



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA SISMICIDAD
EN EL ESTADO DE GUERRERO 1998-2010

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

JONATÁN
ARREOLA MANZANO*

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Carlos Valdés González



Ciudad Universitaria

Octubre 2011

*Exbecario PUMC



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*“Cun didza’ shidza’ queru’
rinábaru’ bi riyádsji’ru’ len
lezi cun léi rnaru’ bi raqui’
iquiaj ladhido’ru’”*

*Con nuestro zapoteco pedimos lo
que necesitamos y también con
ello decimos lo que nos pasa por
la cabeza y el corazón.*

Redacción y edición de tesis con \LaTeX ,
Entorno de Desarrollo Integrado *Kile* y
sistema operativo libre
G N U / L I N U X .

Generación de Gráficos con
GMT y Editor Vim.

Agradecimientos

Agradezco a Nayho, Banana, Mayra y Tony, mi familia ♡, por todos los sacrificios realizados durante mis estudios, el día de hoy culmina una etapa que sin su apoyo no hubiese logrado.

Al Dr. Carlos Valdés González por la confianza y apoyo para realizar este trabajo, así como al M.C David Escobedo Zenil, por su ayuda incondicional en la elaboración de la tesis.

Al personal del SSN, El Ing. Casiano Jimenez que amablemente me proporciono los datos para realizar este trabajo, a la Dra. Sara Ivonne Franco y a la M.C Caridad Cardenas por los consejos y tips que me ayudaron a resolver muchos dolores de cabeza. A los ingenieros Jesús Pérez, Jorge Estrada, José Luis Cruz, Arturo Cárdenas, Iván Rodríguez, Alfredo Yañez, Fernando Navarro, Aaron Gutierrez, Tan Yi, al Dr. Victor Espindola, Enedina Martinez, Gilberto Martinez, Martín Malagón y Luis Ernesto. Por permitirme ser parte de este gran proyecto que es el Servicio Sismológico Nacional.

Al equipo de guardias del SSN (Aaron, Leobardo, Adriana, Oscar y Gema), con el cuál he compartido gratas experiencias y hemos crecido juntos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de pertenecer a sus filas.

Al personal administrativo, académico y de la base trabajadora de la Facultad de Ingeniería. Por facilitarme los medios para realizar este objetivo.

Al Programa Universitario México Nación Multicultural (PUMC), antes que por el apoyo económico, darme la oportunidad de reencontrarme con mis raíces indígenas.

Índice general

Contenido	4
1. INTRODUCCIÓN	2
2. ANTECEDENTES GENERALES	4
2.1. Grandes Sismos Registrados por la Sismología Intrumental	4
2.2. Sismotectónica del Estado de Guerrero	6
2.3. Sismos Lentos	8
3. MARCO TEÓRICO	9
3.1. Hipocentro	9
3.2. SEISAN	9
3.3. hypoDD	10
3.3.1. Justificación	10
3.4. Método de la doble diferencia	12
4. METODOLOGÍA	16
4.1. Zona de Estudio	16
4.2. Datos	17
4.3. Ventana Temporal	22
4.4. Programa FORTRAN para la Selección de Eventos	23
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
5.1. Ventanas de Tiempo	25
5.1.1. Ventana Uno	25
5.1.2. Ventana Dos	29
5.1.3. Ventana Tres	33
5.2. Comparativo Visual	36
5.2.1. Ventanas de tiempo analizadas con Hypocenter	36
5.2.2. Ventanas de tiempo analizadas con hypoDD	36
5.3. Análisis Estadístico Básico	40
5.3.1. Histogramas Catálogo 1998-2010 localizados con Hypocenter	40
5.3.2. Histogramas Catálogo 1998-2010 relocalizado con hypoDD	41
5.3.3. Histogramas Ventana Uno	44
5.3.4. Histogramas Ventana Uno Relocalizada	44
5.3.5. Histogramas Ventana Dos	47

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	5
5.3.6. Histogramas Ventana Dos Relocalizada	47
5.3.7. Histogramas Ventana Tres	50
5.3.8. Histogramas Ventana Tres Relocalizada	50
5.4. Subzonas de Sismicidad	53
6. CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	58

Índice de figuras

2.1. Grandes Sismos	5
2.2. Rasgos Tectónicos	7
3.1. Método de la Doble Diferencia para la Relocalización	12
4.1. Zona de Estudio	18
4.2. Catálogo, Catálogo Relocalizado	20
4.3. Secciones Catálogo, Catálogo Relocalizado	21
4.4. Series de tiempo GPS para los tres sismos lentos más importantes en el Estado de Guerrero	22
4.5. Geometría para el problema de un punto dentro de un área romboidal	23
4.6. Tiempo Unix. Timestam	24
5.1. Ventana Uno	27
5.2. Ventana Uno Relocalizada	28
5.3. Ventana Dos	31
5.4. Ventana Dos del Catálogo relocalizado	32
5.5. Ventana Tres	34
5.6. Ventana Tres Reloc	35
5.7. Tres Secciones Hypocenter	38
5.8. Tres Secciones hypoDD	39
5.9. Histograma de Frecuencias Catálogo	42
5.10. Histograma de Frecuencias Catálogo Relocalizado	43
5.11. Histograma de Frecuencias Ventana Uno	45
5.12. Histograma de Frecuencias Ventana Uno hypoDD	46
5.13. Histograma de Frecuencias Ventana Dos	48
5.14. Histograma de Frecuencias Ventana Dos hypoDD	49
5.15. Histograma de Frecuencias Ventana Tres	51
5.16. Histograma de Frecuencias Ventana Tres hypoDD	52
5.17. Subzonas de sismicidad que arroja el programa hypoDD.	54

Resumen

La sismicidad en la costa mexicana del Pacífico es un fenómeno cotidiano, en promedio el SSN reporta 2 sismos por día para el estado de Guerrero, a esta tasa los sismos reportados anualmente son 528 para esta región. En un periodo de 12 años (1998-2010) los hipocentros reportados por el SSN ascienden a 6327 eventos para dicha zona. Como podemos percatarnos es un mar de información que día con día aumenta en forma vertiginosa. Si en la actualidad, nos hiciéramos las preguntas, ¿Ha temblado más que hace diez años?, ¿Para este periodo el comportamiento y la tasa de sismicidad son constantes?, ¿Existe actividad anómala que evidencie la futura ocurrencia de un gran sismo? las respuestas no serían inmediatas o no se podrían responder. Para cuantificar la evolución de la información sísmica proponemos un análisis en espacio y tiempo. Con esta finalidad se elaboró un programa en lenguaje Fortran para hacer una selección espacio-temporal de los hipocentros. El programa tiene la capacidad de seleccionar eventos en un cuadrilátero, en niveles de profundidad y magnitud, así como en cualquier ventana temporal. Para el análisis se propone una malla de 25 celdas con centro en la brecha sísmica de Guerrero y propagada a ambos extremos hasta cubrir la superficie del estado. Las dimensiones de cada celda son 100 km x 60 km x 20 km en profundidad. Tomando como referencia el área de ruptura de los sismos históricos para esta zona.

El análisis en tiempo se divide en tres ventanas de tiempo con intervalos de 4.5 años en promedio que corresponde con el tiempo interevento de la ocurrencia de los tres sismos lentos más importantes reportados para la zona de Guerrero.

Un subconjunto de la región costera formada por cinco celdas a lo largo de la costa presenta la mayor tasa de sismicidad en todo el catálogo de análisis así como en las ventanas temporales propuestas.

En la determinación rutinaria de hipocentros en el estado de Guerrero el SSN emplea dieciséis estaciones de banda ancha, seis dentro del estado y diez en la frontera con los estados vecinos. Durante estos doce años de registro, la sismicidad se agrupa en tres grandes regiones, (1) costera, (2) la cuenca del Río Balsas y (3) la parte central de esta misma cuenca. El mayor número de hipocentros (83%) se localiza en la zona costera, en el rango de profundidad de 0-40 km. La distribución hipocentral a lo largo de la costa no es homogénea, distinguiéndose zonas de acumulación y vacío sísmico. La segunda franja, se encuentra dentro de la depresión del Río Balsas, al suroeste alejada de la trinchera 70 km y en la parte noreste 120 km, con profundidades en el rango de 40 a 80 km y que representan el 15% de la totalidad de los eventos. Finalmente la tercera se encuentra en la parte central del estado de Guerrero y representa el 1% del catálogo.

Motivación

El interés por realizar este trabajo surge de mi estancia en las guardias del SSN y del trabajo que ahí se lleva a cabo, la determinación y difusión rutinaria de hipocentros sísmicos en la Republica Mexicana.

En nuestro quacer diario surgen preguntas aparentemente sencillas, cuyas respuestas no son inmediatas. Veamos algunas de ellas.

- ¿Cuál ha sido la evolución de la sismicidad en el Estado de Guerrero en los últimos 12 años?
- ¿Hoy tiembla mas que hace 12 años?
- ¿Para este periodo el comportamiento y la tasa de sismicidad son constantes?
- Con base en la sismicidad, ¿Existe alguna “anomalía“ que indique la cercana o futura ocurrencia de un sismo fuerte en la zona?

Objetivo

- Realizar un análisis tridimensional espacio-tiempo de la sismicidad registrada por el SSN en el periodo 1998-2010, para el estado de Guerrero, con el fin de buscar un patrón sísmico que nos permita caracterizar el comportamiento de la brecha sísmica en esta zona y las regiones que la rodean.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La sismicidad en territorio mexicano es un fenómeno que ha acompañado nuestra historia, desde la época prehispánica y mucho antes, hasta nuestros días. En tiempos recientes hemos experimentado en carne propia la fuerza destructora de los terremotos en más de una ocasión; y se tiene el conocimiento que puede volver a ocurrir.

En este sentido científicos mexicanos y extranjeros se han interesado en caracterizar los sismos en nuestro territorio, con el objetivo de proporcionar información oportuna a los encargados de la toma de decisiones, para la mitigación de los riesgos geológicos.

En México se distinguen cuatro grandes regiones de actividad sísmica: Eje Neovolcánico Transmexicano, Golfo de California, Región del Istmo de Tehuantepec y la Costa del Pacífico, cada una con potencial de riesgo sísmico y características particulares. Sin embargo es en esta última donde se produce la sismicidad más activa de nuestro país, razón por la cual en 1993 inicia operaciones la Red Sismológica de Banda Ancha en el estado de Guerrero, a cargo del Servicio Sismológico Nacional (SSN)¹.

A partir de este momento el SSN consolidó el registro, detección, almacenamiento y publicación de información sísmica de alta calidad como una tarea rutinaria que va en aumento.

Con la Red Sísmica Nacional actual el SSN reporta en promedio nueve sismos por día para estas cuatro regiones². Y por lo menos uno de los epicentros calculados cae dentro del estado de Guerrero.

La costa de Guerrero registra alrededor del 80% de la sismicidad que se reporta para este Estado.

La Costa de Guerrero es una zona generadora de sismos fuertes, entre los más recientes se encuentran el denominado sismo del Ángel del 28 de julio de 1957 de magnitud $M_w = 7.8$ [Singh and Mortera, 1991], el sismo de Petatlán del 14 de marzo de 1979 con magnitud $M_s = 7.6$

¹<http://www.ssn.unam.mx/>

²Comunicación Personal Ing. Casiano Jiménez Cruz y Dr. Víctor Hugo Espíndola Castro. Analistas SSN

[Valdés-González and Meyer, 1996], y la replica del sismo de Michoacán de 1985, 21 de septiembre de 1985, $M_s = 7.6$ [Valdés-González and Novelo-Casanova, 1998]. Los tres sismos causaron daños importantes en las poblaciones cercanas al epicentro y en la Ciudad de México.

La liberación de energía en la frontera entre placas tectónicas, para un mismo sitio es recurrente, es lo que los sismólogos denominan periodo de retorno, tiempo promedio entre un sismo característico y la ocurrencia de otro. Conforme pasa el tiempo en una región en donde no se ha presentado un sismo importante, la probabilidad de que ocurra se incrementa. Esta situación se presenta entre Acapulco y Petatlán en la Costa Grande de Guerrero, región conocida como la Brecha Sísmica de Guerrero.

Se cumple un centenario de la ocurrencia del último sismo fuerte registrado en la brecha sísmica de Guerrero y la incertidumbre de cuando puede presentarse uno nuevo va en aumento.

Capítulo 2

ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Grandes Sismos Registrados por la Sismología Instrumental

El siglo XXI trajo consigo avances vertiginosos en los dispositivos tecnológicos y las técnicas de comunicación, para el caso de la sismología, una nueva época se vislumbra con la gran cantidad de información sísmica registrada, así como la capacidad y rapidez en el análisis de esta.

En el siglo XX los observatorios sismológicos registraron cuatro sismos con magnitudes mayores a $M_w=8.8$ en cien años, ver figura 2.1. Esto nos hacía suponer que estos fenómenos no son muy comunes. Sin embargo en los últimos diez años, han ocurrido sismos importantes de magnitud cercana a $M_w=9.0$, El sismo de Sumatra 2004 ($M_w=9.0$), el sismo de Chile de 2010 ($M_w=8.8$) y recientemente el sismo en Japón 2011 ($M_w=9.0$). Lo cuál nos indica que este tipo de sismos tan grandes, no son tan esporádicos como el registro instrumental nos los había dicho. Robert Geller de la Graduate School of Science at the University of Tokyo acertadamente señala que “la tectónica de placas ha estado activa por los menos en los últimos mil millones de años y probablemente por mucho más tiempo y los científicos tienen solo una muestra de 100 años de datos sobre la ocurrencia de terremotos con la sismología instrumental” [Showstack, 2011].

Los últimos 5 grandes sismos fueron precedidos por una brecha de cuatro décadas que siguieron a un grupo de grandes sismos entre 1950 y 1964 [USGS, 2011] ¹.

Ninguna importancia se ha establecido a esta brecha, aunque no parece que haya habido una reducción en la liberación de la energía mundial después del *cluster* de 1960, ver figura 2.1. México puede generar sismos de esta magnitud.

Determinar la magnitud de terremotos antiguos (anteriores a 1887, debido a la ausencia de sismómetros) es difícil, en algunas ocasiones se pudo inferir la magnitud por el tsunami que han producido, por los deslizamientos marinos o de cuantificar la deformación superficial que se ha

¹<http://cires.colorado.edu/bilham/Honshu2011/Honshu2011.html>

producido.

Pocos terremotos anteriores a 1900 se puede asignar magnitudes debido a la ausencia de sismómetros antes de 1887. Para magnitudes de terremotos anteriores puede ser de vez en cuando a partir de datos numéricos inferidos por el tsunami que han producido ([Ortiz et al., 2000]) o de los deslizamientos marinos que han producido, y en ocasiones, de cuantificar la deformación superficial.

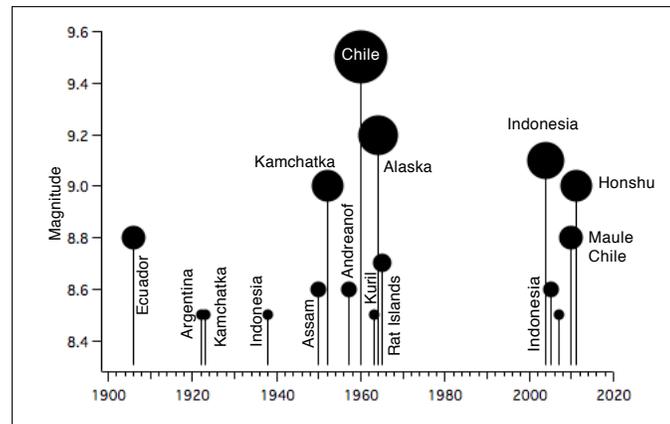


Figura 2.1: Grandes Sismos en el siglo XX. Tomado de [USGS, 2011] ¹

2.2. Sismotectónica del Estado de Guerrero

La costa suroeste de México es una zona generadora de grandes sismos de falla inversa de bajo ángulo (thrust earthquakes) relacionados a la deformación cortical generada por la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa Norteamericana [Valdés-González and Meyer, 1996].

El Estado de Guerrero se encuentra a lo largo de la Trinchera Mesoamericana, que marca la subducción entre ambas placas, la trinchera es paralela a la costa a distancias de 70 a 100 Km, por cerca de 1500 Km en territorio mexicano.

Las tasa de convergencia entre estas dos placas varía de 47 mm/año en el estado de Michoacan a 65 mm/año en el estado de Oaxaca a lo largo de la trinchera y tiene una dirección aproximada de N33°E [DeMets et al., 1994], ver figura 4.1.

En la brecha de Guerrero entre 1899 y 1911, ocurrieron 4 sismos cuyas magnitudes oscilaron entre 7.5 y 7.8. Con base en la sismología histórica no ha habido una liberación significativa en la parte noreste del gap desde el sismo del 16 de Diciembre de 1911 ($M_s = 7.8$). La más reciente liberación de energía en la parte sureste del gap fue en 1907 ($M_s = 7.9$) y la del 28 de Julio de 1957 ($M_s = 7.8$).

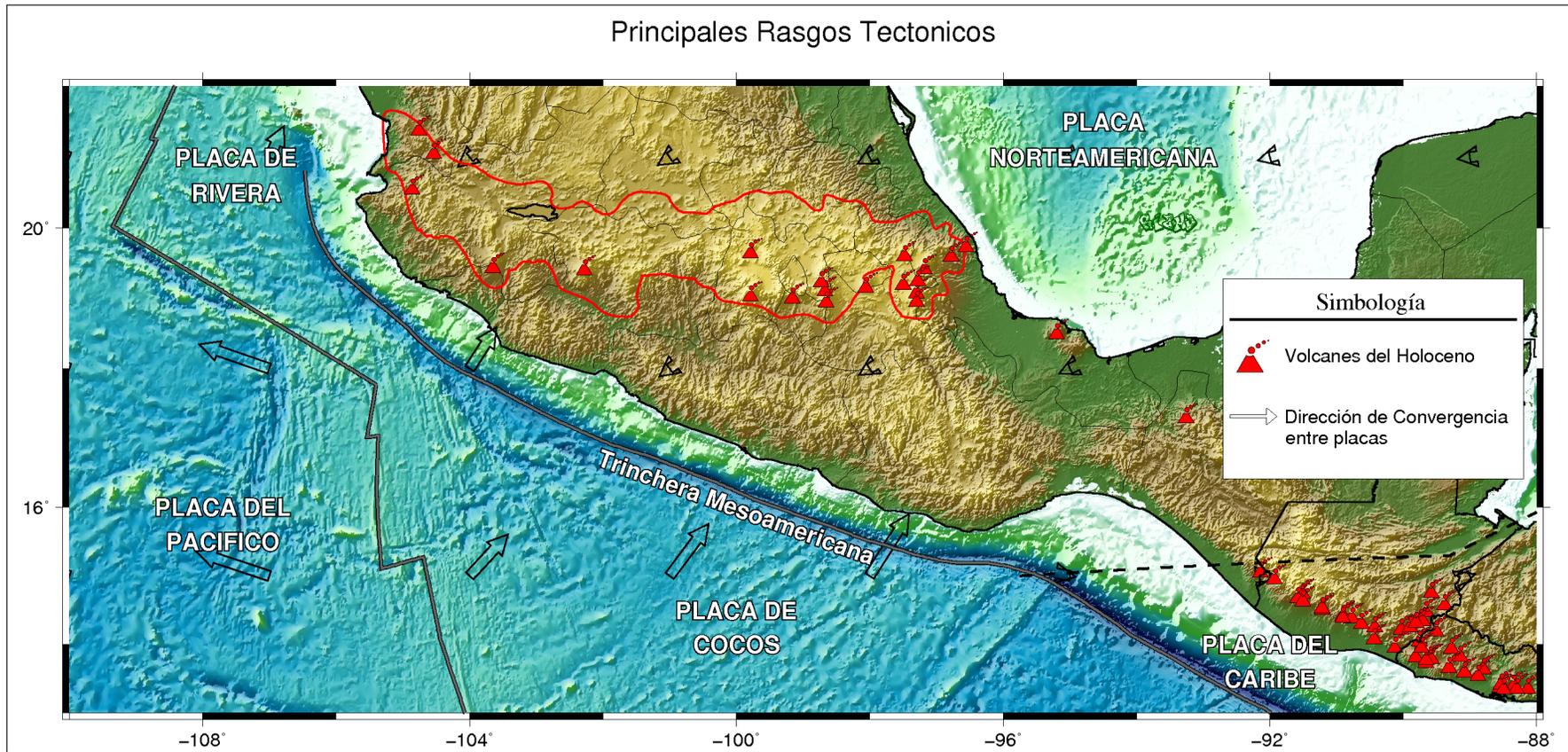


Figura 2.2: Principales rasgos tectónicos. La república mexicana se encuentra ubicada en la confluencia de cinco placas tectónicas cuya interacción da origen a los sismos. En el gráfico se aprecia la Faja Volcánica Transmexicana, la Trinchera Mesoamericana, el Arco Volcánico Centroamericano y la dirección de convergencia entre las placas tectónicas. Modificado de [Kostodoglov and Pacheco, 1999] y [Franco et al., 2005]

2.3. Sismos Lentos

Generalmente sabemos de la ocurrencia de un terremoto, por la sacudida del terreno y los objetos, desplazamientos evidentes en la superficie o por lecturas en sismogramas. Sin embargo los científicos han descubierto con sorpresa que grandes áreas de tierra se mueven lenta y silenciosamente; Japón, Cascadia, México, Kamchatka, Alaska, Nueva Zelanda, Hawaii y Costa Rica. Pero este movimiento es imperceptible para los sismómetros². A este tipo de movimientos se les denomina Eventos Lentos Asismicos, Sismos Lentos o transitorios asismicos (SSEs por sus siglas en inglés).

Los SSEs son un fenómeno común que se observa en casi todas las zonas de subducción con instrumentos capaces de registrarlos. Los Sistemas Continuos de Posicionamiento Global (GPS) han permitido el registro de esta clase de fenómeno geofísico [Schwartz and Rokosky, 2007].

Los Transitorios asismicos, sin ninguna relación evidente con los grandes terremotos aún, son un nuevo modo reconocido de la deformación a lo largo de las grandes zona de falla [Liu et al., 2007]. Transitorios de corto periodo (algunos toman algunos días y otros toman varios meses) se han detectado en las zonas de subducción poco profundas.

En México se han registrado los Sismos Lentos más grandes de la historia en la zona de subducción de Guerrero, 2001-2002 y 2006 [Vergnolle et al., 2010].

Grandes SSEs han ocurrido en 1998, 2001-2002 y 2006 que han producido desplazamientos en superficie de 5-6 cm y son de los más grandes observados (magnitud equivalente $M_w=7.6$) [Iglesias et al., 2004].

²<http://www.sciencelearn.org.nz/Contexts/Earthquakes/Looking-Closer/What-are-slow-slips>

Capítulo 3

MARCO TEÓRICO

3.1. Hipocentro

La determinación de hipocentros es una de las tareas más importantes en la sismología práctica y la mayoría de los sismólogos se han visto envueltos en esta tarea alguna vez.

La localización de un terremoto está definida por el hipocentro sísmico (x_0, y_0, z_0) y el tiempo origen t_0 . El hipocentro es la ubicación física, generalmente longitud (x_0) , latitud (y_0) y profundidad debajo de la superficie (z_0, Km) . El epicentro es (x_0, y_0) . El tiempo origen es el tiempo de ocurrencia del sismo.

Cuando un sismo es grande, las dimensiones físicas pueden ser de varios cientos de kilómetros y el hipocentro puede estar principalmente ubicado en cualquier parte de la superficie de ruptura. Dado que el hipocentro y el tiempo origen están determinados por los tiempos de arribo de las fases sísmicas iniciadas por la primera ruptura, el cálculo de localización corresponderá al punto donde inicio la ruptura y el tiempo origen al tiempo de la ruptura inicial.

Esto es verdadero usando fases P y S dado que la velocidad de ruptura es menor que la velocidad de la onda S. Así que la energía de la onda P o S emitida por el fin de la ruptura siempre llega más tarde que la energía irradiada desde el inicio de la ruptura.

HYPOCENTER es un programa Fortran para localizar sismos locales, regionales y globales.

3.2. SEISAN

El sistema de análisis sísmico SEISAN es un conjunto completo de programas y una base de datos simple para el análisis de terremotos a partir de datos analógicos y digitales. Con SEISAN es posible utilizar sismos locales y globales para ingresar manualmente las lecturas o picarlas con un cursor, localizar eventos, editar eventos, determinar parámetros espectrales, momento sísmico, azimut de llegada de estaciones con tres componentes y desplegar epicentros.

El sistema consta de un conjunto de programas vinculados a la misma base de datos. Usando los programas de búsqueda, es posible utilizar diferentes criterios para buscar en la base de datos para eventos particulares y trabajar con este subconjunto sin extraer los eventos. La mayoría de los programas pueden funcionar tanto en forma convencional (mediante un único archivo con muchos eventos), o en forma de base de datos. Además SEISAN contiene algunos programas de investigación integrados tipo como Q coda, modelos sintéticos y un sistema completo para el calculo del riesgo sísmico [Ottemöller et al., 2011].

3.3. hypoDD

3.3.1. Justificación

El análisis de la sismicidad para el estudio de los procesos tectónicos, recurrencia sísmica e interacción entre terremotos requiere conocimientos precisos de las variaciones espaciales entre hipocentros [Waldhauser and Ellsworth, 2000]

Basado en este hecho y en la validación de nuestro catálogo se justifica la relocalización.

El proceso rutinario en la determinación absoluta de los hipocentros está controlado por diversos factores como son:

- Geometría de la red.
- Fases disponibles.
- La calidad de las lecturas de los tiempos de arribo.
- Conocimiento de la estructura cortical (modelo de velocidades).

Para nuestro caso, se puede decir que estos factores han sido constantes en el tiempo, excepto la geometría de la red, ya que esta ha ampliado durante estos 12 años. En la actualidad se cuenta con 6 estaciones de banda ancha en el estado de Guerrero, pero no siempre fue así.

En la tabla 1 se muestra la cronología de las estaciones más importantes en la determinación rutinaria de hipocentros en el Estado de Guerrero.

Tabla 1. Cronología de las estaciones del SSN para la determinación rutinaria de hipocentros en el Estado de Guerrero.

Estación	Nombre, Localidad	Fecha de Instalación
PLIG	Platanillo, Iguala, Guerrero.	23-Oct-1993
CAIG	Cayaco, Coyuca de Benítez, Guerrero.	02-Dic-1993
ZIIG	Zihuatanejo, Zihuatanejo, Guerrero.	05-Dic-1993
OXIG	Oaxaca, Oaxaca.	02-Mar-1994
HUIG	Huatulco, Santa María Huatulco, Oaxaca.	04-Mar-1994
PNIG	Pinotepa, Pinotepa Nacional, Oaxaca.	28-Mar-1994
CUIG	El Pozo, C.U, México D.F.	07-Jul-1994
YAIG	Yautepec, Yautepec, Morelos.	15-Jul-1995
PPIG	Popocatépetl, Amecameca, Edo. de México.	07-May-1998
MOIG	Morelia, Morelia, Michoacán.	22-Ago-1998
TPIG	Tehuacán, Tehuacán, Puebla.	10-Oct-2002
MEIG	Mezcala, Chilpancingo, Guerrero.	09-Mar-2005
MMIG	Maruata, Aquila, Michoacán.	08-Jul-2006
ARIG	Arcelia, Guerrero.	08-Mar-2009
TLIG	Tlapa, Tlapa de Comonfort, Guerrero.	13-Oct-2009
HLIG	Huajuapán, Huajuapán de León, Oaxaca.	08-Dic-2009

Cortesía Ingeniero Jorge Estrada, Jefe de Instrumentación SSN.

3.4. Método de la doble diferencia

Si la separación hipocentral entre 2 eventos sísmicos es pequeña comparada con la distancia entre fuente y estación, entonces las trayectorias entre la región de la fuente y la estación común son similares a lo largo de la totalidad de la trayectoria.

En este caso, las diferencias entre los tiempos de viaje para los 2 eventos observados en una estación se pueden atribuir a la distancia entre eventos [Waldhauser and Ellsworth, 2000]

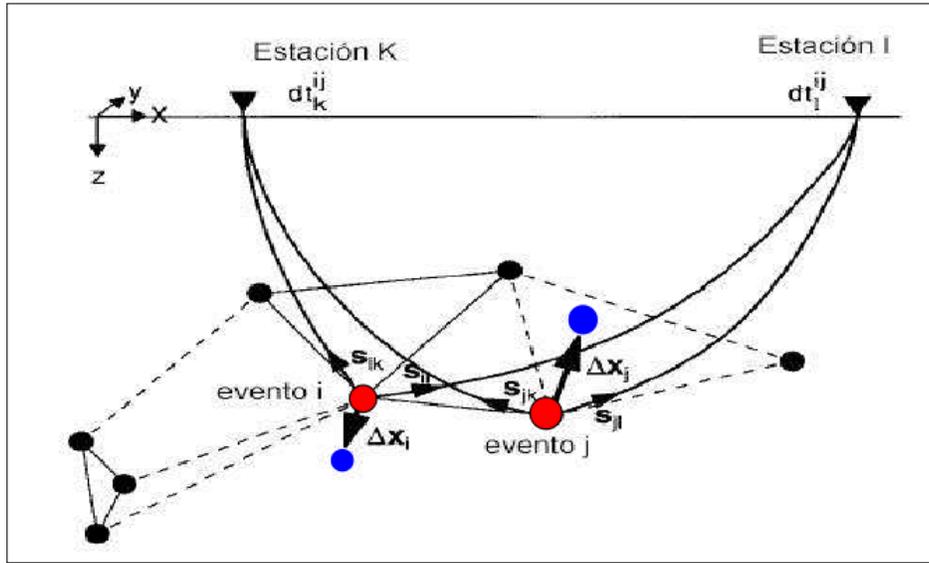


Figura 3.1: Los círculos negros y rojos representan hipocentros de prueba que son ligados a eventos vecinos por correlación cruzada (líneas continuas) o datos del catálogo (líneas punteadas). Para dos eventos i y j las localizaciones iniciales (círculos rojos) con sus respectivos vectores de lentitud s , con respecto a dos estaciones k y l . Las flechas Δx indican el vector de relocalización para los eventos i y j (puntos azules), Δt es la diferencia de tiempo de viaje entre los eventos i y j observada en las estaciones k y l , respectivamente.

Considerando que i es un sismo que se registra en una estación k , el tiempo de arribo de una fase sísmica puede representarse como una función del hipocentro, el tiempo origen, así como de la velocidad sísmica.

$$t_i^k = t_i^k(m_i, v_i^k) \quad (3.1)$$

donde

$$m_i = (x_i, y_i, z_i, \tau), \text{ función del hipocentro}$$

El tiempo de arribo T , para un sismo, i , en la estación sísmica k , puede expresarse usando teoría de rayos como una integral a largo del rayo.

$$T_k^i = \tau_i^k + \int_i^k u ds \quad (3.2)$$

donde

τ : *Tiempo origen de un evento i*

$u(x)$: *Vector de lentitud*

ds : *Elemento de longitud de la trayectoria*

Debido a la relación no lineal entre el tiempo de viaje y la localización del evento se utiliza una expansión en series de Taylor. El problema resultante es uno en el cual el residual para los tiempos de viaje, r , para un evento i , está relacionado linealmente con las perturbaciones Δm , de los parámetros hipocentrales para cada observación k .

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i \quad (3.3)$$

donde $r_k^i = (t^{obs} - t^{cal})_k^i$, t^{obs} y t^{cal} son los tiempos de viaje observados y teóricos respectivamente y $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)$ son las variaciones de los parámetros hipocentrales. Tomando las diferencias de la ecuación 3.3, se obtiene una ecuación para los parámetros hipocentrales entre dos eventos i y j , como [Waldhauser and Ellsworth, 2000]:

$$\frac{\partial t_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij} \quad (3.4)$$

donde $\Delta m^{ij} = (\Delta x^{ij}, \Delta y^{ij}, \Delta z^{ij}, \Delta \tau^{ij})$, es el cambio en los parámetros hipocentrales entre dos eventos y las derivadas parciales de t con respecto a m son las componentes del vector de lentitud del rayo que conecta a la fuente con el receptor medido en la fuente.

Suponiendo un vector lentitud constante para los dos eventos, dr_k^{ij} es el residual entre el diferencial del tiempo de viaje observado y el calculado entre dos eventos, definido de la siguiente forma:

$$dr_k^i = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (3.5)$$

La ecuación 3.5 se define como una diferencia doble. La suposición de que el vector lentitud es constante, es válida únicamente para eventos que están suficientemente cercanos entre sí. Una ecuación generalizada para dos eventos i y j se obtiene tomando la diferencia entre la

ecuación 3.3, para cada uno de los eventos i y j y usando un vector de lentitud apropiado.

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij} \quad (3.6)$$

expandiendo la ecuación 3.6 se tiene:

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j = dr_k^{ij} \quad (3.7)$$

Las derivadas parciales de los tiempos de arribo t , para los eventos i y j , con respecto a sus localizaciones (x, y, z) y los tiempos de origen (τ) , respectivamente, son calculados para los hipocentros comunes y la localización de la estación donde la k -ésima fase es registrada. Δx , Δy , Δz , $\Delta \tau$ son los cambios requeridos en los parámetros hipocentrales para hacer un mejor ajuste de datos al modelo. La ecuación 3.7 se combina para todas las parejas hipocentrales para una estación, y para todas las estaciones para formar un sistema de ecuaciones lineales de la siguiente forma.

$$WGm = Wd \quad (3.8)$$

Donde G define a una matriz de tamaño $M \times 4N$ (M es el número de observaciones de diferencias dobles y N es el número de eventos) que contiene las derivadas parciales, d es el vector de datos que contiene las diferencias dobles, m es un vector de longitud $4N$, $[\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau]^T$ contiene los cambios en los parámetros hipocentrales que se quiere determinar, y W es una matriz diagonal para darle un peso diferente a cada ecuación.

Si un evento esta pobremente ligado a todos los demás, entonces G esta mal condicionada, y la solución de la ecuación 3.8 se vuelve numéricamente inestable. Una forma de regularizar tales sistemas mal condicionados es mediante el prefiltrado de datos, únicamente incluyendo eventos que estén bien ligados a otros. En general esto se logra mediante la selección de pares de eventos que tiene más de un número mínimo de observaciones. Este número depende de la distribución geométrica de las estaciones que registran los dos eventos. Otra forma de regularizar los sistemas mal condicionados es amortiguando la solución. Entonces se tiene el siguiente problema [Waldhauser and Ellsworth, 2000]:

$$W \begin{bmatrix} G \\ \lambda I \end{bmatrix} m = W \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

siendo λ el factor de amortiguamiento. Una aproximación a la ecuación 3.8 en un esquema pesado de mínimos cuadrados, mediante el uso de un sistema de ecuaciones normalizadas (norma L2), representado por [Waldhauser and Ellsworth, 2000]:

$$\hat{m} = (G^T W^{-1} G)^{-1} G^T W^{-1} d \quad (3.10)$$

Donde, \hat{m} es usada para denotar la estimación de mínimos cuadrados de m . Para conjuntos de datos pequeños y sistemas bien condicionados, la ecuación anterior se resuelve mediante el método de descomposición en valor singular (DVS) [Waldhauser and Ellsworth, 2000]:

$$\hat{m} = V \Lambda^{-1} U^T d \quad (3.11)$$

Donde U y V son dos matrices de los vectores singulares ortonormales de la matriz pesada G y Λ es una matriz diagonal con los valores singulares de G . Si el sistema a resolver es grande el método DVS es ineficiente. En este caso se encuentra la solución de sistema mediante el algoritmo de gradiente conjugado (LSQR) que resuelve el problema de mínimos cuadrados con amortiguamiento:

$$\left\| W \begin{bmatrix} G \\ \lambda I \end{bmatrix} m - W \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \right\|_2 = 0 \quad (3.12)$$

para encontrar \hat{m} .

Capítulo 4

METODOLOGÍA

4.1. Zona de Estudio

La región de estudio consta de la zona romboidal delimitada por las coordenadas geográficas: **A**(-103.34,17.16), **B**(-98.85,15.52), **C**(-97.04,18.01) y **D**(-101.53,19.64) ubicada en el Estado de Guerrero en el Suroeste Mexicano, ver figura 4.1 (A).

El catálogo empleado consta de 6327 eventos con magnitudes mayores a $M=3.0$, profundidades entre $Z=0$ Km y $Z=100$ Km. y rms entre $r=0$ y $r=1.0$ segundos.

Para la división espacial se considero una malla en forma de rombo con 25 celdas equiespaciadas. La orientación de la malla es la siguiente, el lado mas largo es paralelo a la trinchera y el otro es paralelo a la dirección de convergencia relativa de la placa de Cocos respecto a la placa Norteamericana [DeMets et al., 1994]. ver figura 4.1 (B).

El área de las celdas corresponde con la región del área de ruptura de los sismos históricos para esta zona: 22 de Febrero de 1943 $M_s = 7.7$ [Singh et al., 1984], 28 de Julio de 1957 $M_w = 7.8$ [Singh and Mortera, 1991], 14 de Marzo de 1979 $M_s = 7.6$ [Valdés-González and Meyer, 1996] y 21 de Septiembre de 1985 $M_s = 7.6$ [Valdés-González and Novelo-Casanova, 1998]

En un principio se pensó que la orientación de la malla fuese de la siguiente forma, el lado más largo, paralelo a la trinchera y el segundo perpendicular a la misma, sin embargo, se dispuso de la forma mencionada arriba, una porque el área de ruptura de los sismos que estamos empleando como referencia son paralelas a la trinchera, y segundo porque la dirección de convergencia de las placas que interactúan en el estado de Guerrero puede proporcionar un sentido físico al análisis que estamos proponiendo. La diferencia entre estas dos enfoques se refleja en un ángulo de 17 grados.

En promedio la geometría y las dimensiones de las celdas son, romboides de 100 Km. x 60 Km. x 20 Km. Con centro en la brecha de Guerrero y propagada a ambos extremos hasta cubrir la totalidad del estado.

Para obtener las coordenadas de cada celda se empleo el programa de interpolación UNAMALLA [UNAM, 2010], diseñado en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Para facilitar el análisis del catálogo se dividió el área de estudio en 5 grandes regiones paralelas al lado mas corto de la malla propuesta. Resultando las siguientes:

- R1: C01, C06, C11, C16 y C21
- R2: C02, C07, C12, C17 y C22
- R3: C03, C08, C13, C18 y C23
- R4: C04, C09, C14, C19 y C24
- R5: C05, C10, C15, C20 y C25

4.2. Datos

Los datos con que contamos son los siguientes:

Catalogo proporcionado por el SSN, se extrajo de la base de SEISAN[Ottemöller et al., 2011] con la utilidad *select* del mismo paquete de programas.

En la figura 4.2 (A) se muestra la sismicidad para la zona de estudio con una paleta de colores acorde a la profundidad (colores cálidos representan eventos someros y colores fríos eventos más profundos) y el tamaño del símbolo proporcional a la magnitud.

En términos generales y con base en su distribución espacial se distinguen 3 grandes zonas de sismicidad:

- Una asociada a la Costa, con profundidades medias entre 0-40 Km.
- Una que sigue la Cuenca del Río Balsas, con profundidades medias entre 40-80 Km.
- Y una más (somera 0-20 Km.) en la parte central de la Cuenca del Balsas.

La sismicidad asociada a la costa está presente en las primeras 10 celdas (inferiores), y es menos marcada en los límites entre los estados de Guerrero y Michoacán, sufriendo un ligero defase hacia el continente.

Por su parte la sismicidad asociada a la cuenca del Balsas se encuentra distribuida en las 15 celdas restantes (especialmente en las diez ultimas), finalmente la tercera zona, se encuentra en la parte media de la región R3. Cabe destacar que las celdas 11-15 (zona central de la malla

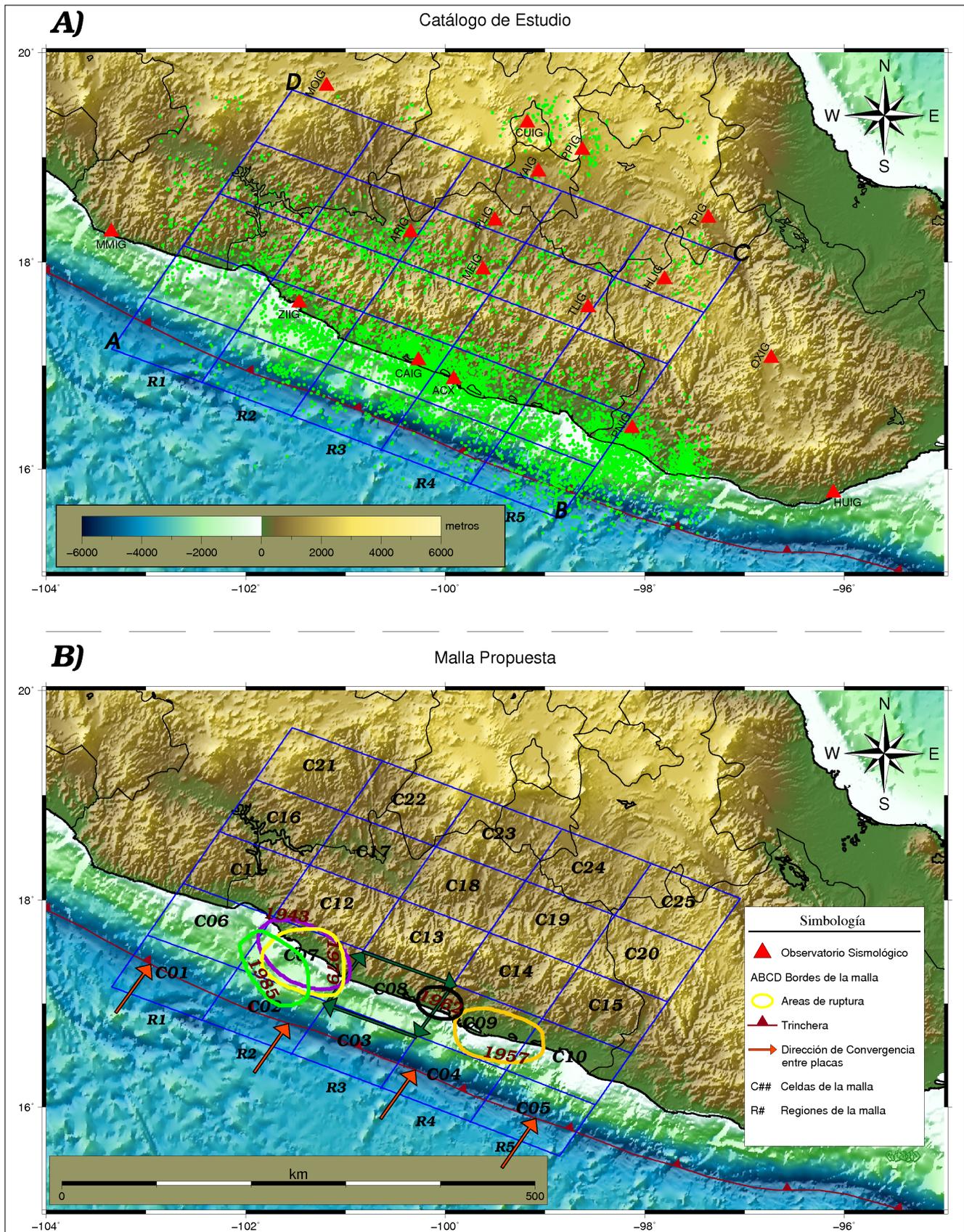


Figura 4.1: (A) Región de Estudio. En triángulos rojos se muestran las estaciones que el SSN emplea en la determinación rutinaria de hipocentros para el estado de Guerrero. En puntos verdes el catálogo empleado en este trabajo. Nótese como la actividad sísmica en la costa es mucho mayor que en otras regiones. (B) Áreas de ruptura de sismos históricos para la zona de Guerrero [Kostodoglov and Pacheco, 1999]. Se etiqueta cada celda, como referencia.

propuesta) juegan un papel de transición, ya que da la impresión que la sismicidad es nula en esta franja.

Se puede observar también que conforme nos acercamos a la plataforma continental, la profundidad de los hipocentros aumenta. La sismicidad dibuja como la placa se inclina cerca de la costa y se tuerce y mete por debajo de los volcanes en el estado de Veracruz.

Sin embargo surge una pregunta, ¿este arreglo que observamos es constante?, es decir, ¿durante estos 12 años, la sismicidad se ha desarrollado en estas 3 franjas?

Inflexiblemente no podemos responder esta pregunta, de ahí el interés en realizar esta investigación.

En la determinación rutinaria de la localización de eventos sísmicos el Servicio Sismológico Nacional utiliza el paquete de Programas SEISAN cuyo algoritmo de localización es HYPOCENTER [Ottemöller et al., 2011].

Para validar nuestros datos se decidió llevar a cabo la relocalización del catalogo mediante el algoritmo de Doble Diferencia [Waldhauser and Ellsworth, 2000]. Vease 3.4.

En el gráfico 4.2 (B) se observa el mapa de relocalización de hipocentros para la totalidad de los eventos.

Nótese que las 3 grandes zonas de sismicidad antes mencionadas se marcan de forma importante. Como es de esperarse el numero de eventos disminuye ya que el algoritmo descarta pares de eventos que están pobremente ligados a otros pares de eventos.

Para está ventana se tienen 4133 eventos, lo que corresponde con el 65% del catalogo de estudio. Lo que implica una pérdida del 35% de información.

No es un resultado excelente, pero para fines de comparación se considera satisfactorio.

Veremos más adelante que en efecto esta tendencia en la sismicidad se mantiene a lo largo de las tres ventanas de tiempo analizadas, y que además se definen subregiones dentro de estas.

En la figura 4.3 se observan las secciones correspondientes al mapa de hipocentros para el catálogo de estudio antes y después de efectuar la relocalización. Para las secciones se dividió la zona de estudio en 5 regiones con 5 celdas cada una en dirección de la convergencia relativa entre placas. La zona central corresponde con la Brecha Sísmica de Guerrero.

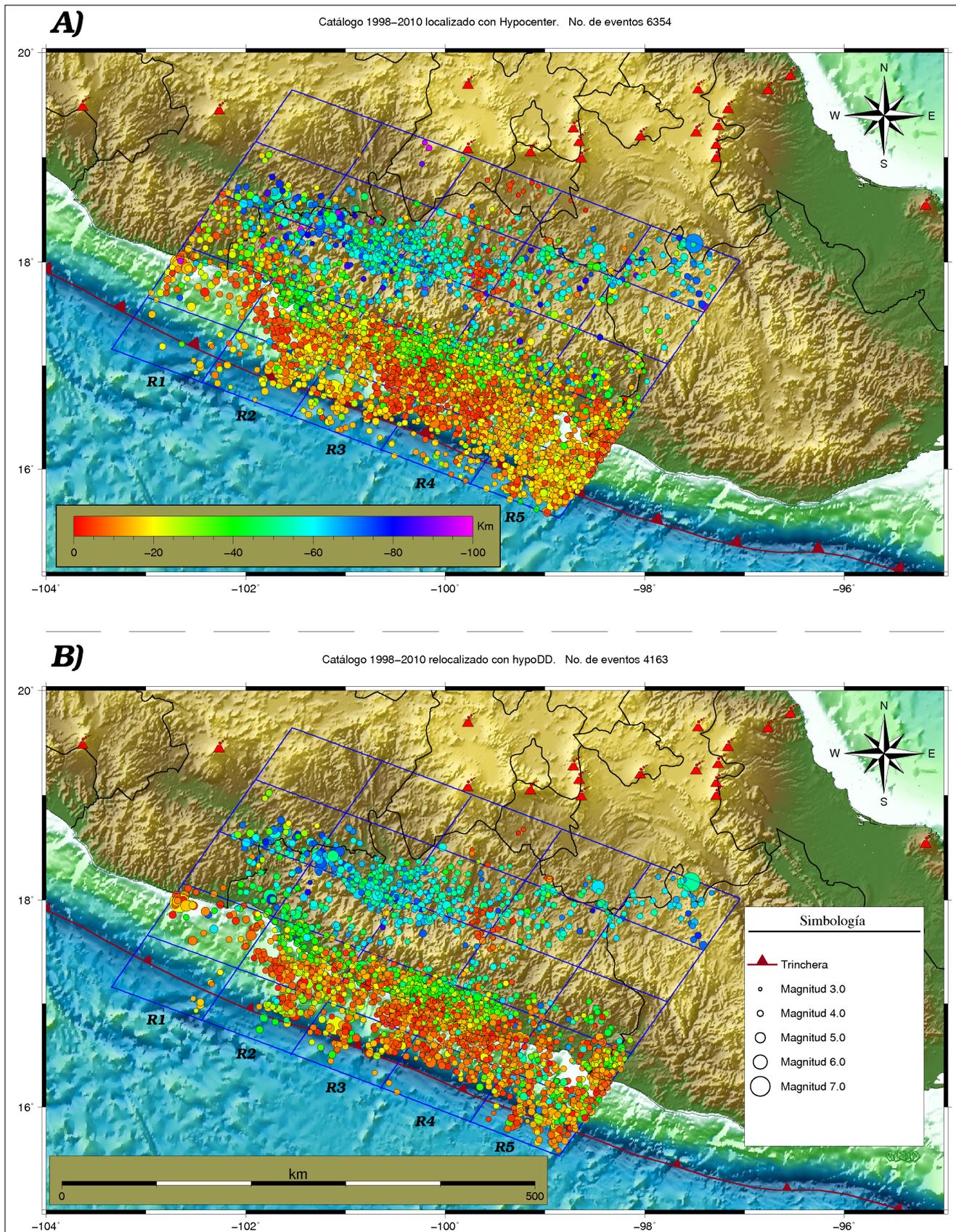


Figura 4.2: (A) Zona de Estudio. En forma visual y sin hacer ningún análisis se distinguen 3 grandes regiones de sismicidad. La Costera, la que sigue la Cuenca del Río Balsas y una en la Zona Central de la misma cuenca. (B) Hipocentros relocalizados con el algoritmo de doble diferencia hypoDD. Se agrupan y definen de mejor forma las tres zonas sísmicas mencionadas en el apartado anterior.

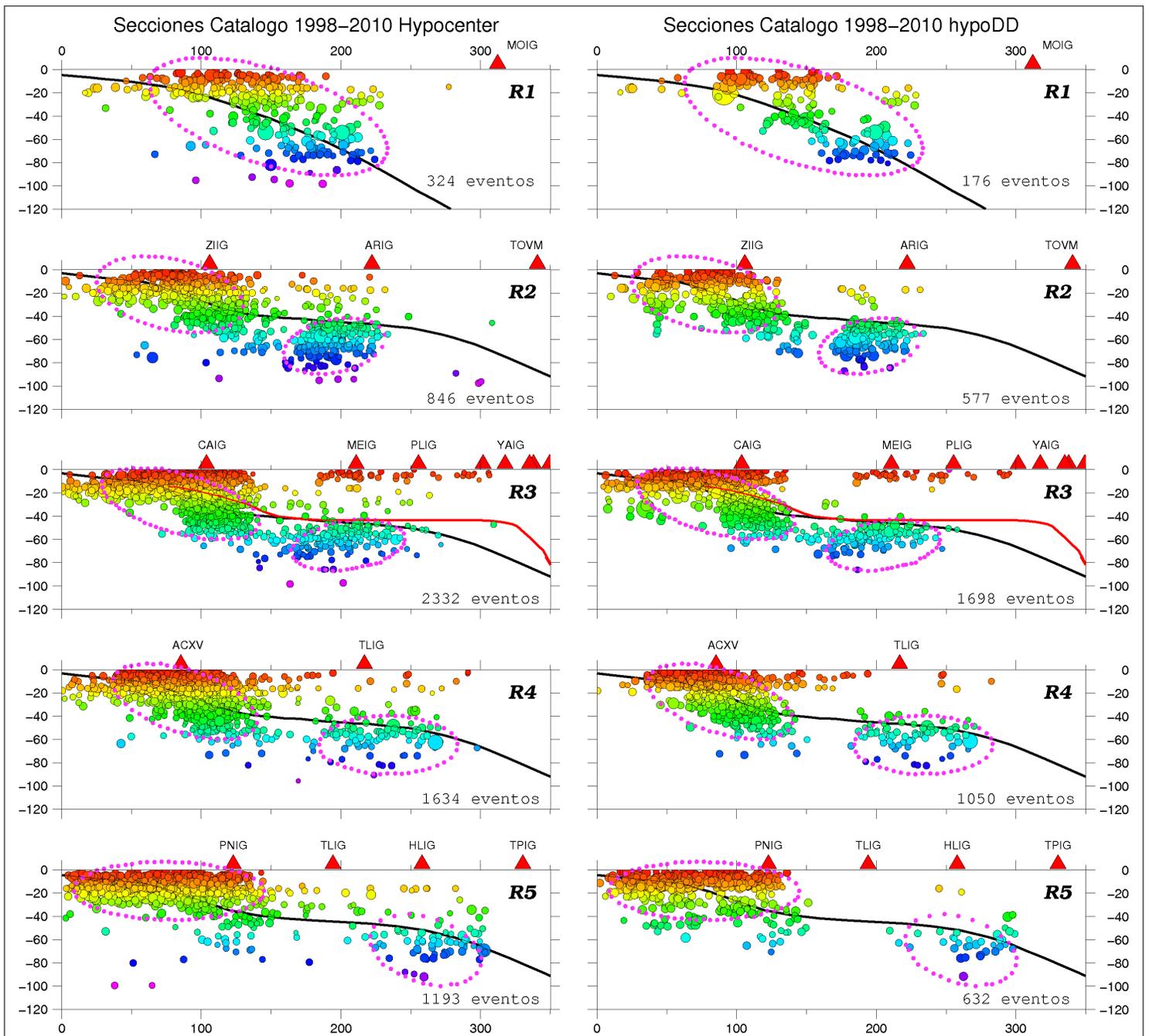


Figura 4.3: **(A)** Secciones para el mapa de hipocentros. En línea negra sólida, la geometría de subducción propuesta por [Pardo and Suárez, 1995] y en línea roja sólida la geometría propuesta por [Pérez-Campos et al., 2008]. En triángulos rojos las proyecciones de los observatorios sísmológicos de la Red Sísmica Nacional. En la región R1 se observa un “defase” en la sísmicidad, visualmente la sísmicidad comienza más hacia el continente que las regiones restantes. Con fines exclusivos de comparación y de forma completamente arbitraria en color magenta se ha trazado en forma aproximada el contorno que sigue la sísmicidad para la ventana dos de análisis. Véase 5.1.2 **(B)** Secciones para el catálogo relocado con hypoDD. Por la naturaleza del algoritmo de doble diferencia en este gráfico las secciones están más limpias y los eventos aislados son pocos.

4.3. Ventana Temporal

En lo que respecta a la ventana temporal, se definieron tres ventanas de tiempo con base en la ocurrencia de los tres sismos lentos más importantes reportados para el estado de Guerrero, [Lowry et al., 2001], [Kostoglodov et al., 2003], [Franco et al., 2005], [Larson et al., 2007] .

Cabe mencionar en esta parte que la ventana de tiempo es arbitraria, y que en un principio se pensó en hacer el análisis por años, sin embargo la escala de tiempo que empleamos los seres humanos no necesariamente corresponde con la dinámica del planeta, por eso se eligió el inicio de estos fenómenos, ya que al parecer son cíclicos, con tasas de recurrencia de 4.5 años [Cotte et al., 2009], buscando así un significado físico para la ventana de tiempo.

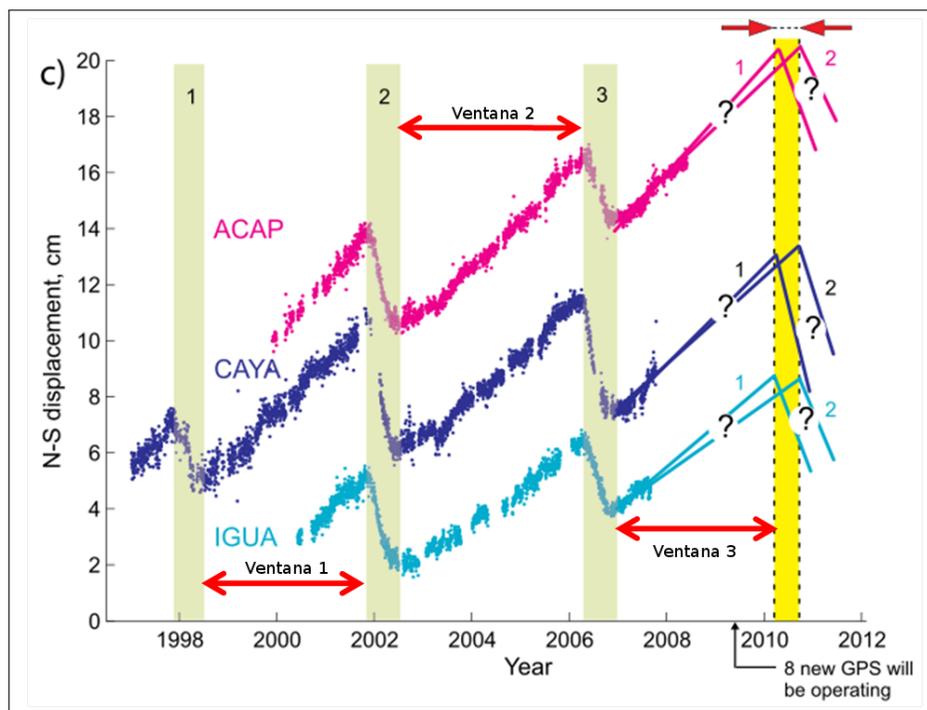


Figura 4.4: Gráfico que muestra las series de tiempo GPS para los tres Sismos Lentos más importantes reportados para el Estado de Guerrero. En este trabajo se empleó el tiempo interevento entre cada SL, que corresponde con una ventana de 4.5 años en promedio. Tomado de [Cotte et al., 2009].

Las tres ventanas de tiempo propuestas son:

- 1998-03-01 00:00:00 UTC - 2001-10-01 00:00:00 UTC
- 2001-10-01 00:00:00 UTC - 2006-04-01 00:00:00 UTC
- 2006-04-01 00:00:00 UTC - 2010-01-01 00:00:00 UTC

4.4. Programa FORTRAN para la Selección de Eventos

Una vez que se extrajo el catalogo de la base de **SEISAN** [Ottemöller et al., 2011] en formato Nórdico, se procedió a convertir el catálogo a un formato legible para el lenguaje Fortran, con la utilidad *report* del mismo paquete de programas

Hecho esto, se presento el problema de hacer la selección espacial y temporal de los eventos para su análisis.

Para el primer problema, se considero el caso de coordenadas planas, y no tomado en cuenta la forma esférica del planeta, ya que nos encontramos en el punto límite (500 km), para no considerar el caso tridimensional [Frez, 2004]

Como nuestra área es romboidal, se formulo el caso de cuatro rectas, se obtuvo la ecuación general de cada una: $AX+BY+C=0$. Por la geometría analítica básica sabemos que si un punto esta contenido en una recta al sustituir en su ecuación general se obtendrá cero, sin embargo si ocurre lo contrario, el punto de análisis está por debajo o por encima de la recta, acorde a la pendiente de la misma. Ver figura 4.5

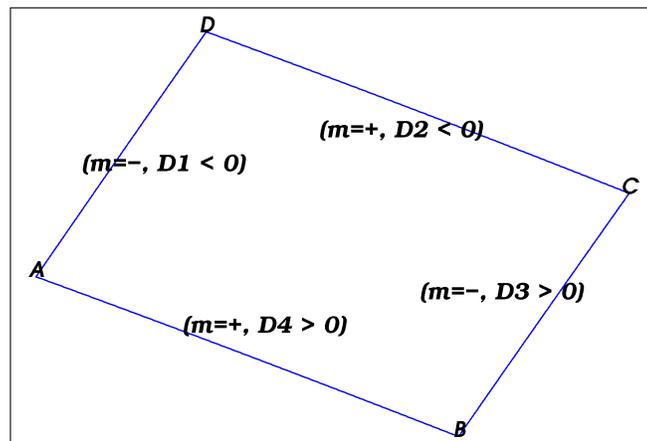


Figura 4.5: Geometría para el problema de un punto dentro de un área romboidal

Trabajando para las cuatro rectas se obtiene el conjunto de ecuaciones siguientes:

$$D1 = A1X + B1Y + C1$$

$$D2 = A2X + B2Y + C2$$

$$D3 = A3X + B3Y + C3$$

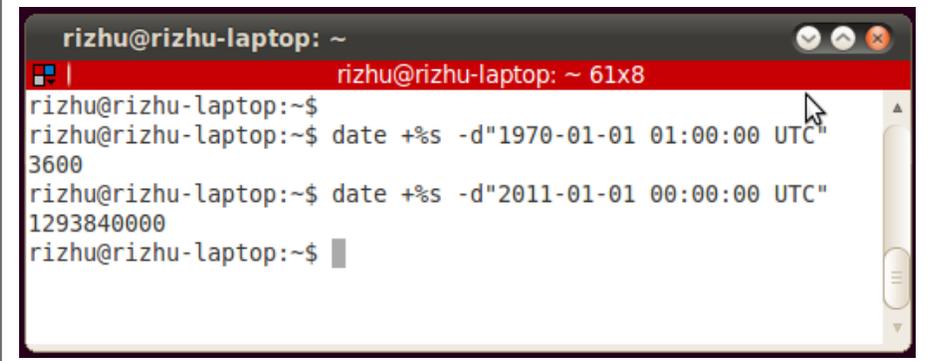
$$D4 = A4X + B4Y + C4$$

Y el problema se reduce a que se cumplan las 4 condiciones para determinar si el punto esta contenido o fuera del polígono.

SI $(D1 \text{ y } D2 \leq 0 \text{ Y } D3 \text{ y } D4 \geq 0)$ El punto esta dentro del polígono.

Una vez hecho esto, el problema se presentó al momento de hacer la selección temporal. En primera instancia se pensó en convertir a día julianos. Sin embargo ya que el trabajo se hizo bajo el Sistema Operativo GNU/Linux, nos percatamos que existe una utilidad llamada `date`, que en una de sus opciones, para una fecha dada se puede calcular el numero de segundos que han pasado desde 1970-01-01 00:00:00 UTC.

La orden en la linea de comando puede verse en la figura 4.6 con lo cual de una manera sencilla se le asigna un número entero a la fecha de cada evento y en el algoritmo la selección se limita a un mayor ($>$) o menor ($<$) que.



```
rizhu@rizhu-laptop: ~  
rizhu@rizhu-laptop: ~ 61x8  
rizhu@rizhu-laptop:~$  
rizhu@rizhu-laptop:~$ date +%s -d"1970-01-01 01:00:00 UTC"  
3600  
rizhu@rizhu-laptop:~$ date +%s -d"2011-01-01 00:00:00 UTC"  
1293840000  
rizhu@rizhu-laptop:~$
```

Figura 4.6: Timestamp. Tiempo en Segundos. Tenemos que para la fecha 2011-01-01 00:00:00 UTC han transcurrido 1,293,840,000 segundos

En resumen las características requeridas del programa FORTRAN diseñado son:

1. Selección de epicentros en una área romboidal.
2. Selección en una ventana de tiempo.
3. Selección en rango de magnitud.
4. Selección en rango de profundidad.

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Ventanas de Tiempo

5.1.1. Ventana Uno

Localizados con Hypocenter

Con base en las ventanas de tiempo propuestas y con ayuda del programa Fortran diseñado se procedió a realizar la selección para cada una de ellas.

El primer intervalo de tiempo corresponde con la fecha dada por:

- 1998-03-01 00:00:00 UTC a 2001-10-01 00:00:00 UTC

Que corresponde con 3.6 años.

En el extremo inferior izquierdo de la figura 5.1.1 se observa el mapa de hipocentros para la Ventana Uno. Para esta ventana, podemos apreciar la disposición geométrica que sigue la sismicidad en la Costa y en la Cuenca del Río Balsas.

En el extremo derecho del mismo gráfico se observan las secciones correspondientes al mapa de hipocentros, donde la sección superior corresponde con el extremo izquierdo de la malla de estudio (frontera con Michoacán), la sección central con la parte media del Estado de Guerrero y finalmente la sección inferior con la parte extrema izquierda de la malla de estudio, la cual colinda con el estado de Oaxaca.

Observamos que la sismicidad, aunque en forma dispersa, cae dentro de las elipses, lo cual en primera instancia podemos suponer como un comportamiento homogéneo.

Para esta ventana tenemos un total de 986 eventos que representan el 15.6% de la población. Predomina la sismicidad Costera sobre la de la Cuenca del Balsas.

De forma incipiente se observan 4 eventos en la parte central del Balsas.

Relocalizados con Hypocenter

Para esta ventana se tiene un total de 554 eventos que corresponde con el 13.4% de los eventos relocalizados y con un 8.76% del total de los eventos. Se define de mejor forma la franja de sismicidad Costera y aunque no tan clara, se observa la franja asociada a la cuenca del Balsas. Se pierden información para la region R5. Por la naturaleza del algoritmo de hypoDD los eventos en la zona Central del Balsas son descartados ya que no logran asociarse con otros pares de eventos.

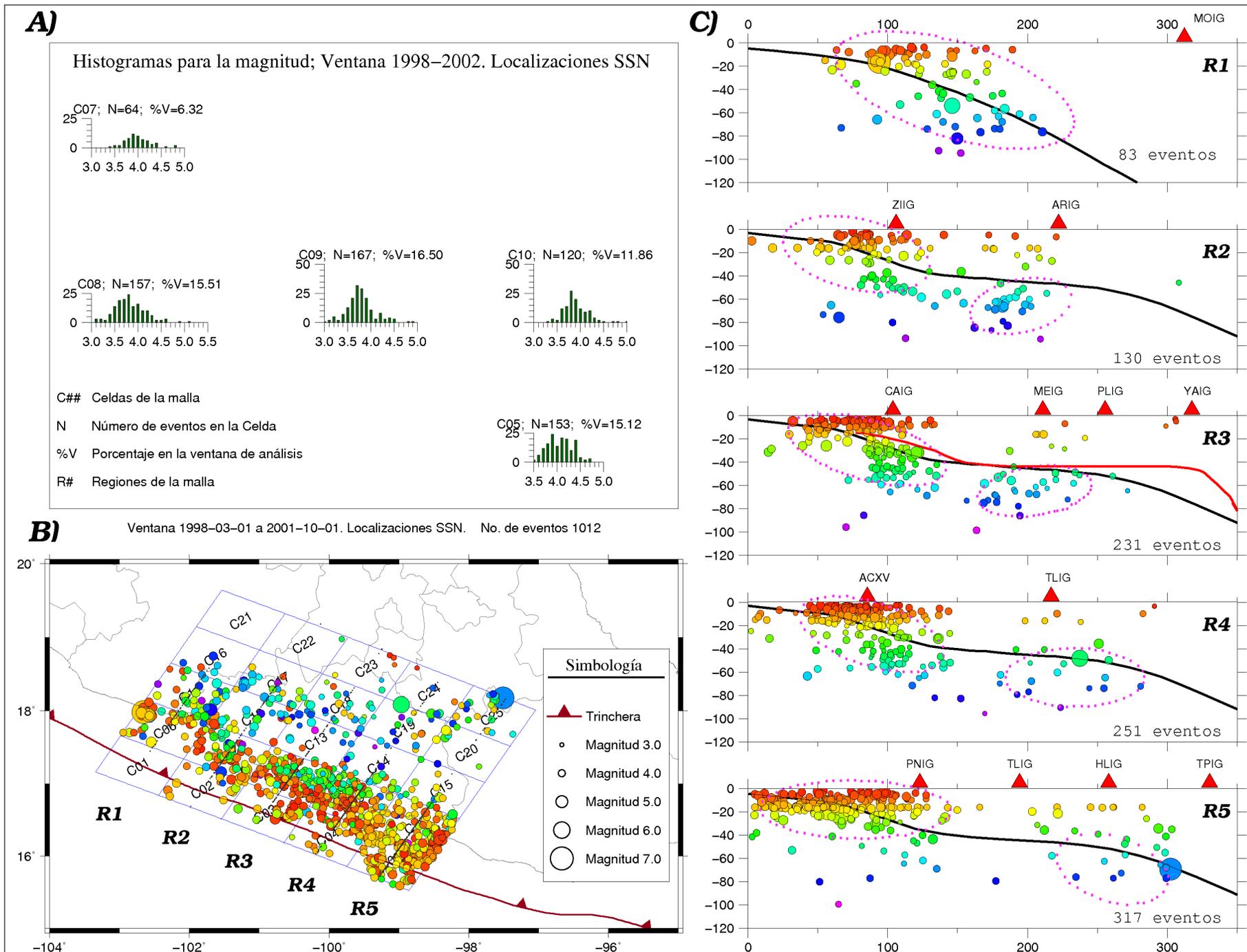


Figura 5.1: Ventana Uno

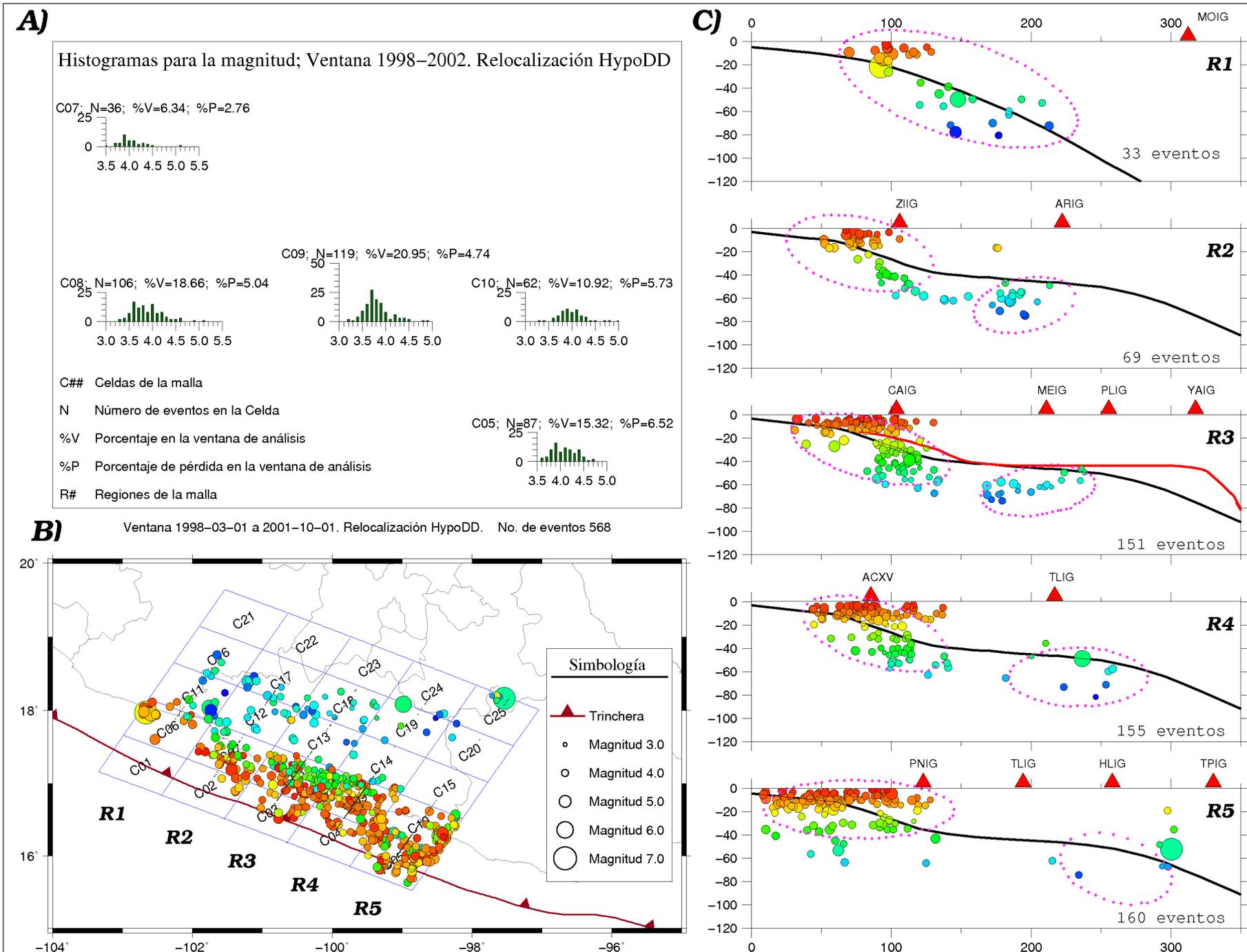


Figura 5.2: Ventana Uno Relocalizada

5.1.2. Ventana Dos

Localizados con Hypocenter

El segundo intervalo de tiempo corresponde con la fecha dada por:

- 2001-10-01 00:00:00 UTC a 2006-04-01 00:00:00 UTC

De 4.5 años. Cabe mencionar que es la ventana más grande de tiempo.

Para esta Ventana tenemos un total de 2654 eventos, que representan el 42% del total. En la figura 5.3 se muestra el mapa de hipocentros y secciones para esta ventana.

Podemos ver que la sismicidad asociada al Río Balsas se define de mejor forma en este gráfico abarcando parcialmente las celdas 11-13, en su totalidad las celdas 16-19 y celdas 24-25. Por su parte la Sismicidad Costera, se agrupa en las celdas 2-5, 7-10, 15 y de forma irregular y dispersa en las celdas 1, 6 y 11. Con al menos 12 eventos existe sismicidad en la parte Central del Balsas, véase las regiones R3 y R4.

Uno de nuestros objetivos es determinar si el comportamiento de la sismicidad durante las tres etapas de análisis es homogéneo, cambia abruptamente o no tiene relación alguna. Para lograr esto tomemos como punto de referencia la celda 2 y veamos su comportamiento al pasar a la siguiente ventana de tiempo (Ventana Tres). Se manifiesta un pequeño desplazamiento (aproximadamente media celda, 30 km) hacia el continente de la nube de sismos para esta zona. Es más notorio en las secciones verticales

Con fines exclusivos de comparación y de forma totalmente arbitraria se eligió la Ventana Dos como patrón de referencia para observar si existe algún desplazamiento en la nube de sismos de las ventanas analizadas. En color magenta, se ha trazado de forma aproximada el contorno que sigue la sismicidad en esta ventana.

Si recordamos las secciones con la totalidad de los datos, figura 4.3, al observar este gráfico podemos percibir que la tendencia en promedio es la misma. La sismicidad en la región R1, sigue la tendencia antes descrita. Se interna más hacia el continente. Sólo falta ver que pasa en la Ventana Tres, para poder evaluar si el comportamiento que se había descrito antes se cumple durante las tres etapas de análisis.

Relocalizados con hypoDD

Mediante el algoritmo de doble diferencia, se define de forma muy clara las franjas de sismicidad Costera (Celdas C2-C5, C7-C10, C1, C6 y C11) y la asociada a la Cuenca del Balsas (C11-C13, C16-C19, C24-C25). El programa hypoDD logra asociar con características comunes los eventos en la zona Central del Balsas.

Para esta ventana tenemos un total de 1721 eventos que representa el 41.6 % de los eventos relocalizados y el 27.2 % del total de la población.

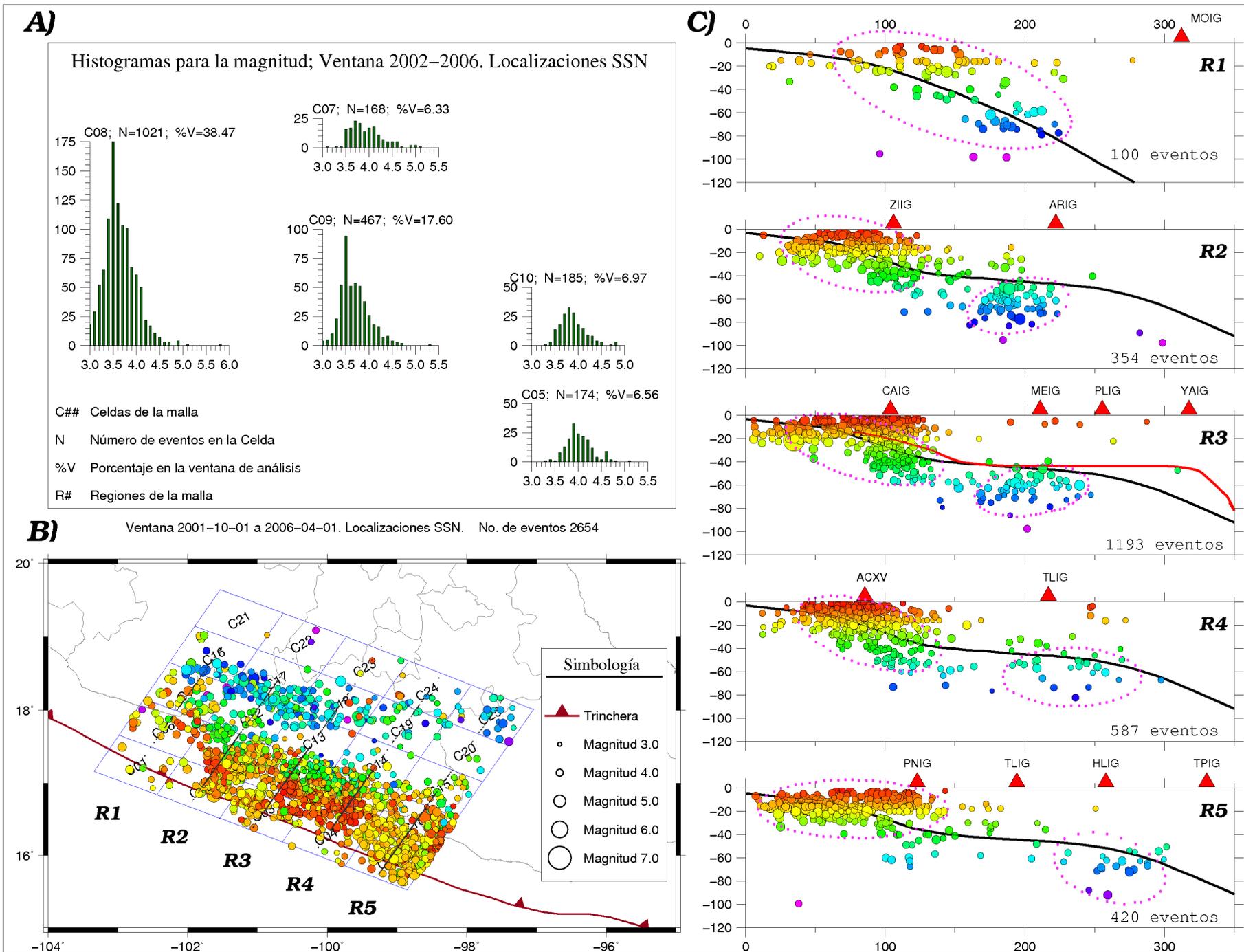


Figura 5.3: Ventana Dos

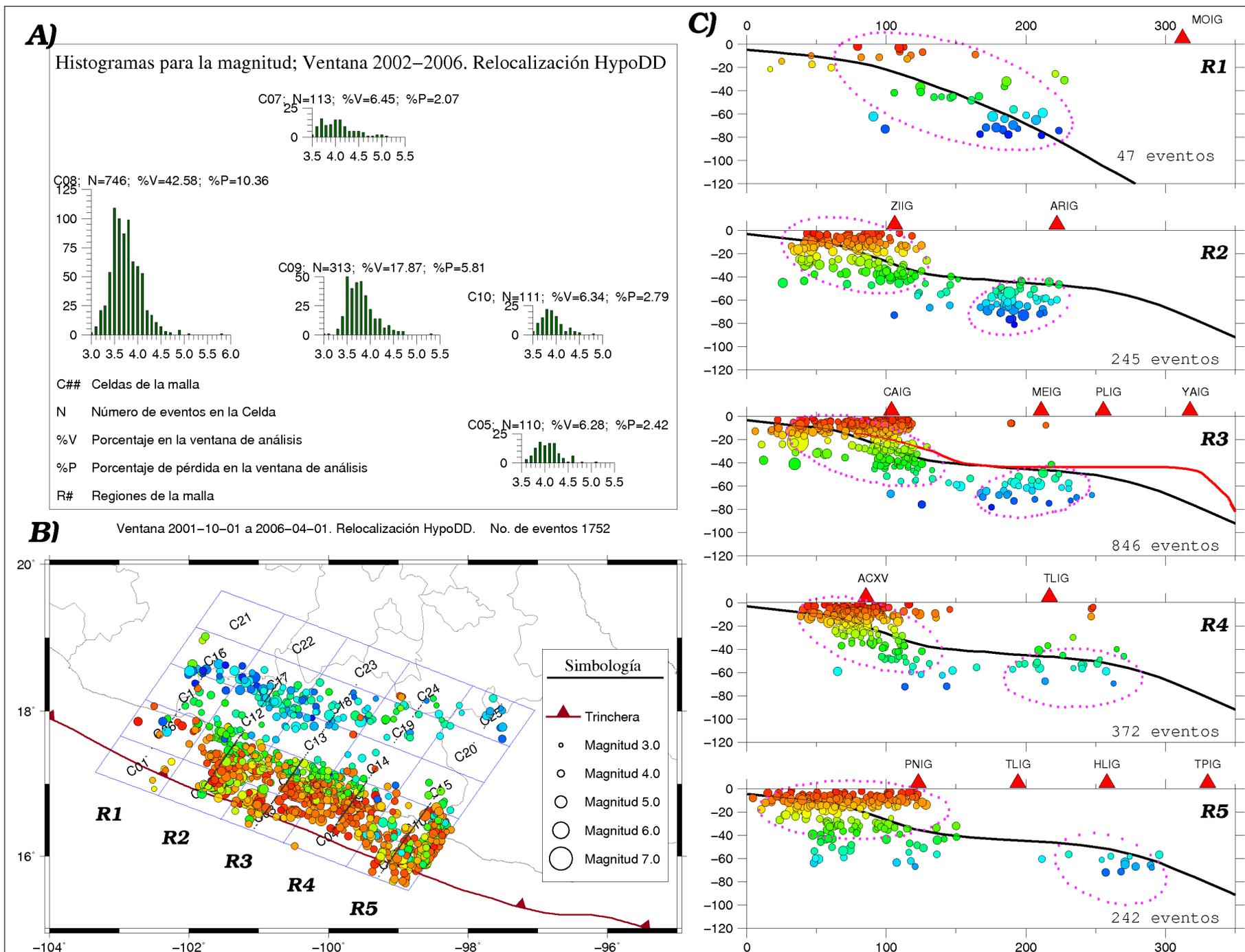


Figura 5.4: Ventana Dos del Catálogo relocalizado

5.1.3. Ventana Tres

Localizados con Hypocenter

El último intervalo de tiempo viene dado por la fecha:

- 2006-04-01 00:00:00 UTC a 2010-01-01 00:00:00 UTC

De 3.7 años.

En este intervalo de tiempo se registraron 2689 eventos que representa el 42.5% de la población. En primera instancia, el hecho de que el porcentaje sea el mismo para las dos últimas ventanas, es un resultado importante, ya que al menos para este periodo, muestra cierta regularidad. En forma global, la tasa de sismicidad no cambio en estos últimos 8 años, a pesar de que los intervalos de tiempo no son exactamente del mismo tamaño (4.5 años vs 3.7 años).

Observemos la posición de las celdas 2 y 3 del gráfico 5.5 (A), comparemos con las celdas C2 y C3 de la figura 5.3 (A). Se manifiesta un pequeño desplazamiento de la sismicidad de la celda C2 hacia el continente. Y lo mismo pasa con la mitad de la celda C3.

Hagamos el mismo análisis, pero ahora con los perfiles. En el gráfico 5.5 (B), se muestran las secciones verticales para la ventana tres. Se observa en la región R2, que la sismicidad sufre un ligero desplazamiento hacia el continente con respecto a la ventana dos. En color magenta se ha trazado el contorno que sigue la Sismicidad Costera en la Ventana Dos, para que sirva como punto de referencia y observar dicho desplazamiento.

Para la región R2, el desplazamiento es muy marcado en la Sismicidad Costera, por el contrario la Sismicidad asociada al Balsas, se mantiene constante en el espacio. Lo mismo ocurre, para las regiones R4 y R5, pero en menor medida.

Es en esta ventana donde se presenta y define la tercera región de sismicidad, región R3, (Zona Central del Balsas).

Relocalizados con hypoDD

En esta ventana se agrupan y definen perfectamente las tres regiones que al inicio de la investigación se habían propuesto.

Para esta ventana la sismicidad somera en la parte central en la Cuenca del Balsas se consolida como un grupo con características comunes en el espacio.

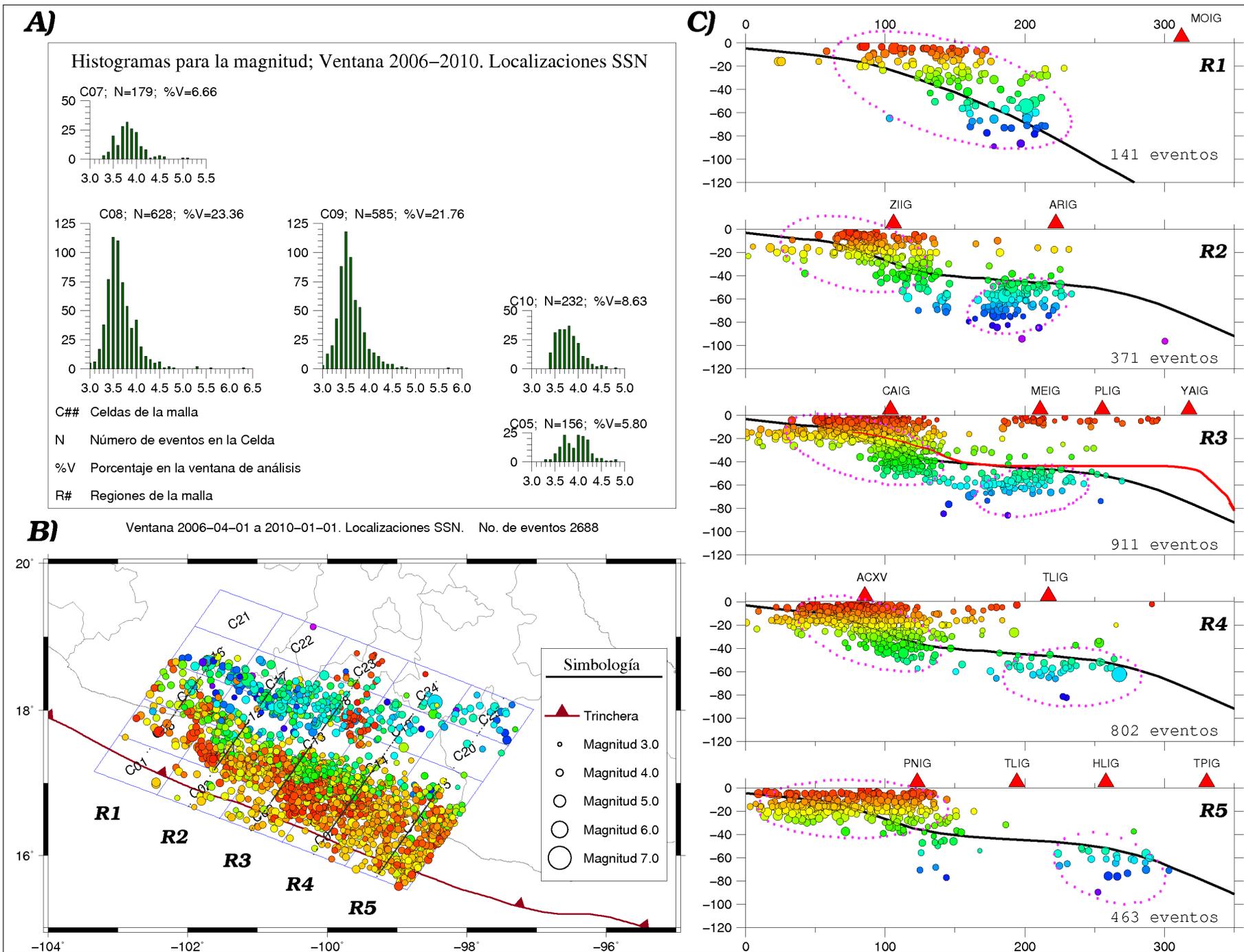


Figura 5.5: Ventana Tres

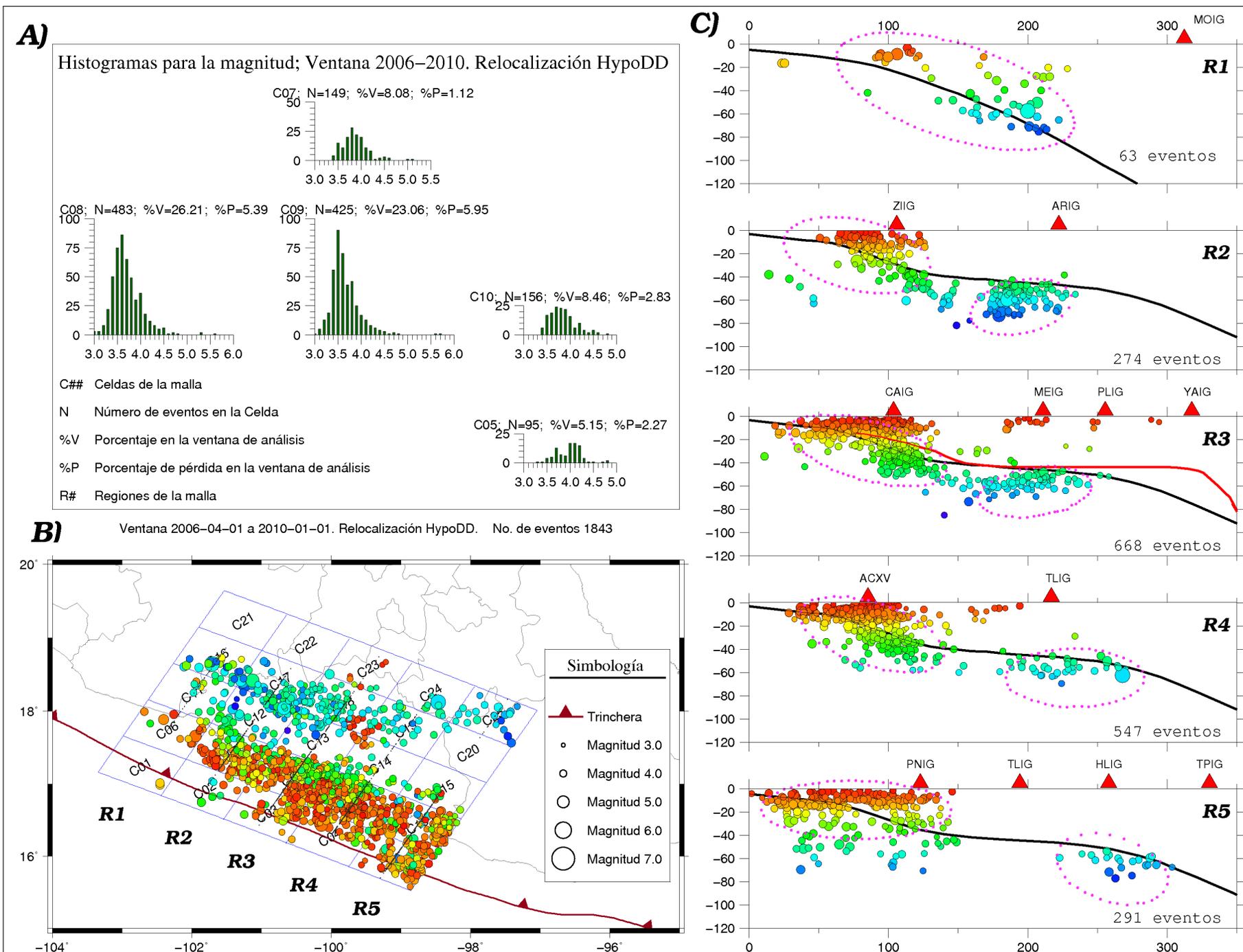


Figura 5.6: Ventana Tres Relocalizada

5.2. Comparativo Visual

5.2.1. Ventanas de tiempo analizadas con Hypocenter

En el gráfico 5.7 se muestra un comparativo de las tres ventanas de tiempo antes de relocalizar.

Para la región R1 observamos un comportamiento muy homogéneo en las tres ventanas de tiempo. Comparada con las regiones restantes, la sismicidad es escasa y se interna hacia la plataforma continental.

Para la región R2 se observa un pequeño desplazamiento de la sismicidad Costera hacia el continente de la Ventana Dos hacia la Ventana Tres.

La región R3 se muestra muy estable. Sin embargo concentra la mayor actividad sísmica (Ventana Dos). Nótese que en las Ventana Uno y Dos se observa una incipiente sismicidad en la zona central del Balsas. Es en la Ventana Tres donde se define la sismicidad asociada a esta zona.

Para la Región 4 el comportamiento es muy homogéneo.

Finalmente para la Región 5 el comportamiento también es homogéneo a excepción de la primera ventana que muestra sismicidad somera en la cuenca del Río Balsas.

5.2.2. Ventanas de tiempo analizadas con hypoDD

Persiste el desplazamiento observado (Ventana Dos a Ventana Tres) antes de llevar a cabo la relocalización.

Aparecen ciertos huecos en la región R2 en la Ventana Dos relocalizada, no así en la Ventana Tres. Para el catalogo antes y después de relocalizar, la Sismicidad asociada al Río Balsas no manifiesta cambios importantes.

Tenemos problemas en los extremos de la malla. Por una parte la sismicidad en las celdas C1 y C6 es escasa en el catalogo original. Al hacer la relocalización los eventos en estas 2 celdas en su mayoría son descartados. Por otra parte el hueco se presenta en donde solo hay dos estaciones ZIIG y MMIG, para el caso de PNIG, se observa que en la relocalización, los eventos se hacen más profundos, además se observa cierta aleatoriedad.

Podemos considerar que el catalogo utilizado tiene mucha calidad, ya que la relocalización no cambio abruptamente los hipocentros, al menos donde se tiene una cobertura azimutal excelente. Y tenemos problemas en los extremos, ya que no contamos con el número adecuado de estaciones y el algoritmo de doble diferencia se ve limitado.

Los porcentajes para cada ventana con hypocenter y hypoDD son muy parecidos (15.6 % vs 13.4 %) para la Ventana Uno, (41.6 % vs 41.64 %) para la Ventana Dos y (42.5 % vs 44.9 %) para la Ventana Tres. Con lo cual podemos observar que el algoritmo de doble diferencia quito información en la misma proporción para cada ventana y no hay un sesgo en los resultados.

Las secciones se muestran más limpias. Los hipocentros se aglomeran en las elipses de referencia. Lo cual es lógico si recordamos que el algoritmo de doble diferencia busca pares de eventos ligados a otros pares de eventos para formar conjuntos con propiedades espaciales denominados *clusters*.

Con dos métodos diferentes (Hypocenter vs hypoDD) persiste el desplazamiento en la Región R2. La pregunta a responder es la siguiente, ¿Se puede considerar este desplazamiento como anómalo?

Tal vez hasta analizar el siguiente ciclo (Próximo Sismo Lento) se pueda responder.

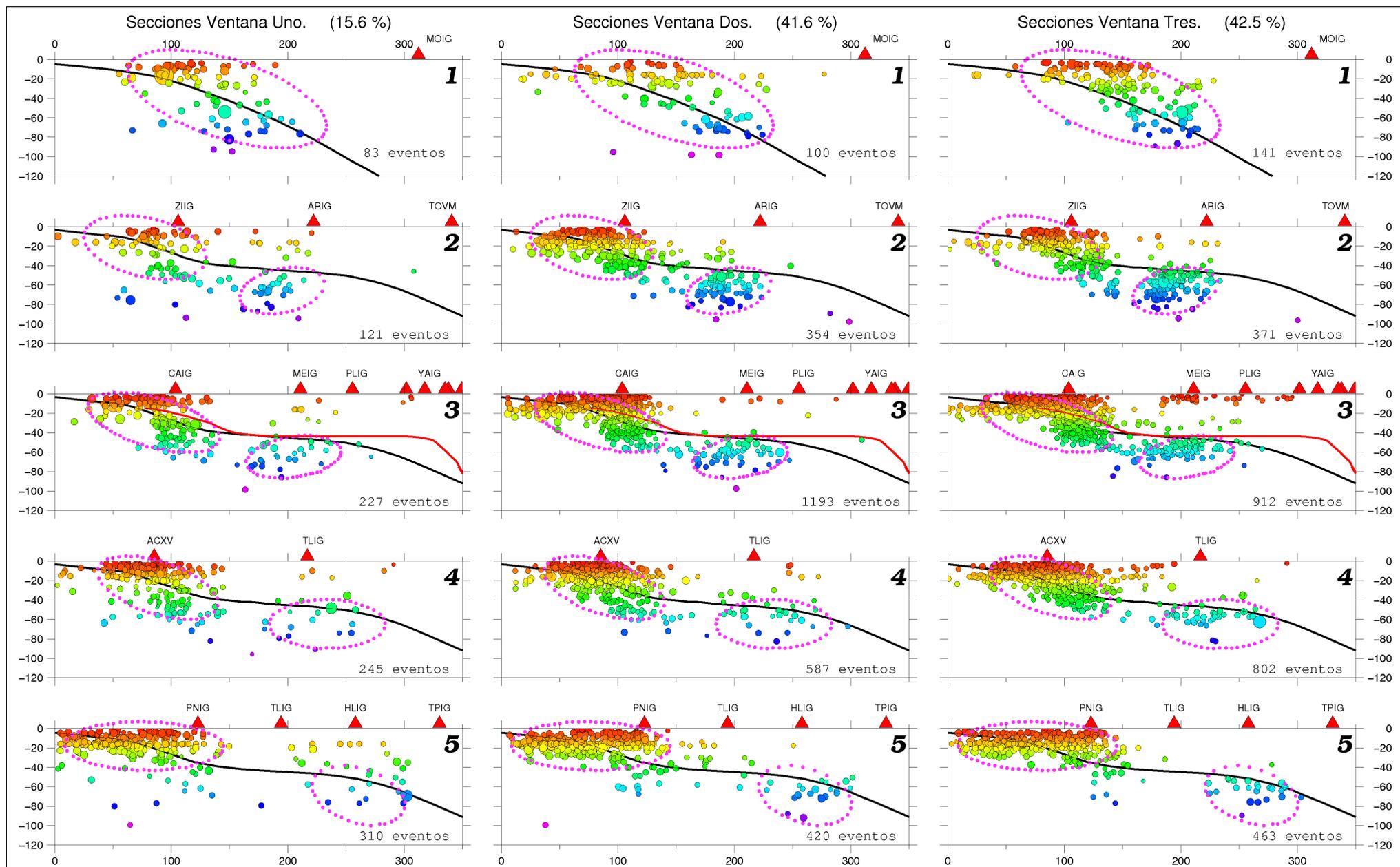


Figura 5.7: Tres Secciones Hypocenter

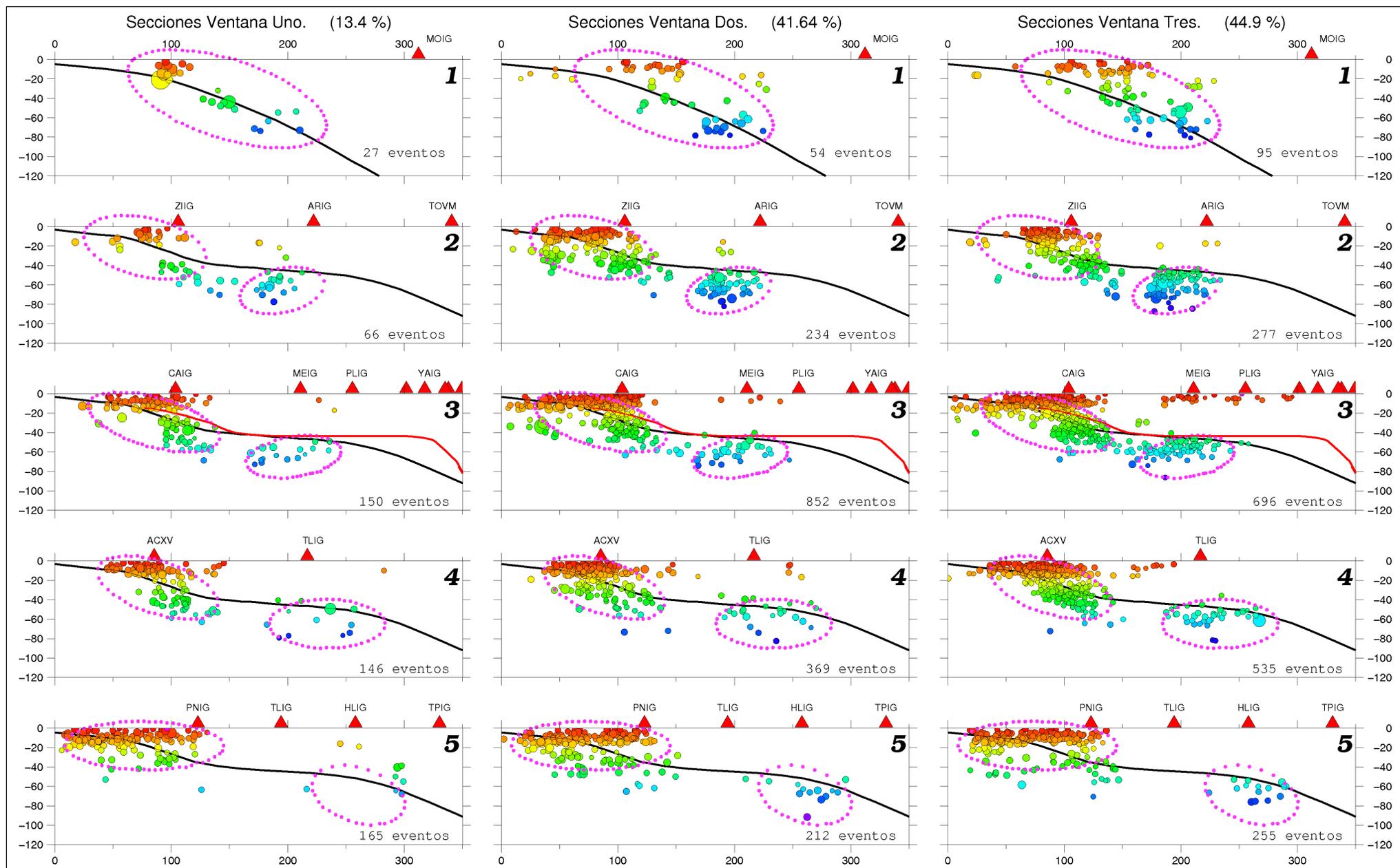


Figura 5.8: Tres Secciones hypoDD

5.3. Análisis Estadístico Básico

5.3.1. Histogramas Catálogo 1998-2010 localizados con Hypocenter

Como un ejercicio simple para analizar la ocurrencia y distribución de la sismicidad, se realizaron los histogramas de frecuencia para cada celda de la malla de estudio, en el gráfico 5.9 se muestran para el catálogo de análisis. En el eje de las abscisas la magnitud, contra la frecuencia de ocurrencia en el eje de las ordenadas. Se indica el número de eventos (N) para cada celda, así como el porcentaje (%C) que representa en el catálogo. En disposición vertical las regiones R1, R2, R3, R4 y R5. Se muestra un esquema del arreglo de las celdas, así como las tres zonas sísmicas principales y subregiones que presentan un comportamiento que puede ser de interés.

La sismicidad Costera se encuentra distribuida principalmente en las celdas C02-C05, C06-C10, C11 y C15, siendo muy escasa en la celda C01, ver figura 5.9 (en color amarillo). Las celdas que presentan eventos con magnitudes mayores a $M=6.0$ son (C03, $M=6.3$) y (C06, $M=7.0$). Para esta región (Costera) el porcentaje con que contribuye al catálogo de estudio corresponde con el $\%C=83$.

Nótese que en las celdas C08 (Brecha sísmica de Guerrero) y C09 se concentra el $\%C=47.72$ de la información del catálogo. En ese mismo orden C05, C07 y C10 contribuyen con el $\%C=22.57$. Este subconjunto, que de ahora en adelante denominaremos S789105 (en color azul claro), por el número de las celdas que la integran aporta el $\%C=70.14$ y es evidente que presenta un comportamiento especial que las celdas que le rodean. Suena atractivo verificar si este comportamiento ¿Es el mismo en las tres ventanas de análisis?

Pasando a la siguiente región, la sismicidad en la cuenca del Balsas se encuentra distribuida en las celdas C12-C14, C16-C19, C24-C25 (en color gris claro), siendo muy escasa en las celdas C20, C21 y C22. Para esta zona, las contribuciones de cada celda son bastante regulares, con valores que van de $\%C=0.5$ a $\%C=2.75$. Con base en los porcentajes, se distinguen 2 zonas; la franja comprendida entre C12-C14 y las celdas C17 y C18 donde el porcentaje es muy homogéneo (2.2 a 2.75 %). Y las celdas C19, C24 y C25 donde la contribución varía entre 0.5 y 1.14 %. Este resultado aunado a la salida del programa hypoDD, nos sugiere que esta zona se puede dividir en dos regiones, ver sección 5.4.

Las celdas que presentan eventos con magnitudes mayores a $M=5.5$ son (C16, $M=5.6$) y (C24, $M=5.7$). Esta zona contribuye con el $\%C=15$ al periodo 1998-2010.

Finalmente la sismicidad en el Balsas Central, se encuentra distribuida principalmente en las celdas C18 y C23, con magnitudes que varían entre ($M=3.0$ - $M=4.8$) y que representa el 1 % de la sismicidad total.

En el gráfico podemos ver por ejemplo como el sismo de magnitud $M=6.3$ en la celda C03 influye en que la celda C08 tenga mayor actividad sísmica que las que le rodean. Sin embargo aunque este sismo contribuye con sus replicas, es importante destacar que la Celda 08 es la que presenta mayor actividad sísmica durante el periodo de estudio, contra lo que inicialmente

supondríamos al conocer que se trata de una brecha sísmica. Con lo cual podemos afirmar que para el estado de Guerrero en este rango de magnitudes la brecha sísmica no existe.

5.3.2. Histogramas Catálogo 1998-2010 relocalizado con hypoDD

En el gráfico 5.10 se muestran los histogramas de frecuencia para el catálogo relocalizado con el algoritmo de doble diferencia hypoDD. Se muestra para cada celda el número de eventos (N), el porcentaje (%R) que representa para el catálogo relocalizado, así como el porcentaje de pérdida (%P) con respecto al catálogo original. Dada la naturaleza del algoritmo de relocalización, el número de eventos disminuye para cada celda reflejándose principalmente en la zona Costera con un porcentaje %P=28, mientras que para la zona del Balsas con un %P=6, sumando así un total de %P=34.

Las celdas que más información pierden son C08 y C09, (%P=7.22 y %P=6.26 respectivamente) sin embargo su comportamiento es el mismo antes y después de la relocalización, en ambos casos presentan la mayor actividad sísmica que las celdas que las circundan y se concentra el %R=52.4 de la información en ellas. Lo mismo sucede para las celdas C05, C07 y C10, que en su conjunto aportan el %R=20.45.

La zona Costera contribuye con el %R=83.7 al catálogo relocalizado y la cuenca del Balsas con el %R=15.8, con lo que no se altera en nada la proporción antes y después de efectuar la relocalización. Este resultado es interesante ya que podemos confiar en los resultados obtenidos con este método. Y que las tres zonas que al inicio del estudio hemos propuesto en verdad existen y comparten características espaciales. Falta determinar si comparten características temporales. El análisis de las ventanas de tiempo nos permitirá establecerlo o no.

Con base en la tasa de sismicidad del subconjunto S789105 (%R=72.85), en forma individual como grupal y que contrasta con la de las demás zonas, podemos determinar que el comportamiento de las celdas C08 y C09 es anómalo, debido a que presentan mayor sismicidad que el resto que la circundan. Esto podría sugerir un mayor estado de esfuerzo, en dichas celdas, por lo que proponemos que sí una de ellas es excitada y es capaz de generar un sismo fuerte (M=7.6, área que originalmente se propuso para las celdas), existe alguna posibilidad real de que excite a las celdas contiguas y el sismo pueda ser de mayor magnitud, como algunos autores han sugerido. □

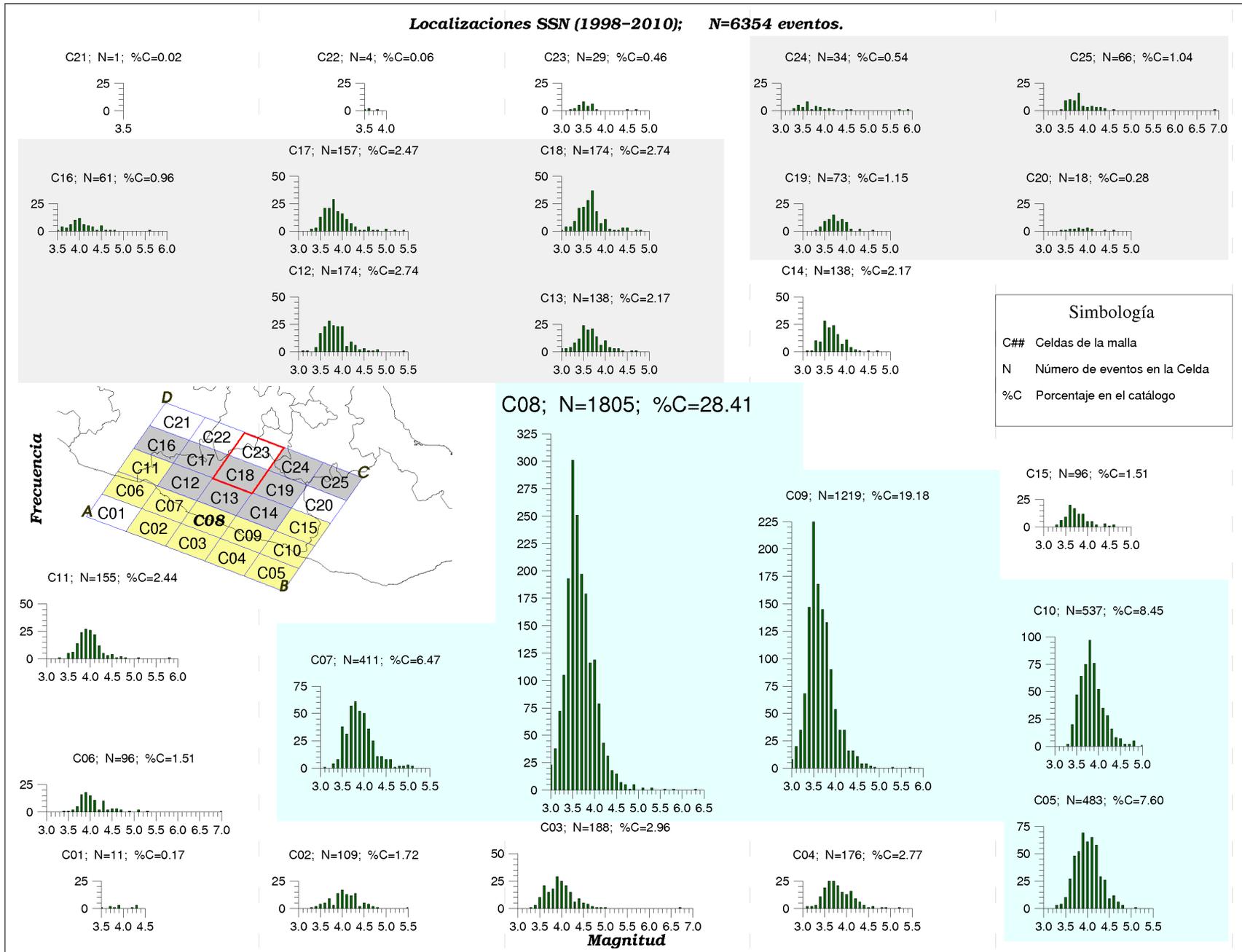


Figura 5.9: Histograma de Frecuencias para el catálogo de estudio.

Relocalización HypoDD (1998-2010); N=4163 eventos.

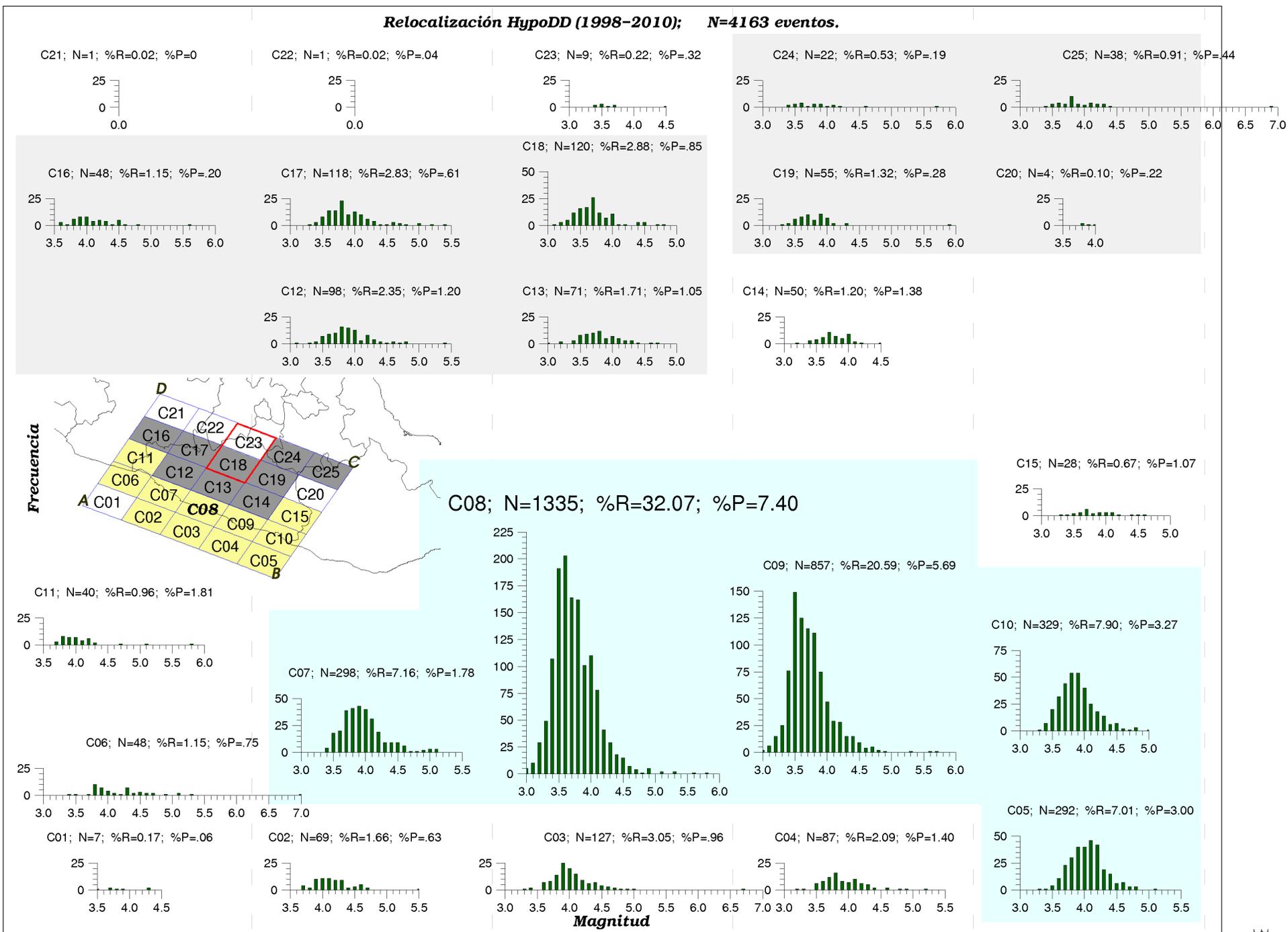


Figura 5.10: Histograma de Frecuencias para el catálogo de estudio relocalizado.

5.3.3. Histogramas Ventana Uno

Siguiendo el mismo procedimiento que en la sección 5.1, se realizaron los histogramas de frecuencia para la magnitud en las tres ventanas de tiempo propuestas, esto con el objetivo de observar otras características que no son tan fáciles de visualizar en los mapas de hipocentros.

En términos de eventos esta ventana es la que contribuye con menor información, ya que para un periodo de 3.6 años presenta 984 eventos, $\%C=15.55$ de la población. En el gráfico 5.11 se muestran los histogramas de frecuencia para la magnitud, se indica el número de eventos (N) así como el porcentaje ($\%V$) que representa para el periodo de análisis. En color azul y gris claro se muestran subzonas sísmicas de interés.

Las celdas C08 y C09 presentan el ($\%V=15.65$ y $\%V=16.77$), lo que representa el $\%V=32.42$ de la información en la ventana de estudio. Sin embargo, aunque con una proporción diferente al catálogo, las celdas C05, C07 y C10 presentan porcentajes altos ($\%V=15.04$, $\%V=5.89$ y $\%V=12.09\%$, respectivamente). El subconjunto (C07, C08, C09, C10 y C05) aporta el $\%V=65.44$. La zona Costera en esta ventana contribuye con el $\%V=82.4$.

La zona del Balsas contribuye con el $\%V=17.77$. Se conserva la proporción para las dos zonas (Occidental y Oriental) en la cuenca del Balsas. Esta ventana mantiene la proporción con el catálogo.

5.3.4. Histogramas Ventana Uno Relocalizada

En el gráfico 5.12 se muestran los histogramas para la Ventana Uno del Catálogo relocalizado. Se indica el porcentaje con respecto a la Ventana relocalizada ($\%RV$), así como el porcentaje de pérdida con respecto al mismo periodo de tiempo, que para este caso es de $\%PV=43.7$.

La pérdida para la zona Costera es del 35.6% mientras que para la cuenca del Balsas del 8.2% . Sin embargo, una vez más las proporciones se mantienen en el subconjunto S789105, con el $\%RV=72$.

El porcentaje con que contribuye la zona Costera es del $\%RV=83$ y para la cuenca del Balsas $\%RV=17$. A pesar de perder casi la mitad del catálogo, la proporción para los dos análisis (hypocenter y hypoDD) es el mismo. Hasta este momento el subconjunto S789105 presenta los valores $\%C=70.14$, $\%R=72.81$, $\%V1=65.44$ y $\%VR1=72$, para el Catálogo de estudio, el Catálogo relocalizado, Ventana Uno y Ventana Uno relocalizada, respectivamente. Lo que nos indica regularidad en esta subzona. En la siguiente sección analizaremos el caso para las Ventanas Dos y Tres, para poder validar o no su comportamiento a través del tiempo.

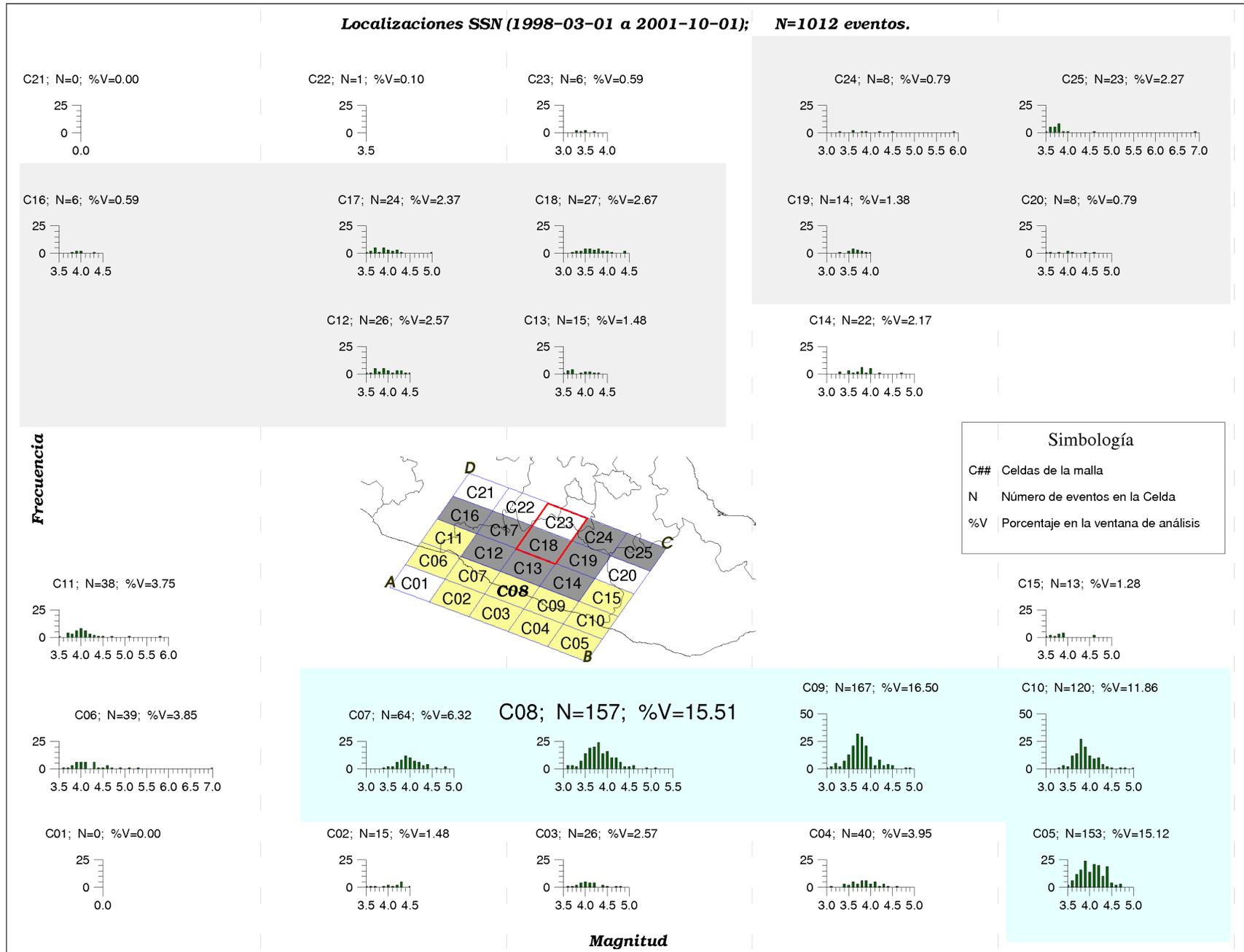


Figura 5.11: Histograma de Frecuencias para la Ventana Uno.

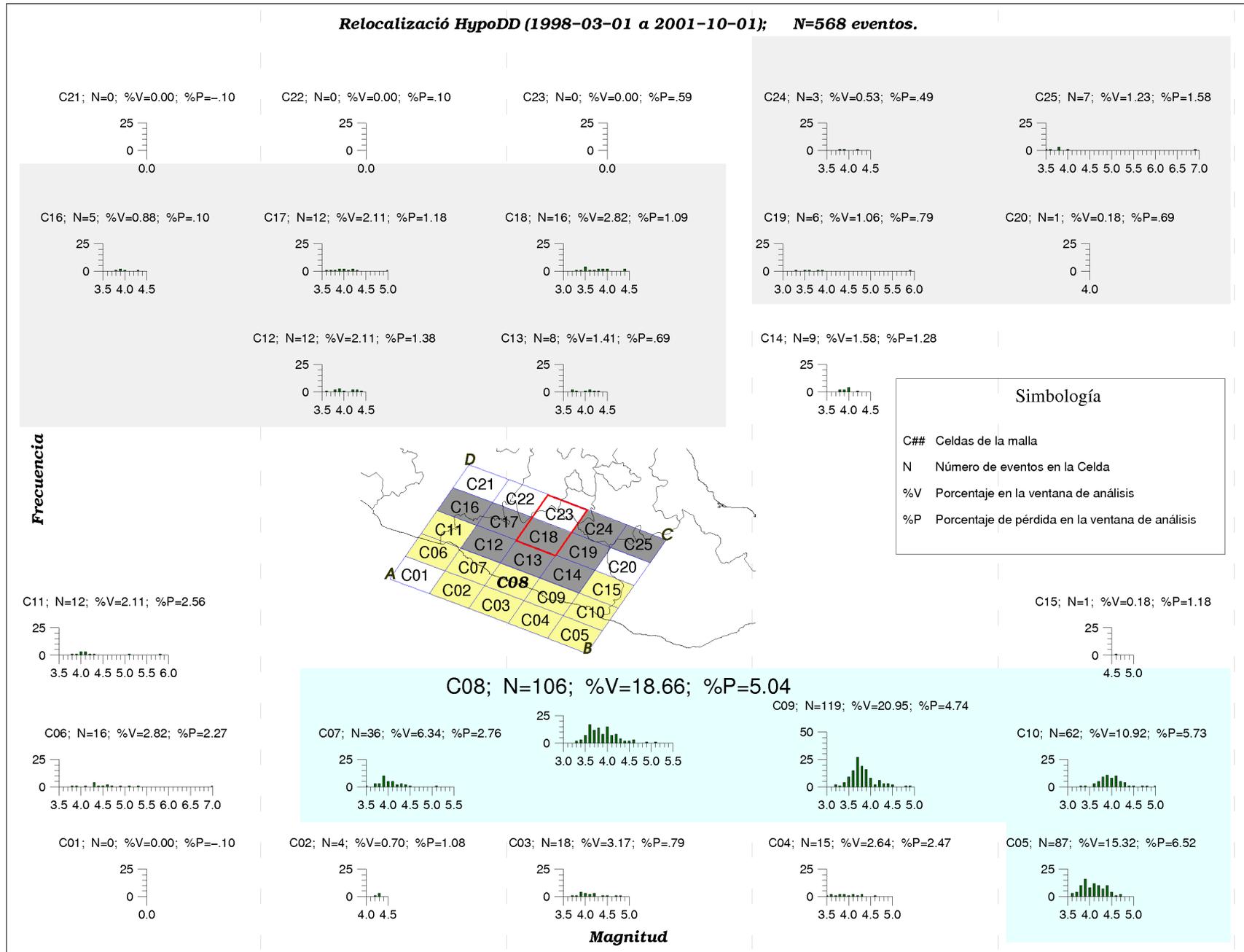


Figura 5.12: Histograma de Frecuencias Ventana Uno hypoDD.

5.3.5. Histogramas Ventana Dos

Analizaremos la ventana de tiempo de mayor tamaño (2002-10-01 a 2006-04-10) de 4.5 años. Consta de 2654 eventos, 45 % del catálogo, repartidos de la siguiente manera: zona Costera %V=87.91 y cuenca del Balsas %V=12.07.

En el gráfico 5.13 se muestran los histogramas de frecuencia para la magnitud. Se enlista el número de eventos (N) para cada celda y el porcentaje (%V) que representa en Ventana de tiempo).

Para este periodo las celdas C08 y C09 presentan el %V=56.03 de la información de la ventana.

La cuenca del Balsas presenta %V=12.07. El subconjunto S789105 provee el %V=75.89 de información en este periodo. Se conserva la proporción para la zona Oriental y Occidental de la cuenca del Río Balsas.

5.3.6. Histogramas Ventana Dos Relocalizada

Esta subconjunto de datos está formado por 1721 eventos, lo que implica una pérdida de información del %PV=35.17 con respecto a la ventana de análisis, repartida de la siguiente forma: 30 % para la zona Costera y 5 % para la cuenca del Balsas, manteniendo la proporción con respecto a la totalidad de los datos. Nuevamente las celdas que más información pierden son las celdas C08 y C09 (10.25 % y 6.26 % respectivamente).

El subconjunto S789105, aporta el %VR=77 de la información. Se mantiene la proporción para la zona del Balsas Oriental y la zona del Balsas Occidental. Ver figura 5.14.

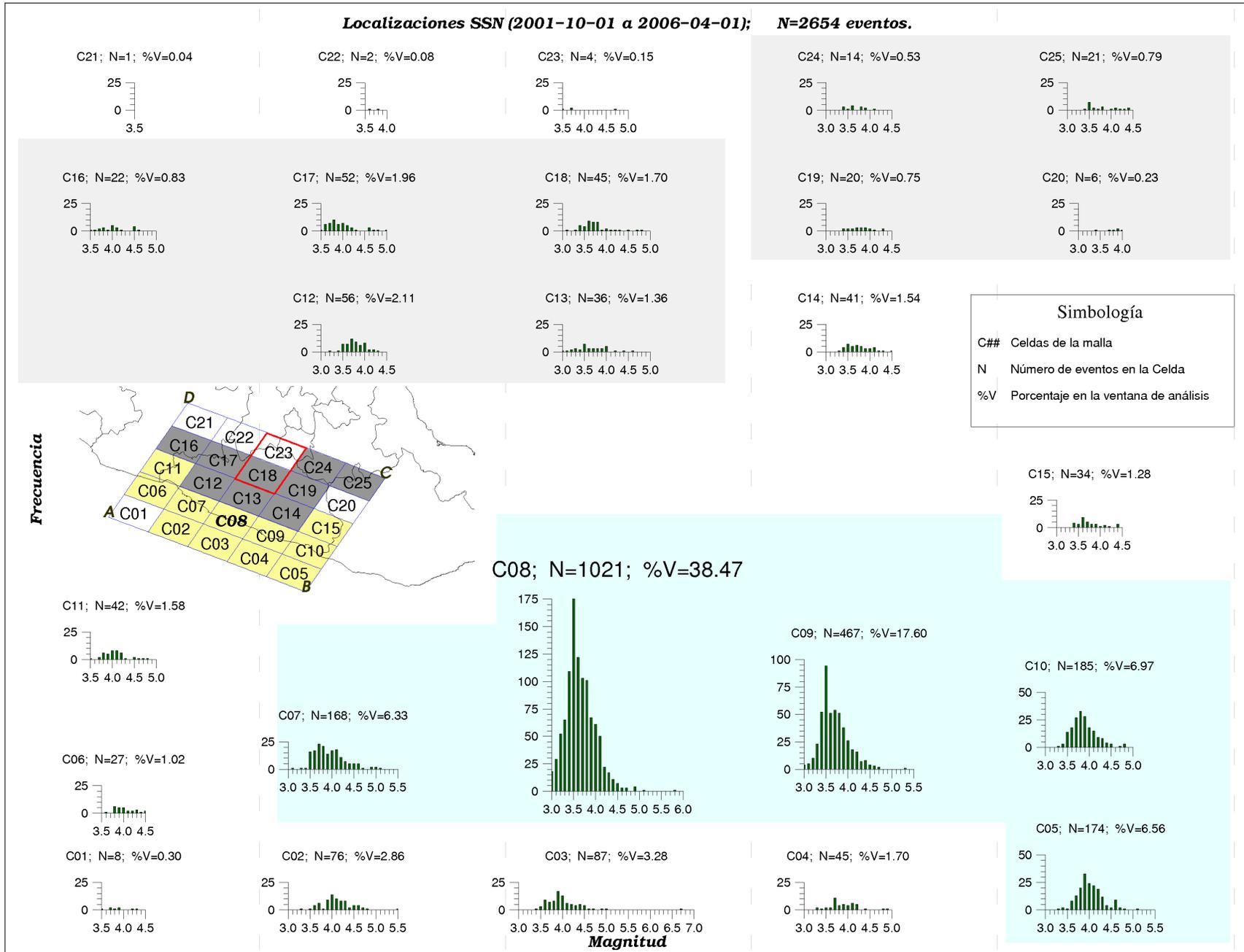


Figura 5.13: Histograma de Frecuencias Ventana Dos.

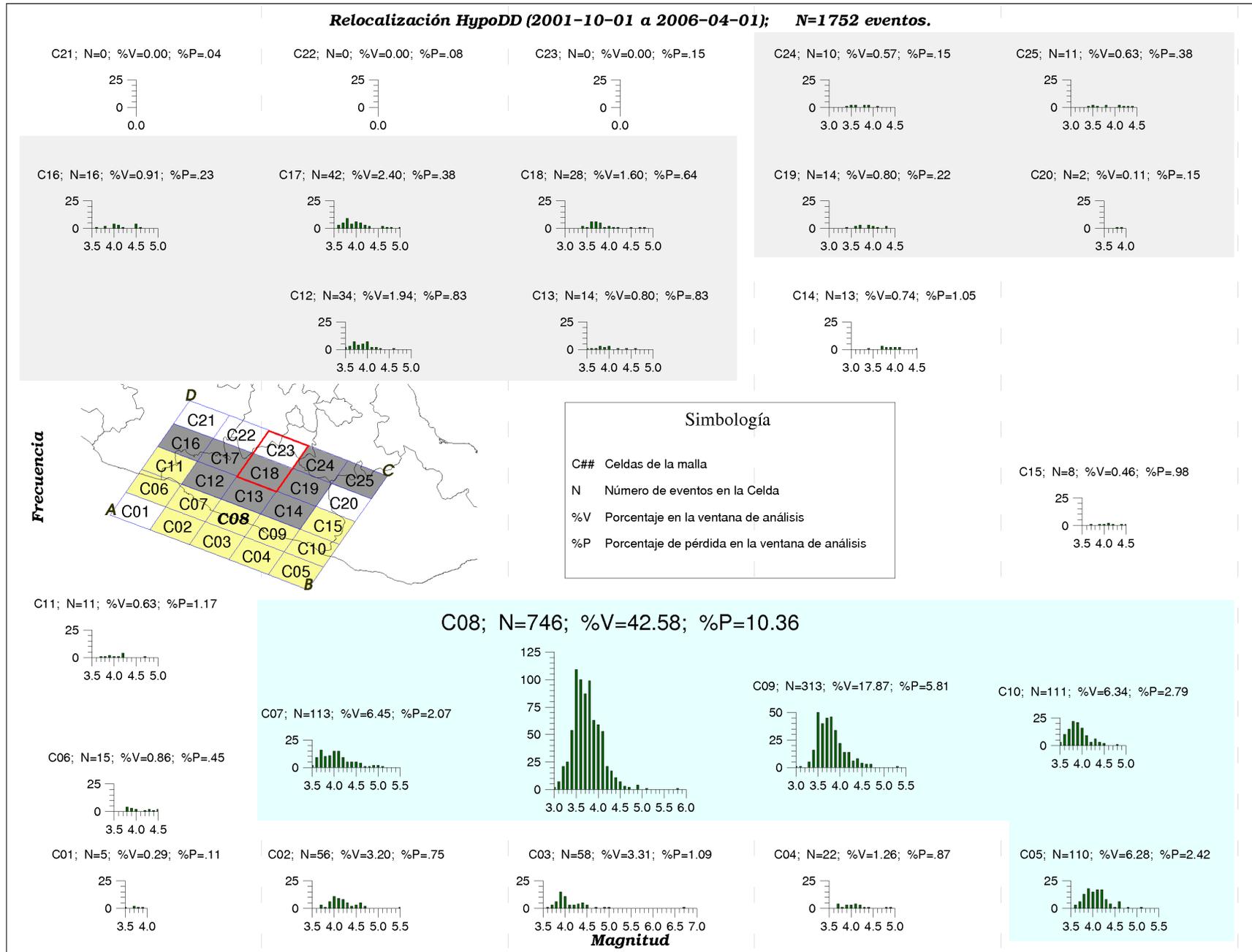


Figura 5.14: Histograma de Frecuencias Ventana Dos Relocalizada.

5.3.7. Histogramas Ventana Tres

Finalizamos el análisis estadístico con el periodo 2006-2010 que abarca una totalidad de 2689 eventos. Lo cual representa el 42 % de la información del catálogo. En el gráfico 5.15 se muestran el número de eventos (N) para cada celda, así como los porcentajes (%V) que representa de la Ventana de estudio.

Realizando los mismos cálculos la contribución se distribuye de la siguiente manera: 79 % para la Costa y 20 % para la Cuenca del Balsas, 1 % para la Zona del Balsas Central. Solo en esta ventana es claramente identificable la zona tres (Balsas Central).

Las celdas que más información aportan son las C08 y C09 con el 48.7 %. El Comportamiento del subconjunto S789105 es similar al catálogo de datos, presentandose nuevamente como una anomalía y contribuyendo con el 66.2 %.

La distribución en la cuenca del Balsas es homogénea. Se distinguen las dos zonas propuestas como Balsas Occidental y Balsas Oriental.

5.3.8. Histogramas Ventana Tres Relocalizada

Al hacer la selección de la Ventana Tres sobre el catálogo relocalizado. Nos arroja 1858 eventos, lo que representa una pérdida del 31 % de los datos. Las ventanas que más información pierden nuevamente son C08 y C09. Ver figura 5.16

El subconjunto S789105 aporta el 68.3 % de los datos sobre la selección de la Ventana Tres en el catálogo relocalizado.

La división en la cuenca del Balsas se conserva.



Figura 5.15: Histograma de Frecuencias Ventana Tres.

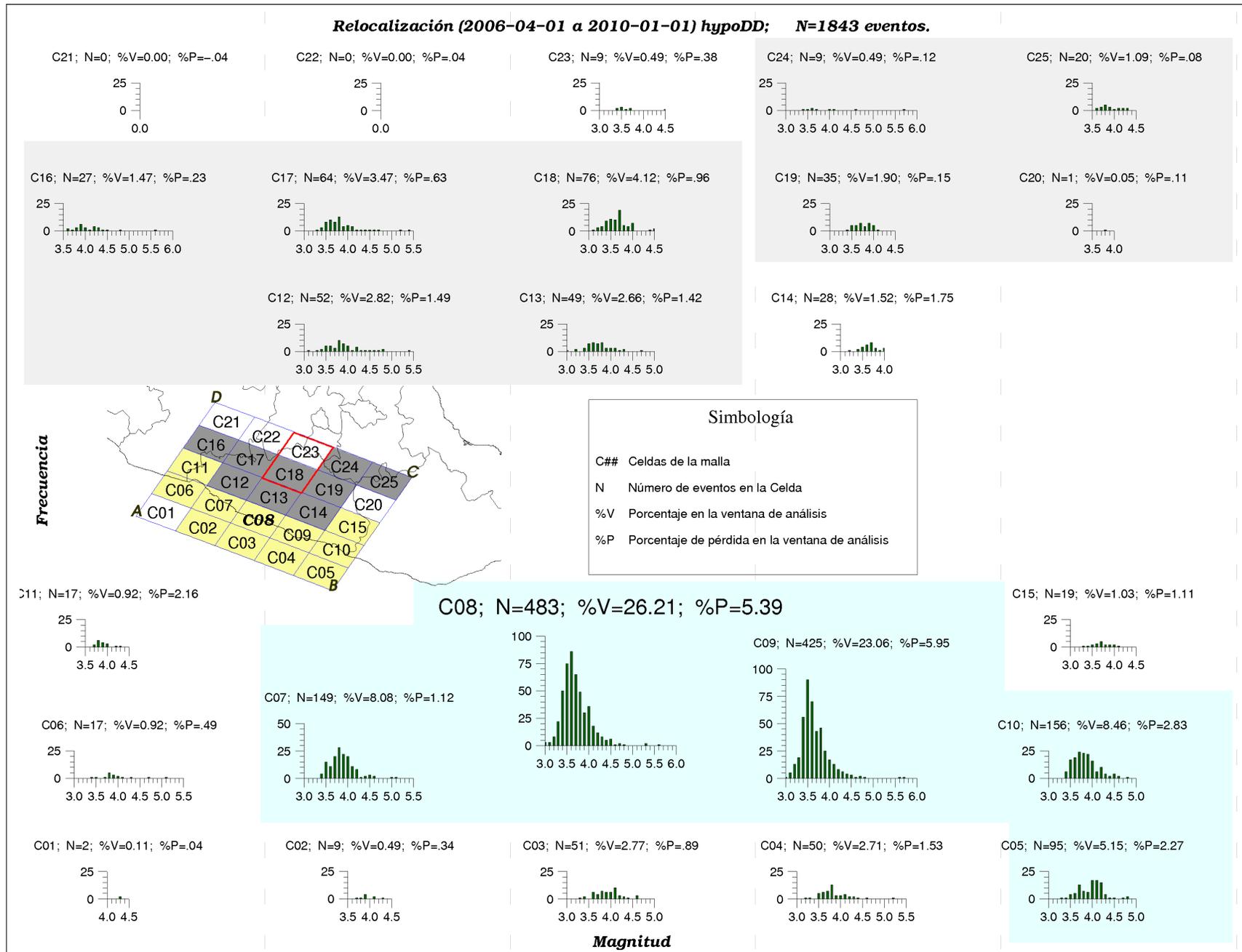


Figura 5.16: Histograma de Frecuencias Ventana Tres Relocalizada.

5.4. Subzonas de Sismicidad

Al inicio del trabajo comentamos que sin hacer ningún tratamiento a los datos, se distinguen 3 grandes zonas de sismicidad. El algoritmo de doble diferencia toma en cuenta eventos que comparten características espaciales y los agrupa en “clusters”. Al realizar nuestras pruebas con este algoritmo y elegir cual de las salidas es la que más se ajusta a lo que conocemos, escogimos la que nos dio por salida los subconjuntos que se muestran en el gráfico 5.17.

Ahora bien ¿Es valido dividir la sismicidad en la Cuenca del Balsas en dos subregiones, Balsas Occidental y Balsas Oriental? o ¿Sólo es un artificio del programa de relocalización? La primera región es paralela a la trinchera y la segunda es oblicua a la misma, solo por la geometría parece razonable. Las profundidades medias para ambas regiones están en el rango de 40-80 Km y desde este enfoque no parece haber una división. En el análisis de los histogramas en la ventanas de tiempo, con base en la tasa sísmica para cada celda, cabe la posibilidad.

Los alcances de este trabajo no nos permiten establecer efectivamente si esta zona se pueda dividir o no, pero planteamos la idea para que otra investigación pueda determinarlo, surge la inquietud de saber si ¿Esta zona es una sola?, ¿Se comporta como una sola? y ¿De que manera interactúa con las otras?

Responder a estas interrogantes contribuirá a la caracterización de la sismicidad en el Estado de Guerrero y el entendimiento del fenómeno. Sin embargo eso es tema para otra investigación.

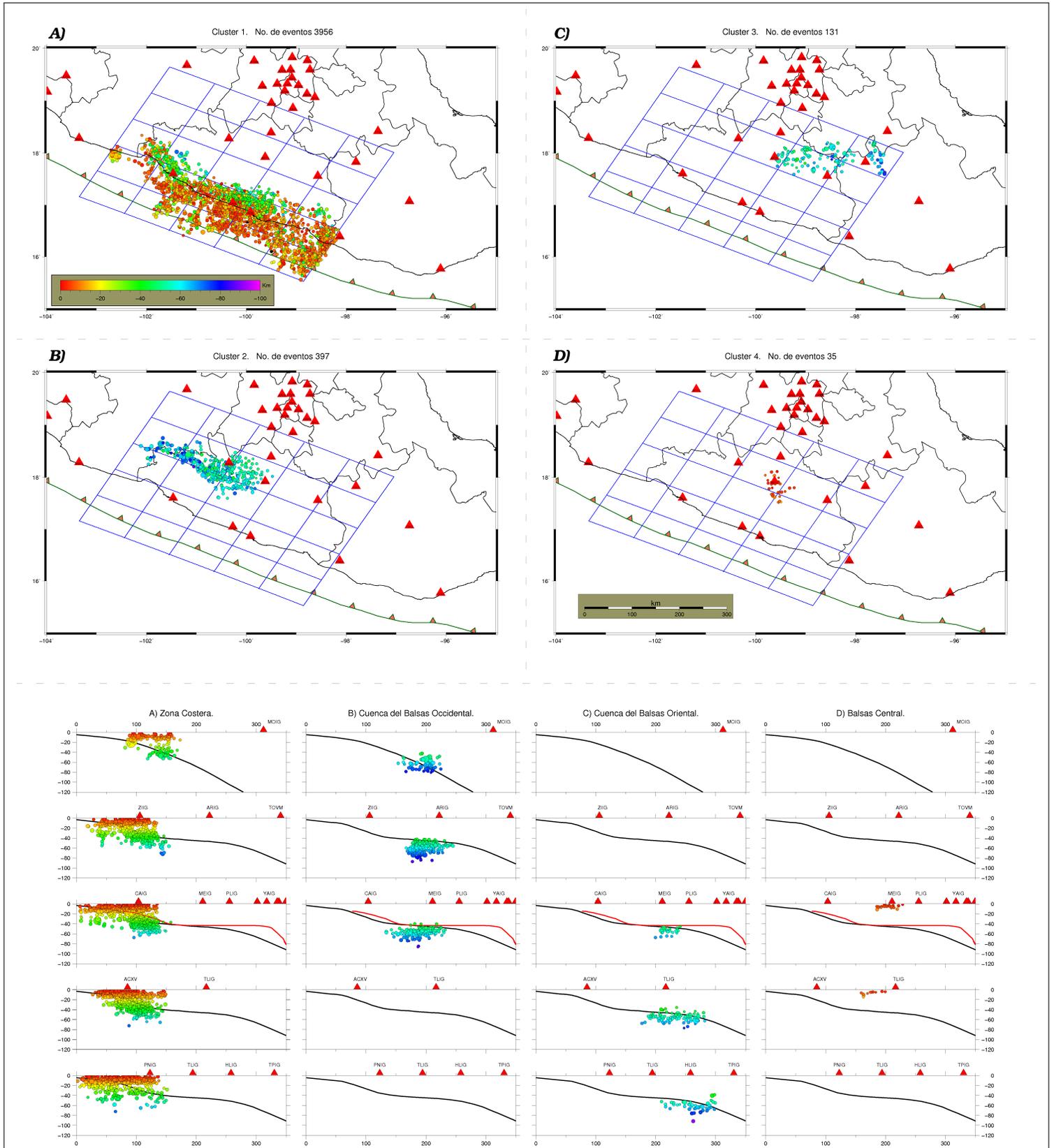


Figura 5.17: Subzonas de sismicidad que arroja el programa hypoDD.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

Una vez hecho el análisis correspondiente, responderemos a las preguntas que nos hicimos al inicio de la investigación.

1. ¿Cuál ha sido la evolución de la sismicidad en el Estado de Guerrero en los últimos 12 años?

Con base en el tiempo interevento entre la ocurrencia de los tres Sismos Lentos (**SL**) más importantes reportados para el estado de Guerrero, se proponen 3 etapas de análisis (**1998-2002**, **2002-2006** y **2006-2010**).

Para el periodo **1998-2010**, se distinguen tres grandes zonas de sismicidad, la que es paralela a la Costa (**SC**) y que contribuye con el 83% de la información sísmica, la sismicidad en la Cuenca del Río Balsas, alejada 70 Km al SW de la trinchera y 120 Km al NE (**SCB**), que aporta el 16% de los eventos y finalmente la sismicidad en la parte central de la Cuenca del Balsas (**SBC**) que refleja el 1%.

La relocalización mediante el algoritmo de doble diferencia *hypoDD*, nos permitió constatar que en efecto estas tres zonas comparten características espaciales comunes.

El análisis mediante las ventanas de tiempo nos permitió corroborar que la sismicidad **SC** (83%) y la sismicidad **SCB** (16%), es constante en tiempo y espacio. La sismicidad **SBC** (1%) es claramente identificable en la Tercera Ventana y dispersa en las dos primeras.

Nuestro Catálogo consta de localizaciones con un máximo de $RMS=1.0$, lo que implica una incertidumbre de hasta 8 kilómetros, que para nuestros fines es suficiente. Al comparar las localizaciones entre *Hypocenter* y *hypoDD*, no se aprecia un cambio significativo en la geometría que dibuja la sismicidad, sin embargo nos ha ayudado a definir y restringir las tres principales zonas de sismicidad.

2. ¿Hoy tiembla mas que hace 12 años?

La respuesta es no, aunque el numero de eventos es diferente para cada una de las ventanas de tiempo, la proporción se mantuvo estable para el periodo 1998-2010. Es cierto que ahora tenemos mayor capacidad de detección al contar con nuevas estaciones que mejoran la cobertura y el umbral de detección y es la razón principal por la cual ahora se reportan más sismos.

3. ¿Para este periodo el comportamiento y la tasa de sismicidad son constantes?

Contamos con los elementos suficientes para decir que sí, ya que la proporción es la misma para cada Ventana de tiempo y para el catálogo completo, así como para el catálogo relocalizado y las ventanas bajo este catálogo. Para todo el análisis, siempre se cumplieron las mismas condiciones, lo cual tiene algunas implicaciones como veremos en el siguiente punto.

4. ¿Existe alguna anomalía que indique la cercana o futura ocurrencia de un sismo fuerte en la zona?

La malla propuesta para el análisis de la sismicidad en el estado de Guerrero consta de 25 celdas, el área de cada una es proporcional a la proyección del área de ruptura para sismos de magnitud ($M=7.6$), el área más probable con la que puede romper la brecha sísmica de Guerrero.

Al realizar el análisis, la Celda C08, ubicada en la parte central de la malla de estudio y que corresponde con la Brecha Sísmica de Guerrero, presenta la mayor actividad sísmica en la zona de estudio, además la celda vecina C09, aunque en menor medida también presenta una gran actividad. Ambas celdas forman parte de un subconjunto en la sismicidad costera (**SC**) que se identifica como una anomalía. Una de las explicaciones a este hecho la encontramos en el estudio realizado por [Liu et al., 2007] en el que se deduce que los tres sismos lentos más importantes reportados en el estado de Guerrero están correlacionados con altas tasas de sismicidad.

El sismo en Honshu Japon, ($M_w=9.0$, 2011), ha abierto un debate en torno a si existen los sismos característicos, esto es las zonas de ruptura son constantes en el tiempo, un sismo debe romper el área de ruptura que previamente había roto, o puede romper en áreas contiguas, con lo que la magnitud es mayor.

La gran incógnita no gira más en torno a si ocurrirá un sismo de magnitud $M=7.4$ a $M=7.6$ en las costas de Guerrero. ¿Es posible que este sismo que se espera para México pueda ser mucho mayor?, ¿Tal vez de magnitud mayor a $M=8.4$? [Suarez et al., 1990], [Anderson et al., 1994], [Valdés-González and Novelo-Casanova, 1998], [Suarez and Albini, 2009]. En este sentido “No debemos extrañarnos por sismos de magnitud $M=9.0$ en lugares donde aún no es conocido (para nosotros) que han ocurrido (aunque probablemente esas áreas han tenido sismos de magnitud $M=9.0$ en el pasado geológico.)” [Showstack, 2011]

La posibilidad de que la zona de subducción genere eventos de gran magnitud esta confirmada por el sismo de Jalisco 1932 ($M_w=8.2$), el sismo de Colima 1995 ($M_w=8.0$) y el sismo de

Michoacán 1985 ($M_w=8.1$) [Ramírez-Herrera et al., 2009]. Hace 10 años esto hubiese sonado descabellado y la intención no es generar alarmismo, sin embargo estos recientes eventos nos han venido a confirmar que la predicción sísmica está muy lejos de lograr serlo.

Nuestros resultados arrojan que la sismicidad en las celdas que rodean a la Brecha de Guerrero, así como esta, es homogénea y constante en el tiempo. Si la brecha sísmica es capaz de generar sismos fuertes, las condiciones pueden ser las adecuadas para que se activen zonas de debilidad, tales como las del sismo de 1957 $M_w = 7.8$ y del sismo de 1962 $M = 7.1$ [Ortiz et al., 2000], ver figura 4.1 B.

¿Es hoy el futuro más incierto? Hace diez años asumíamos saber la región y magnitud para el próximo gran sismo en México. Hoy a la luz de estos grandes sismos, ya no se puede asegurar esto. Lo que sí podemos afirmar es que en la medida que caractericemos mejor el fenómeno sísmico en nuestro país y seamos capaces de transmitirlo a la sociedad, estaremos en condiciones de superar las adversidades que de ellos deriven.

Bibliografía

- [Anderson et al., 1994] Anderson, J., J. Brune, J. Prince, R. Quaas, S. K. Singh, D. Almora, P. Bodin, M. O. nate, R. Vásquez, and J. Velasco, 1994, The guerrero accelegraph network: *Geofísica Internacional*, **33**, 341–371.
- [Cotte et al., 2009] Cotte, N., A. Walpersdorf, V. Kostoglodov, M. Vergnolle, J.-A. Santiago, I. Manighetti, and M. Campillo, 2009, Anticipating the Next Large Silent Earthquake in Mexico: EOS, *TRANSACTIONS AMERICAN GEOPHYSICAL UNION*, **90**, 181.
- [DeMets et al., 1994] DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein, 1994, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions: *Geophysical Research Letters*, **21**, 2191–2194.
- [Franco et al., 2005] Franco, S. I., V. Kostoglodov, K. M. Larson, V. C. Manea, M. Manea, and J. A. Santiago, 2005, Propagation of the 2001-2002 silent earthquake and interplate coupling in the Oaxaca subduction zone, Mexico: *Earth Planets Space*, **57**, 973–985.
- [Frez, 2004] Frez, J., 2004, Selección de eventos dentro de un polígono y en la superficie de la tierra con matlab: *GEOS*, **24**, 40–45.
- [Iglesias et al., 2004] Iglesias, A., S. K. Singh, A. R. Lowry, M. Santoyo, V. Kostoglodov, K. M. Larson, and S. I. Franco-Sánchez, 2004, The silent earthquake of 2002 in the Guerrero seismic gap, Mexico (Mw=7.6): Inversion of slip on the plate interface and some implications: *Geofísica Internacional*, **43**, 309–317.
- [Kostodoglov and Pacheco, 1999] Kostodoglov, V., and J. F. Pacheco, 1999, Cien Años de Sismicidad en México.: Poster.
- [Kostoglodov et al., 2003] Kostoglodov, V., S. K. Singh, J. A. Santiago, S. I. Franco, K. M. Larson, A. R. Lowry, and R. Bilham, 2003, A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico: *Geophysical Research Letters*, **30(15)**, 1807.
- [Larson et al., 2007] Larson, K. M., V. Kostodoglov, S. Miyazaki, and J. A. S. Santiago, 2007, The 2006 aseismic slow slip event in Guerrero, Mexico: New results from GPS: *Geophysical Research Letters*, **34**, 34L13309.
- [Liu et al., 2007] Liu, Y., J. R. Rice, and K. M. Larson, 2007, Seismicity variations associated with aseismic transients in guerrero, mexico, 1995-2006: *Earth and Planetary Science Letters*, **262**, 493 – 504.
- [Lowry et al., 2001] Lowry, A. R., K. M. Larson, V. Kostodoglov, and R. Bilham, 2001, Transient fault silp in Guerrero, southern Mexico: *Geophysical Research Letters*, **28**, 3753–3756.

- [Ortiz et al., 2000] Ortiz, M., S. K. Singh, V. Kostoglov, and J. Pacheco, 2000, Source areas of the Acapulco-San Marcos, Mexico earthquakes of 1962 (m 7.1; 7.0) and 1957 (m 7.7), as constrained by Tsunami and uplift records: *Geofísica Internacional*, **39**, 337–348.
- [Ottemöller et al., 2011] Ottemöller, L., P. Voss, and J. Havskov, 2011, SEISAN EARTHQUAKE ANALYSIS SOFTWARE FOR WINDOWS, SOLARIS, LINUX AND MACOSX. Department of Earth Science University of Bergen, Allgaten 41 5007 Bergen Norway, 9.0.1 ed.
- [Pardo and Suárez, 1995] Pardo, M., and G. Suárez, 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implication: *Journal of Geophysical Research*, **100**, 12,357–12,373.
- [Pérez-Campos et al., 2008] Pérez-Campos, X., Y. Kim, A. Husker, P. M. Davis, R. W. Clayton, A. Iglesias, J. F. Pacheco, S. K. Singh, V. C. Manea, and M. Gurnis, 2008, Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico: *Geophysical Research Letters*, **35**.
- [Ramírez-Herrera et al., 2009] Ramírez-Herrera, M. T., A. B. Cundy, V. Kostoglodov, and M. Ortiz, 2009, Late Holocene tectonic land-level changes and tsunamis at Mitla lagoon, Guerrero, Mexico: *Geofísica internacional*, **48**, 195 – 209.
- [Schwartz and Rokosky, 2007] Schwartz, S. Y., and J. M. Rokosky, 2007, Slow slip events and seismic tremor at circum-pacific subduction zones: *Rev. Geophys.*, **45**, RG3004.
- [Showstack, 2011] Showstack, R., 2011, Scientists Examine Challenges and Lessons From Japan's Earthquake and Tsunami: *Eos, Trans. AGU*, **92(12)**.
- [Singh and Mortera, 1991] Singh, S. K., and F. Mortera, 1991, Source time functions of large mexican subduction earthquakes, morphology of the benioff zone, age of the plate, and their tectonic implications: *J. Geophys. Res.*, **96**, 21487–21502.
- [Singh et al., 1984] Singh, S. K., M. Rodríguez, and J. M. Espíndola, 1984, A catalog of shallow earthquakes of mexico from 1900 to 1981: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **74**, 267–279.
- [Suarez and Albin, 2009] Suarez, G., and P. Albin, 2009, Evidence for great tsunamigenic earthquakes (m 8.6) along the mexican subduction zone: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**, 892–896.
- [Suarez et al., 1990] Suarez, G., T. Monfret, G. Wittlinger, and C. David, 1990, Geometry of subduction and depth of the seismogenic zone in the guerrero gap, mexico: *Nature*, **345**, 336–338.
- [UNAM, 2010] UNAM, 2010, Unamalla: Programa de Generacion de Mallas.
- [USGS, 2011] USGS, 2011, Honshu Mw=9 Earthquake 11 March 2011: <http://cires.colorado.edu/bilham/honshu2011/honshu2011.html>.
- [Valdés-González and Meyer, 1996] Valdés-González, C., and R. P. Meyer, 1996, Seismic structure between the Pacific coast and Mexico City from the Petatlán earthquake (Ms=7.6) aftershocks: *Geofísica Internacional*, **35**, 377–401.

- [Valdés-González and Novelo-Casanova, 1998] Valdés-González, C., and D. A. Novelo-Casanova, 1998, The western guerrero, mexico, seismogenic zone from the microseismicity associated to the 1979 petatlan and 1985 zihuatanejo earthquakes: *Tectonophysics*, **287**, 271 – 277.
- [Vergnolle et al., 2010] Vergnolle, M., A. Walpersdorf, V. Kostoglodov, P. Tregoning, J. A. Santiago, N. Cotte, and S. I. Franco, 2010, Slow slip events in mexico revised from the processing of 11 year gps observations: *J. Geophys. Res.*, **115**, B08403.
- [Waldhauser and Ellsworth, 2000] Waldhauser, F., and W. L. Ellsworth, 2000, A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, 1353–1386.