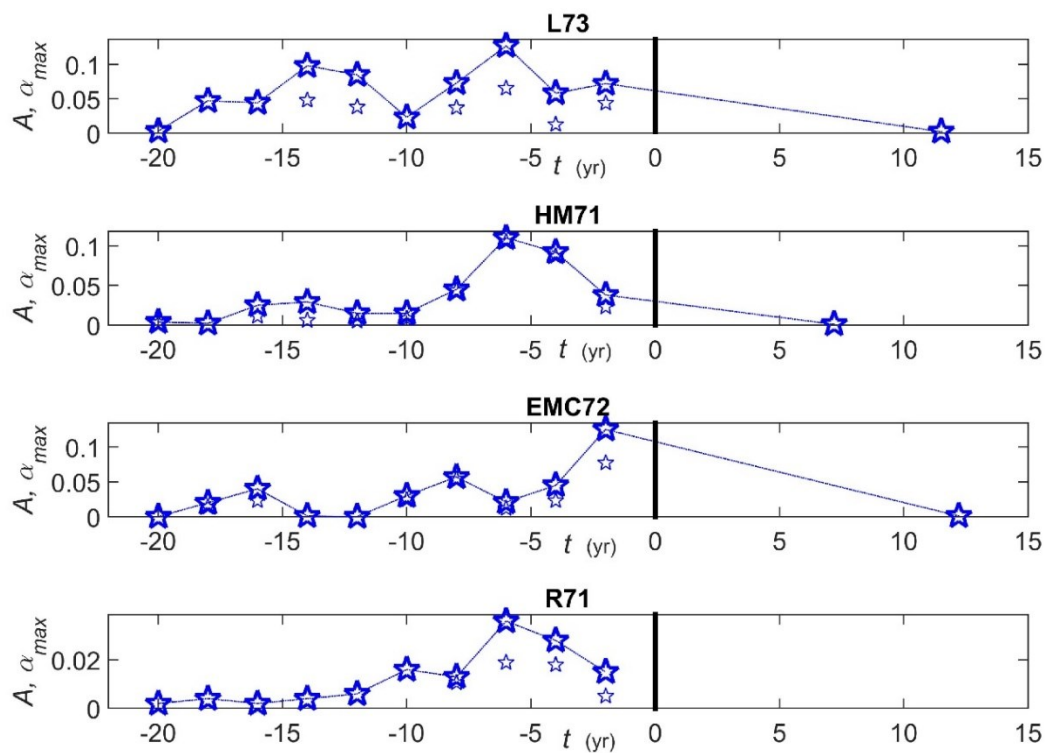


Figura 85. Valores de A (indicados con estrellas grandes) y α (indicados con estrellas pequeñas) en el tiempo para los sismos L73, HM71, EMC72 y R71.

Para los sismos L73, HM71 y R71 los valores más altos de A y α están entre cinco y ocho años antes de dichos sismos, en el caso de EMC72 los valores más grandes están entre cero y cinco años antes de ese sismo.

El método está limitado por la cantidad y calidad de los datos; cuando hay muy pocos datos, los resultados no son confiables pues unas cuantas coincidencias pueden aparecer por contraste como picos significativos. Respecto a la calidad: es necesario contar con buenas localizaciones hipocentrales, pero no es necesario que sean buenas localizaciones absolutas, basta con que los eventos de cada cúmulo estén correctamente localizados unos con respecto a otros, y éste es generalmente el caso para sismos que por estar cercanos comparten los posibles errores sistemáticos de las redes, los modelos y los programas de localización involucrados. No importa, incluso, que un cúmulo esté mal localizado con respecto a los otros cúmulos, por ejemplo en el caso de tener un cúmulo en las Sierras Peninsulares y otro en el valle de Imperial-Mexicali, pues el valor absoluto de la velocidad aparente de un pico no tiene importancia y el pico existirá, para una velocidad u otra, si los elementos de cada cúmulo están correctamente localizados relativamente para cada cúmulo.

Cabe recalcar que el método propuesto es un método nuevo y que las velocidades aparentes no han sido usadas hasta la fecha como observable precursora.

Debido a que los picos más significativos y por tanto los cúmulos espacio-temporales aparecieron poco tiempo antes (hasta 8 años antes) de los sismos principales, especulamos que están asociados con altos niveles de esfuerzo porque solo ocurren en tiempos relativamente cortos antes de cada terremoto, interpretación que concuerda con observaciones de disminución del valor b , de la entropía (Despaigne, 2018) y de la dimensión fractal antes de la ocurrencia de sismos grandes (Márquez, 2012; Márquez et al., 2012).

Proponemos que la identificación de picos de velocidades aparentes puede ser útil como precursor y por tanto contribuir a las estimaciones de peligro sísmico. Se recomienda aplicar el método a catálogos con buenas localizaciones de diferentes regímenes tectónicos. Consideramos a los sismos con $M_w = 6.4$, previos a los sismos de Landers y Ridgecrest, como sismos premonitores debido a que su ocurrencia fue muy cercana a los sismos principales en tiempo y espacio; son por tanto, parte de los mismos episodios de liberación de esfuerzo de los sismos principales.

Como trabajo futuro se propone la aplicación del método a otros sismos, posiblemente de menor magnitud y en otros ambientes tectónicos.

Literatura citada

- Bak, P., Tang, C. y Wiesenfeld, K. 1987. Self-organized criticality: an explanation of $1/f$ noise. *Phys. Rev. Lett.* 59(4), 381-384.
- Bak, P., Tang, C. 1989. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J. Geophys. Res.* 94(B1), 15635-15637.
- Bak, P., Chen, K. 1991. Self-organized criticality. *Sci. Amer.* 264(1) 46-53.
- Bak, P., Christensen, K., Olami, Z. 1994. Self-organized criticality: consequences for statistics and predictability of earthquakes. In *nonlinear dynamics and predictability of geophysical phenomena*. *Geophys. Monogr. Ser.*, vol 83, edited by W. I. Newman et al., pp. 69-74, AGU, Washington, D. C., 1994.
- Bouchon, M., Durand, V., Marsan, D., Karabulut, H. y Schmittbuhl, J. (2013) The long precursory phase of most large interplate earthquakes. *Nature Geoscience*, 6(4), 299-302.
- Chen, Y., Liu, J., Ge, H. 1999. Pattern characteristics of foreshock sequences. *Pure Appl. Geophys.* 155, 395–408.
- Chui, Glenda. 2009. Seismology: Shaking up earthquake theory. *Nature*. 461, 870-872.
- Cicerone, R., Ebel, J. E., Britton, J. 2009. A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, 476, 371-396.
- Crampin, Stuart. 1999. Stress-forecasting earthquakes. *Seismological Research Letters*. 70(3). 291-293.
- Deb, A., Gazi, M., Ghosh, J., Chowdhury, S. y Barman, C. 2018. Monitoring of soil radon by SSNTD in Eastern India in search of possible earthquake precursor. *Journal of Environmental Radioactivity*. 184–185 (2018) 63–70.
- Despaigne, G. (2017) La entropía Poissoniana en la distribución espacial de la sismicidad y su variación temporal como premonitor a la ocurrencia de grandes sismos. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Educación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California, 48pp.
- Enescu B, Ito K 2001. Some premonitory phenomena of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) earthquake: seismicity, b-value and fractal dimension. *Tectonophysics* 338, 297-314.
- Hirabayashi, T., Ito, K. y Yoshii, T. 1992. Multifractal Analysis of Earthquakes. *Pure Appl. Geophys.* 138(4), 591-610.
- Ito, K., and Matsuzaki, M. 1990. Earthquakes as self-organized critical phenomena, *J. Geophys. Res.*, 95, 6853–6868.
- Kanamori, H. 1981. The nature of seismicity patterns before large earthquakes. In Simpson, D., Richards, P. (Eds) *Earthquake Prediction - An International Review*, Am. Geophys. Union, Washington, D.C., 1-19.
- Lippiello, E., Marzocchi, W., de Arcangelis, L, Godano, C. 2012. Spatial organization of foreshocks as a tool to forecast large earthquakes. *Nature, Scientific Reports* 2, 846.

- Márquez, V. 2012 Análisis multifractal de la distribución espacial de sismicidad y su posible aplicación premonitora. Exploración de un posible mecanismo para la fractalidad mediante modelado semiestocástico. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Educación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California, 62pp.
- Márquez, V., Nava, F., Reyes, G. 2012 Multifractality in seismicity spatial distributions: Significance and possible precursory applications as found for two cases in different tectonic environments. *Pageoph* 169 (12), 2091-2105, DOI 10.1007/s00024-012-0473-9.
- Nakaya, S. y Hashimoto, T. 2002. Temporal variation of multifractal properties of seismicity in the region affected by the mainshock of the October 6, 2000 Western Tottori Prefecture, Japan, earthquake ($M = 7.3$). *Geophys. Res. Lett.*, 29, 133-1.
- Nakaya, S. 2005. Fractal properties of seismicity in regions affected by large, shallow earthquakes in western Japan: implications for fault formation processes based on a binary fractal fracture network model. *J. Geophys. Res.* 110, B01310.
- Nuannin, P., O. Kulhanek, and L. Persson 2005. Spatial and temporal b value anomalies preceding the devastating off coast of NW Sumatra earthquake of December 26, 2004, *Geophys. Res. Lett.*, 32.
- Ohnaka, M. 2013. The physics of rock failure and earthquakes, Cambridge Univ. Press, New York.
- Papazachos, B. C. 1975. Foreshocks and earthquake prediction, *Tectonophysics*, 28, 213–226.
- Reid, H. F. 1910. The California earthquake of April 18, 1906. Volume II. The Mechanics of the Earthquake. Washington DC: Carnegie Institution of Washington, Publication No. 87, 192.
- Richon, P., Sabroux, J.C., Halbwachs, M., Vandemeulebrouck, J., Poussielgue, N., Tabbagh, J. y Punongbayan, R. 2003. Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994), *Geophys. Res. Lett.*, 30(9), 1481.
- Rikitake, T. 1976. Earthquake prediction. Elsevier, Amsterdam.
- Scholz, C. H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 58(1), 399-415.
- Smith, W. D. 1981. The b-value as an earthquake precursor. *Nature*. 289, 136-139.
- Stein, S., Wyssession M. 2003. An Introduction to seismology, earthquakes, and earth structure. Blackwell Publishing, Malden, USA.
- United States Geological Survey. Earthquake hazards program: Search earthquake catalog.
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Utsu, T. 1999. Representation and analysis of the earthquake size distribution: A historical review and some new approaches. *Pure and Appl. Geophys.*, 155, 509-535.
- Wang, C., Manga, M. 2009. Earthquakes and water. Springer. California, USA.
- Wyss, M. y Habermann, R.E. 1988. Precursory seismic quiescence. *Pure Appl. Geophys.* 126,3.

- Wyss, M. 1991. Review of evaluation of proposed earthquake precursors. M. Wyss (Editor), AGU, Washington, D.C., 94 pp. EOS 72, 411.
- Wyss, M. 1997. Second round of evaluations of proposed earthquake precursors. Pure Appl. Geophys. 149, 3-16.
- Yamashita, T. y Knopoff, L. 1992. Model for intermediate-term precursory clustering of earthquakes. J. Geophys. Res, 97(B73), 19873-19879.