

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.

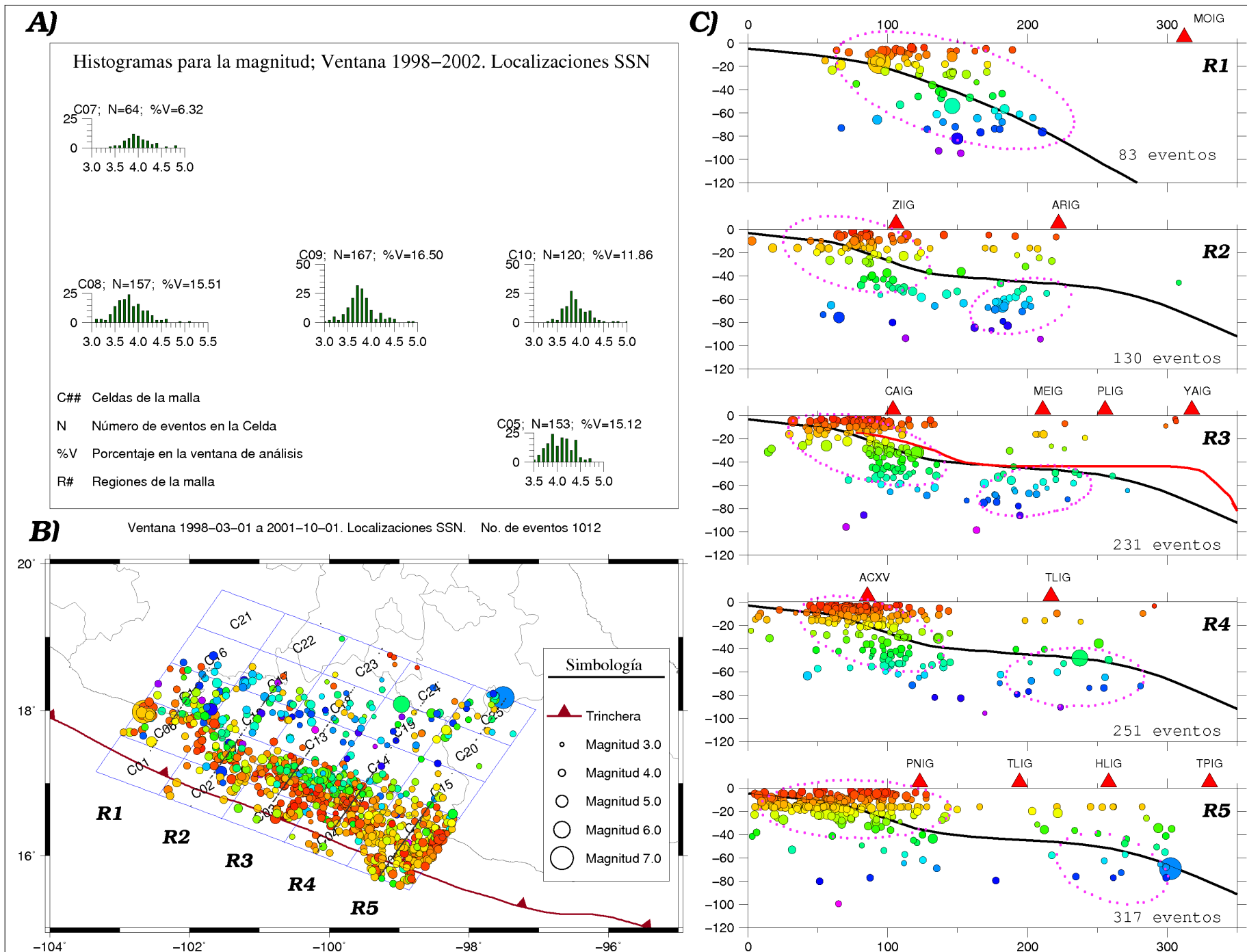


Figura 5.1: Ventana Uno

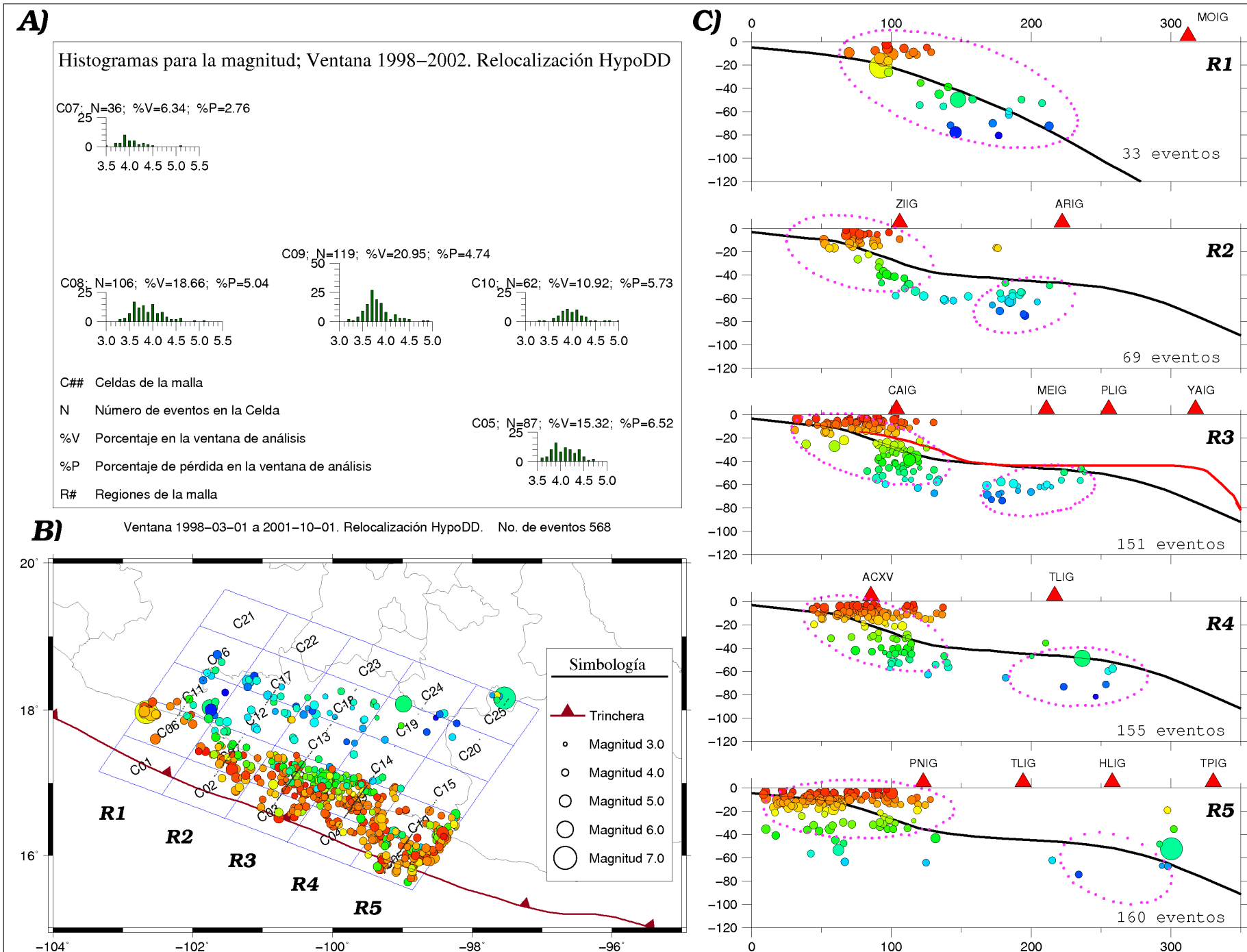


Figura 5.2: Ventana Uno Relocalizada

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.

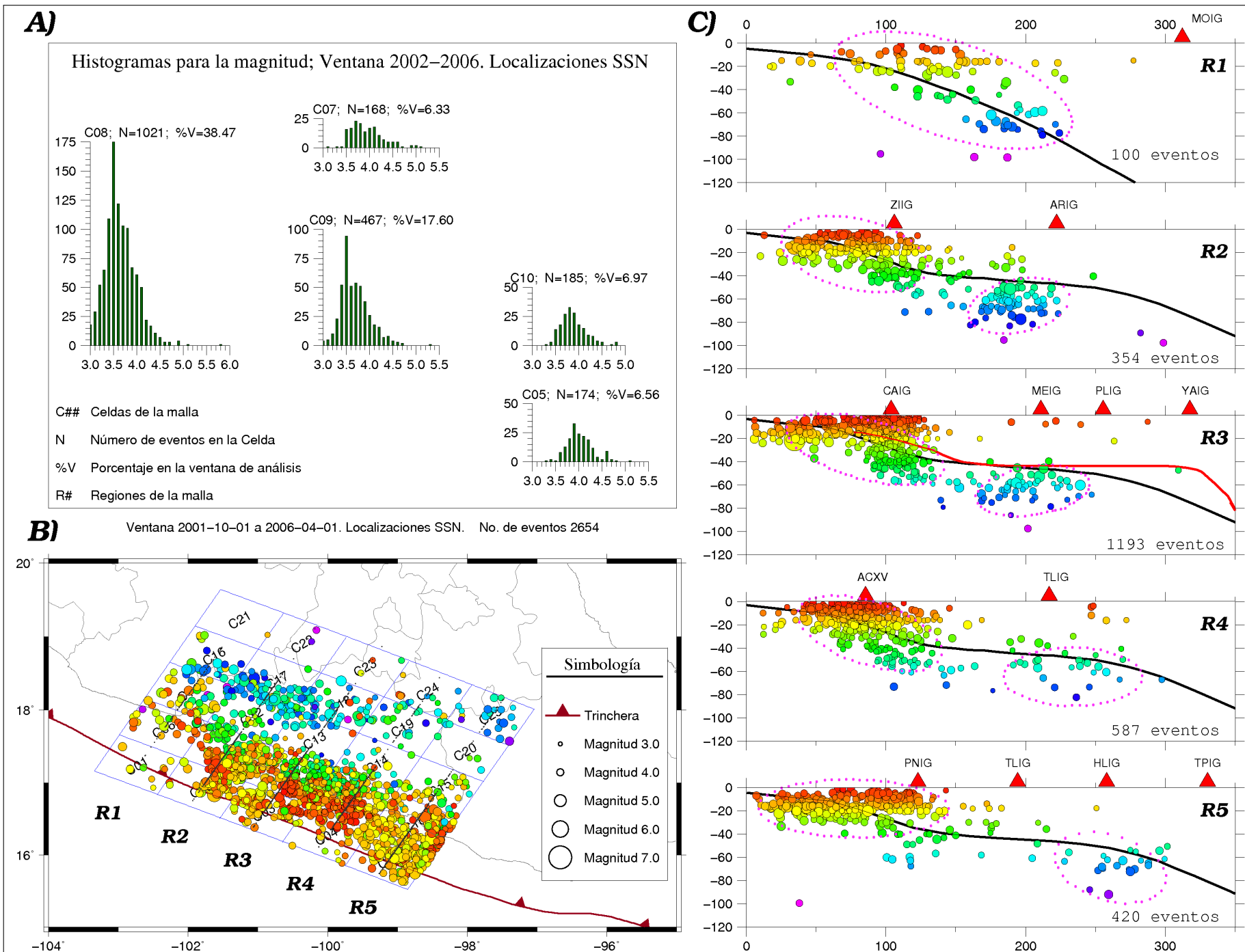


Figura 5.3: Ventana Dos

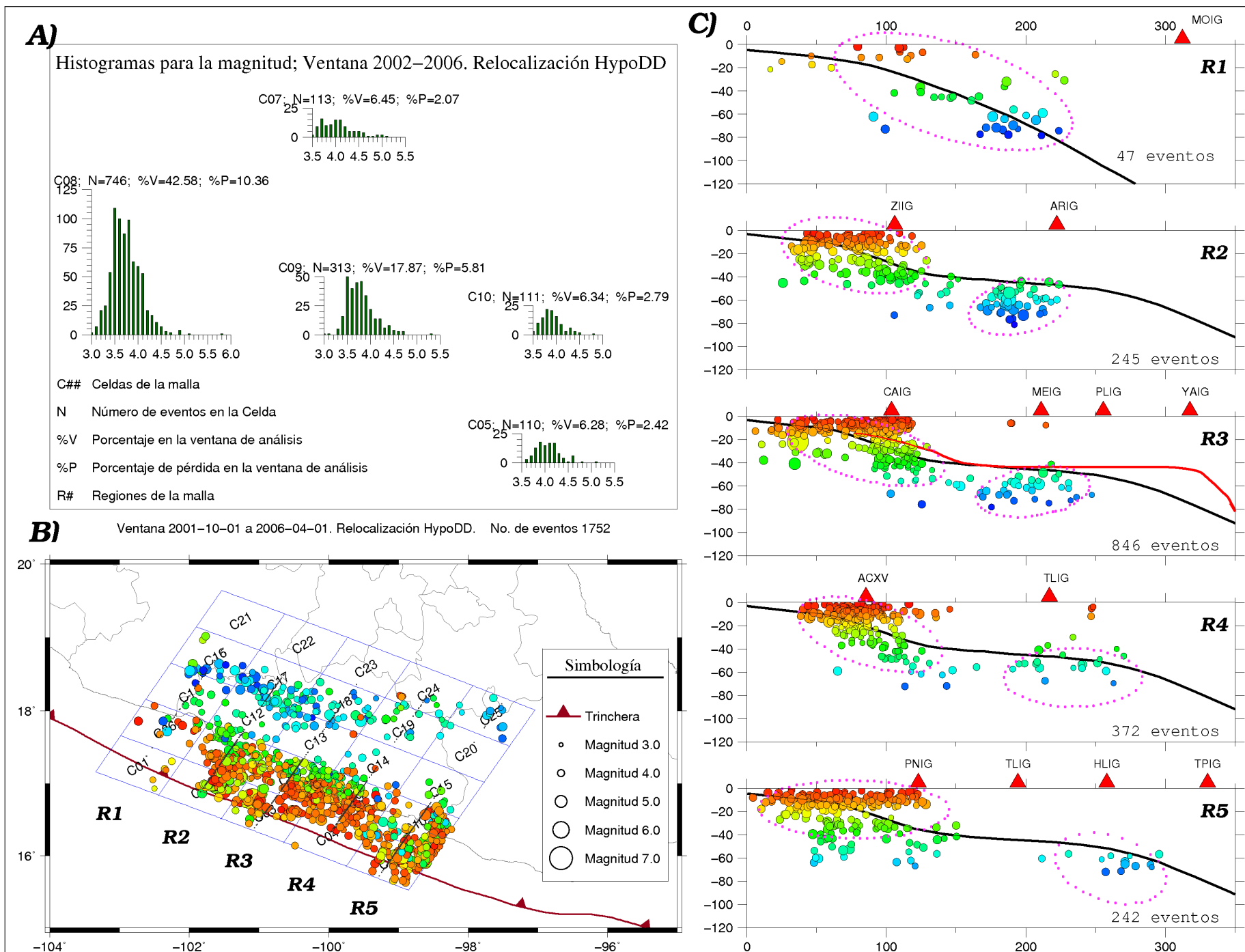


Figura 5.4: Ventana Dos del Catálogo relocalizado

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.

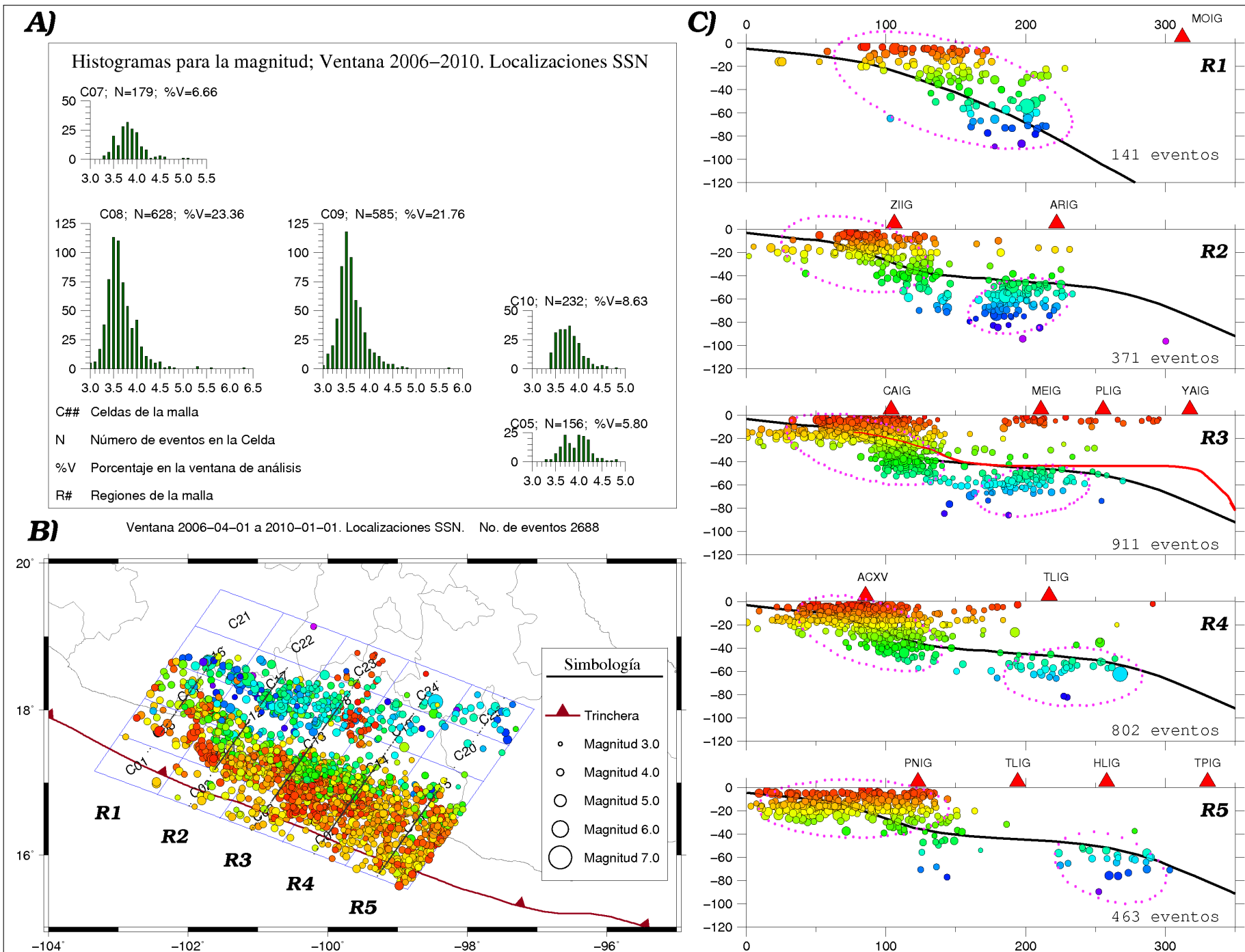


Figura 5.5: Ventana Tres

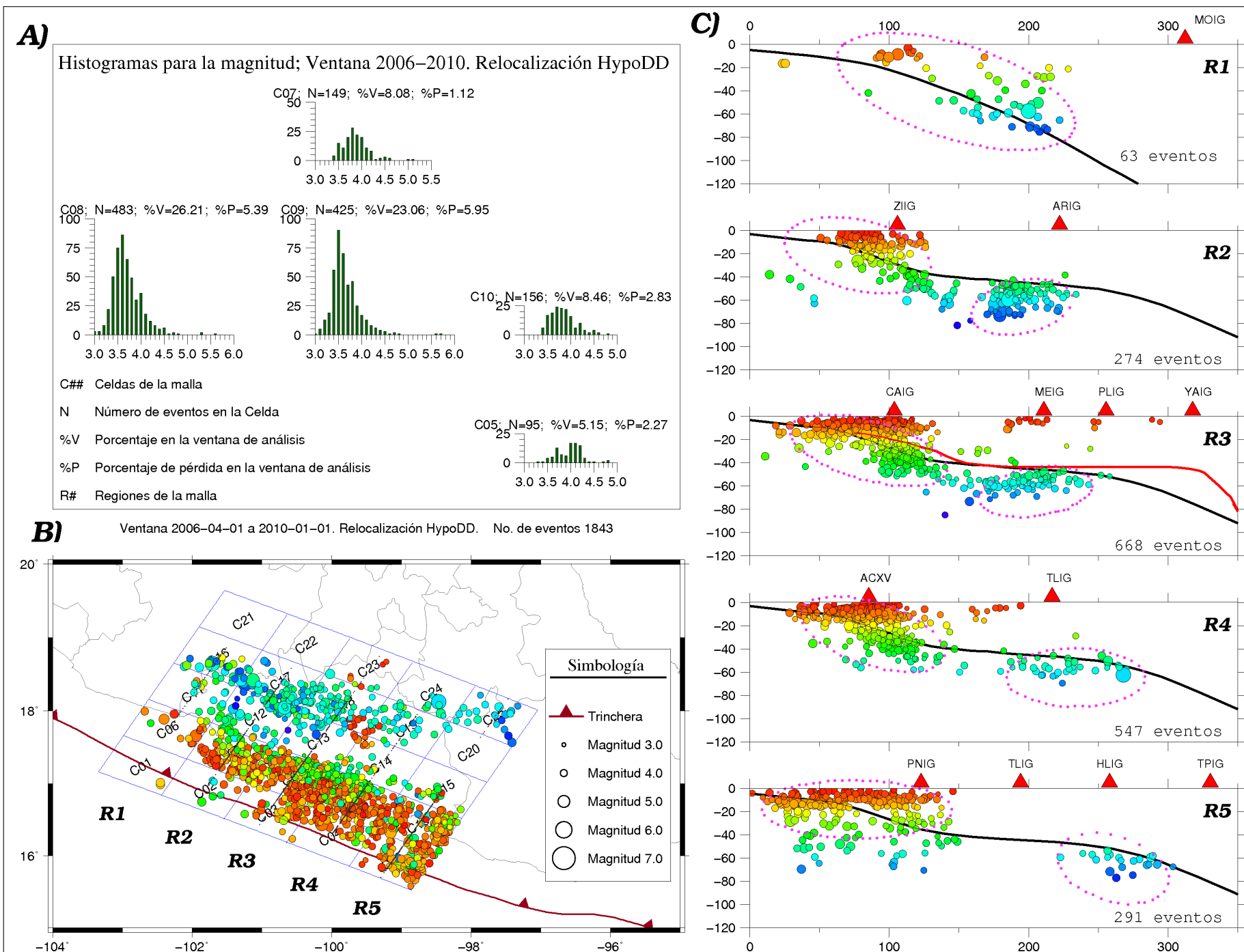


Figura 5.6: Ventana Tres Relocalizada

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.

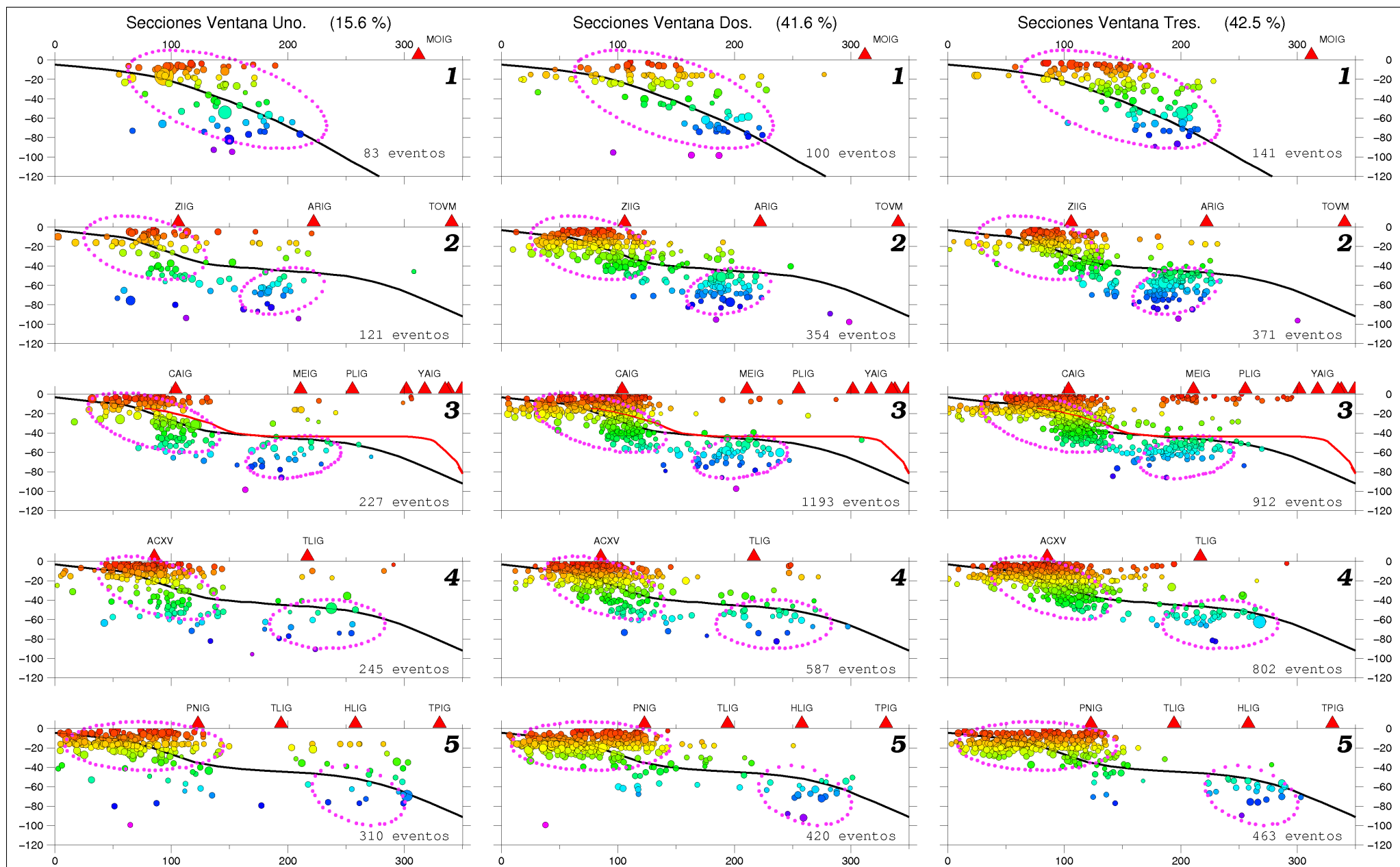


Figura 5.7: Tres Secciones Hypocenter

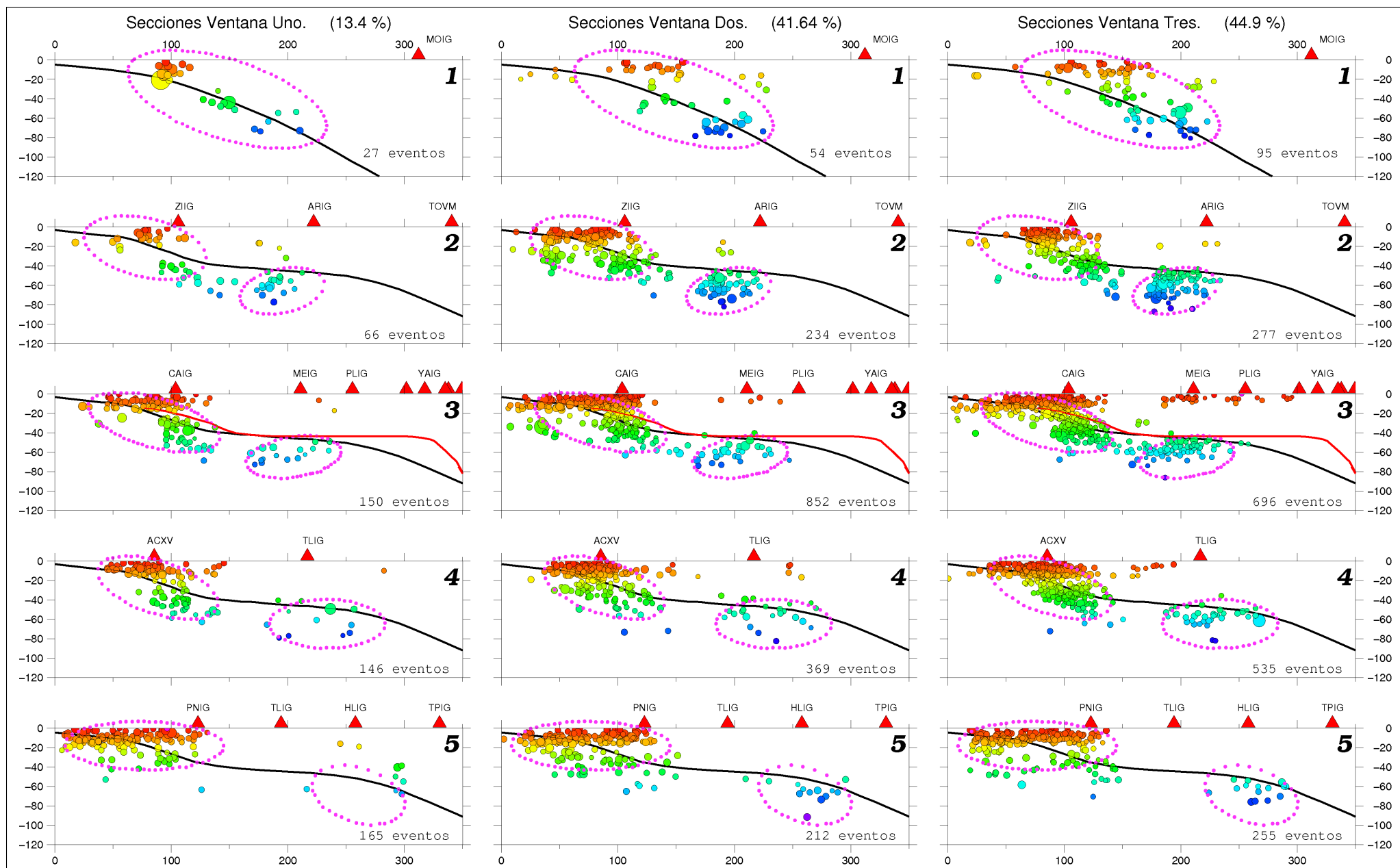


Figura 5.8: Tres Secciones hypoDD

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. □

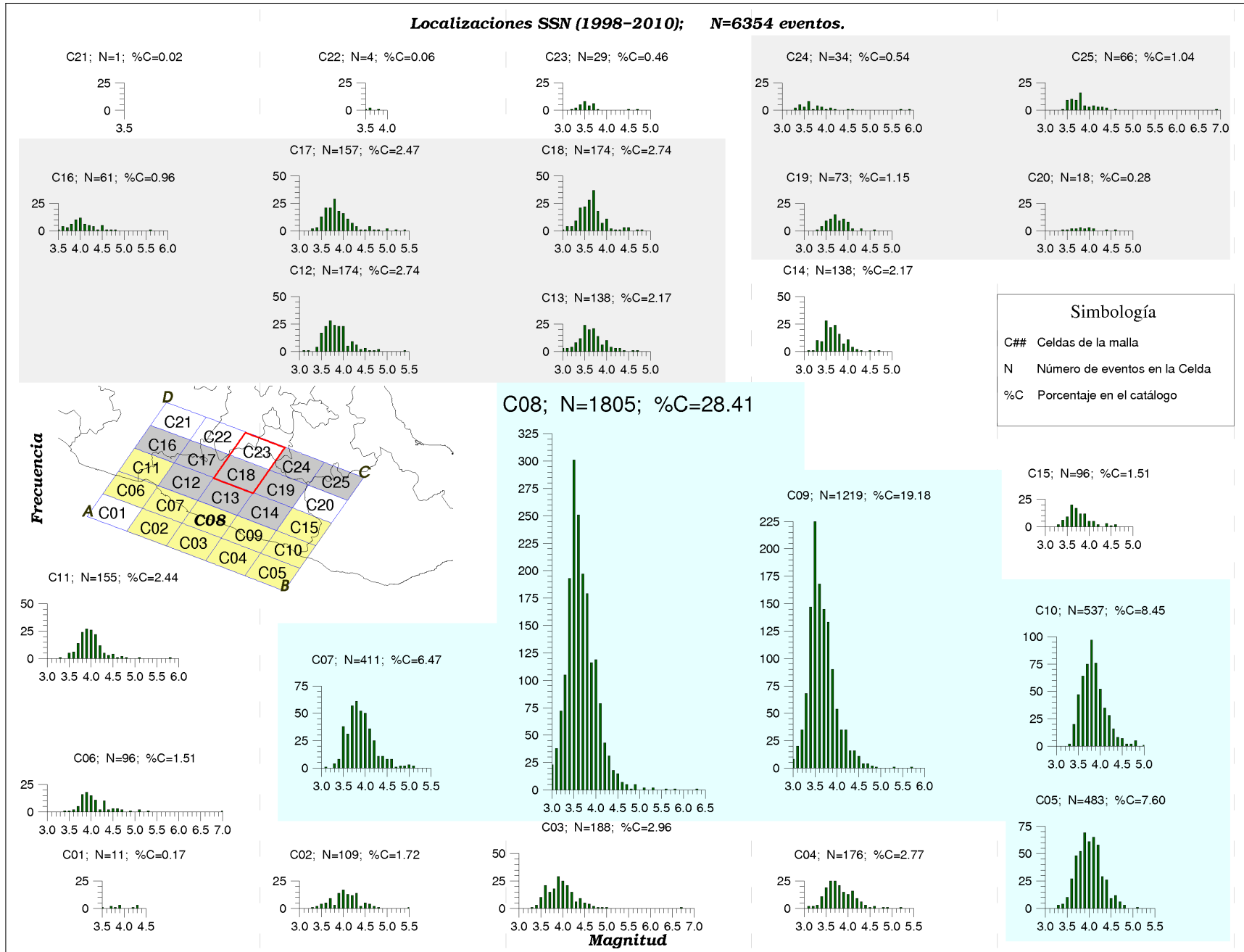


Figura 5.9: Histograma de Frecuencias para el catálogo de estudio.

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

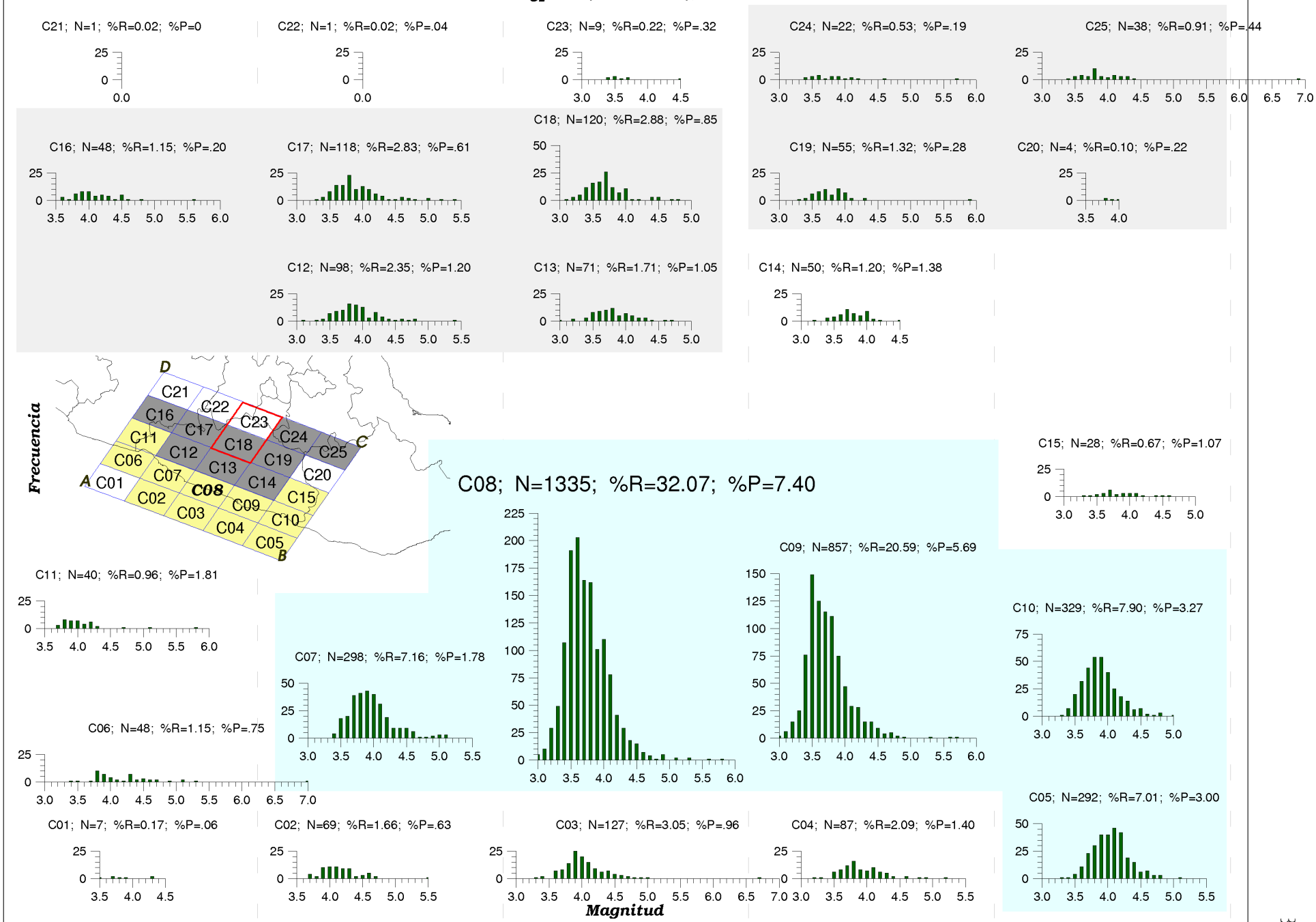


Figura 5.10: Histograma de Frecuencias para el catálogo de estudio relocalizado.

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.

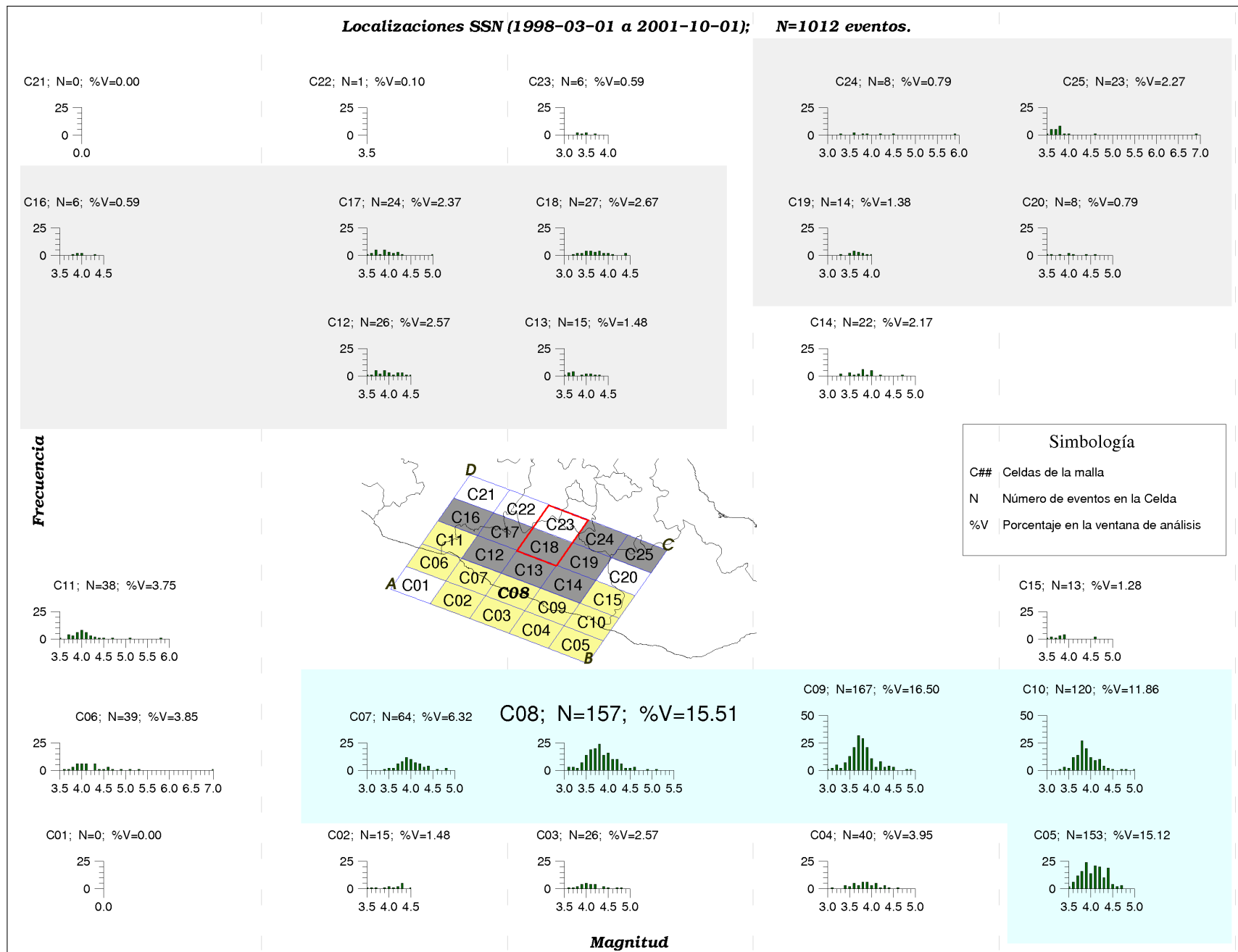


Figura 5.11: Histograma de Frecuencias para la Ventana Uno.

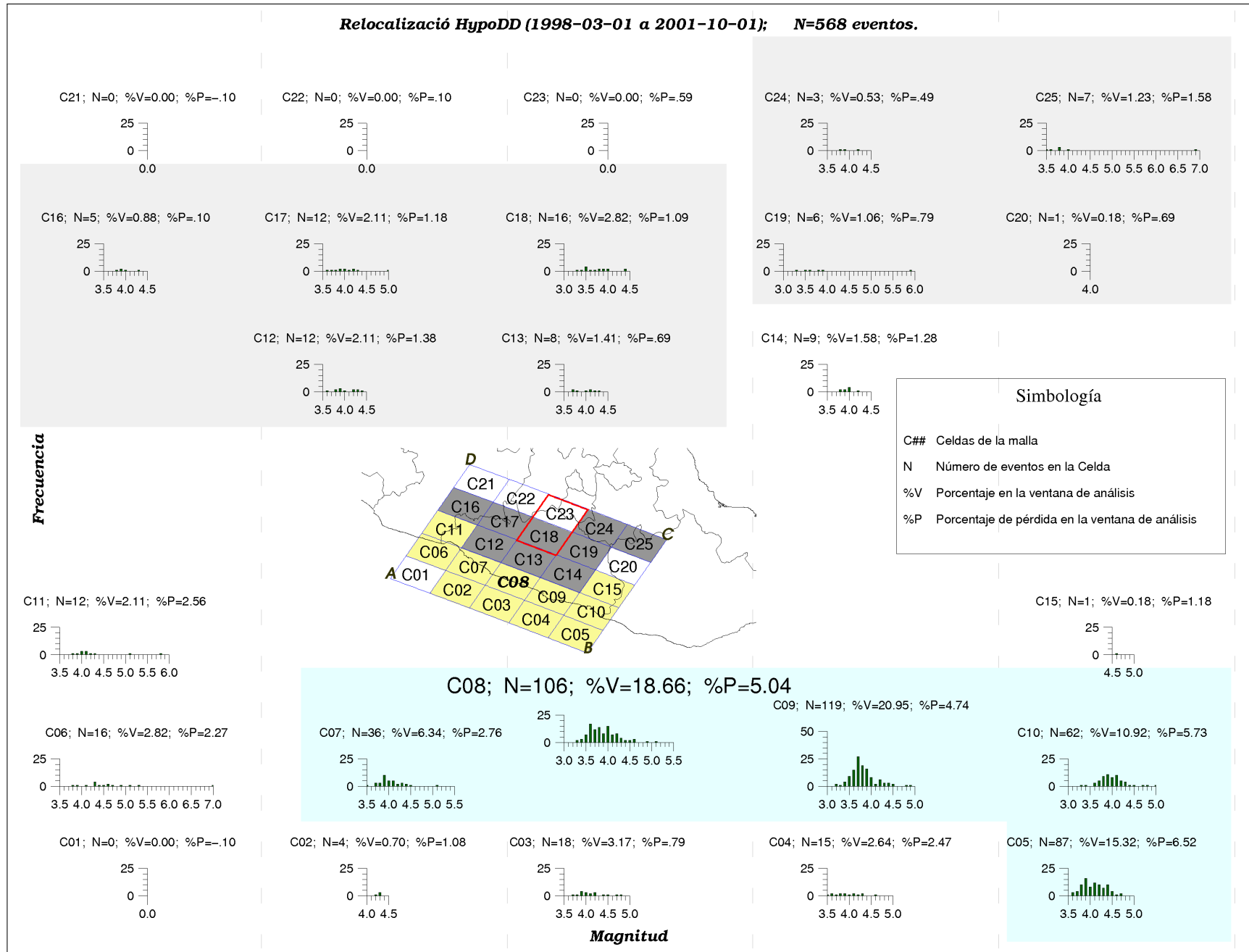


Figura 5.12: Histograma de Frecuencias Ventana Uno hypoDD.

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.

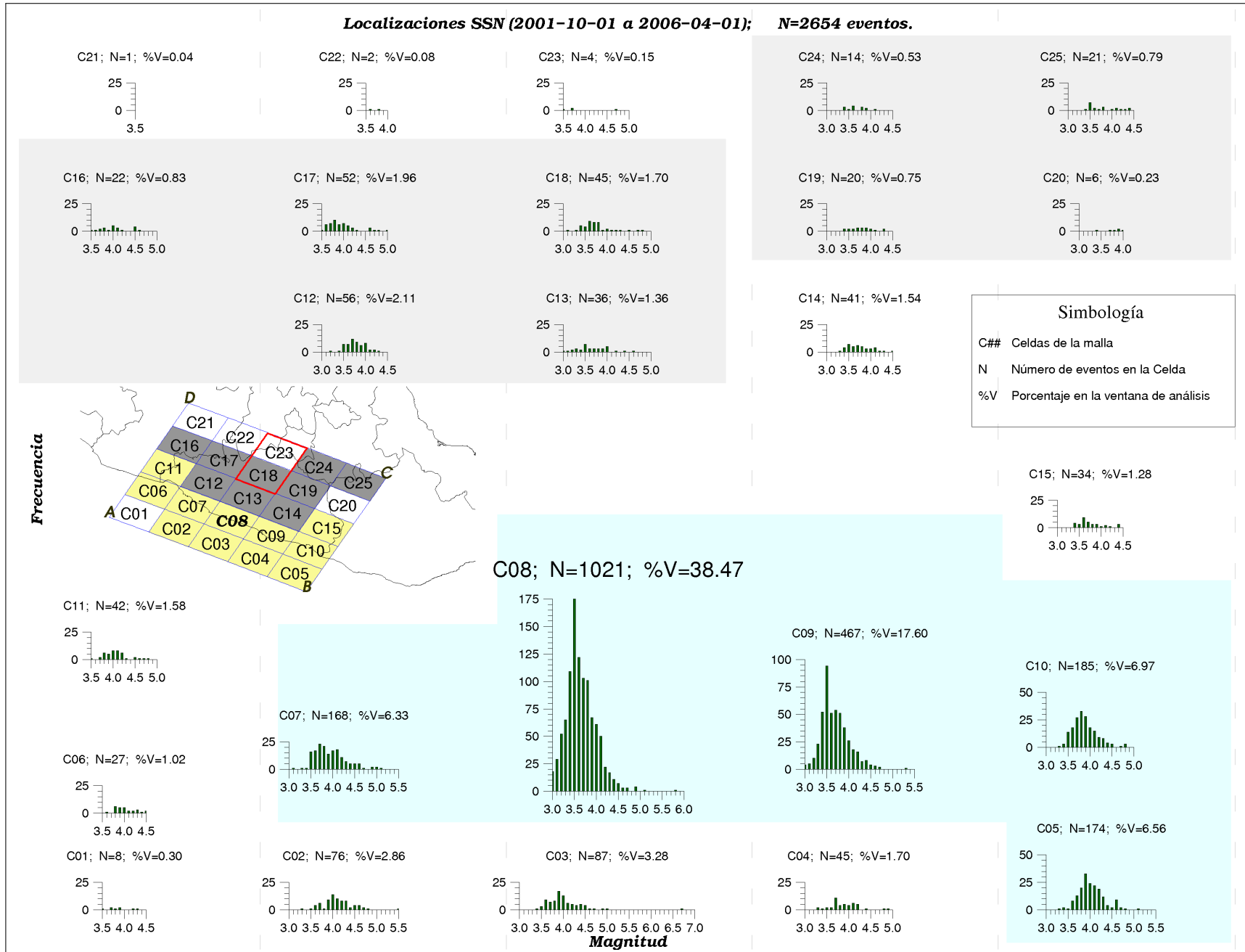


Figura 5.13: Histograma de Frecuencias Ventana Dos.

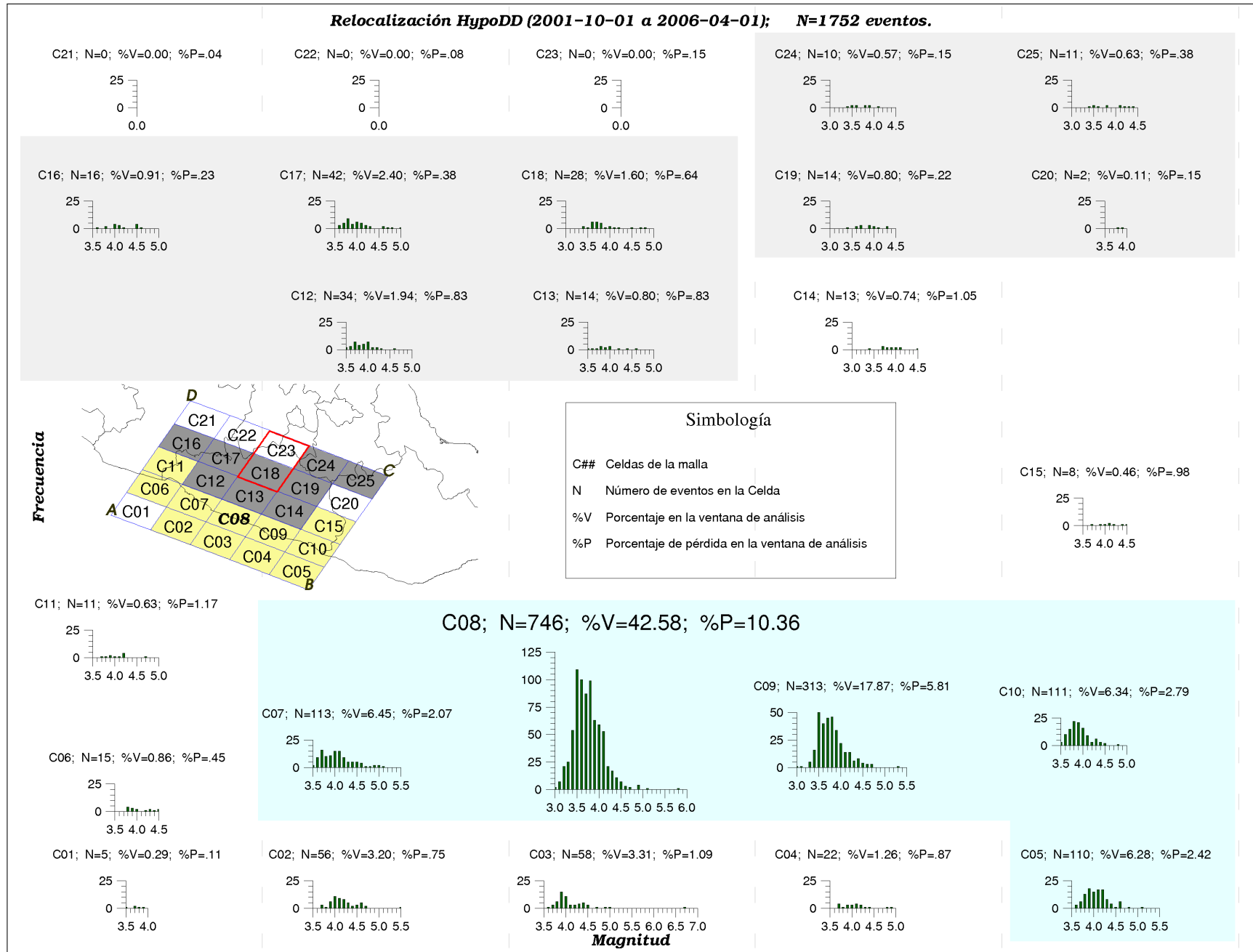


Figura 5.14: Histograma de Frecuencias Ventana Dos Relocalizada.

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.

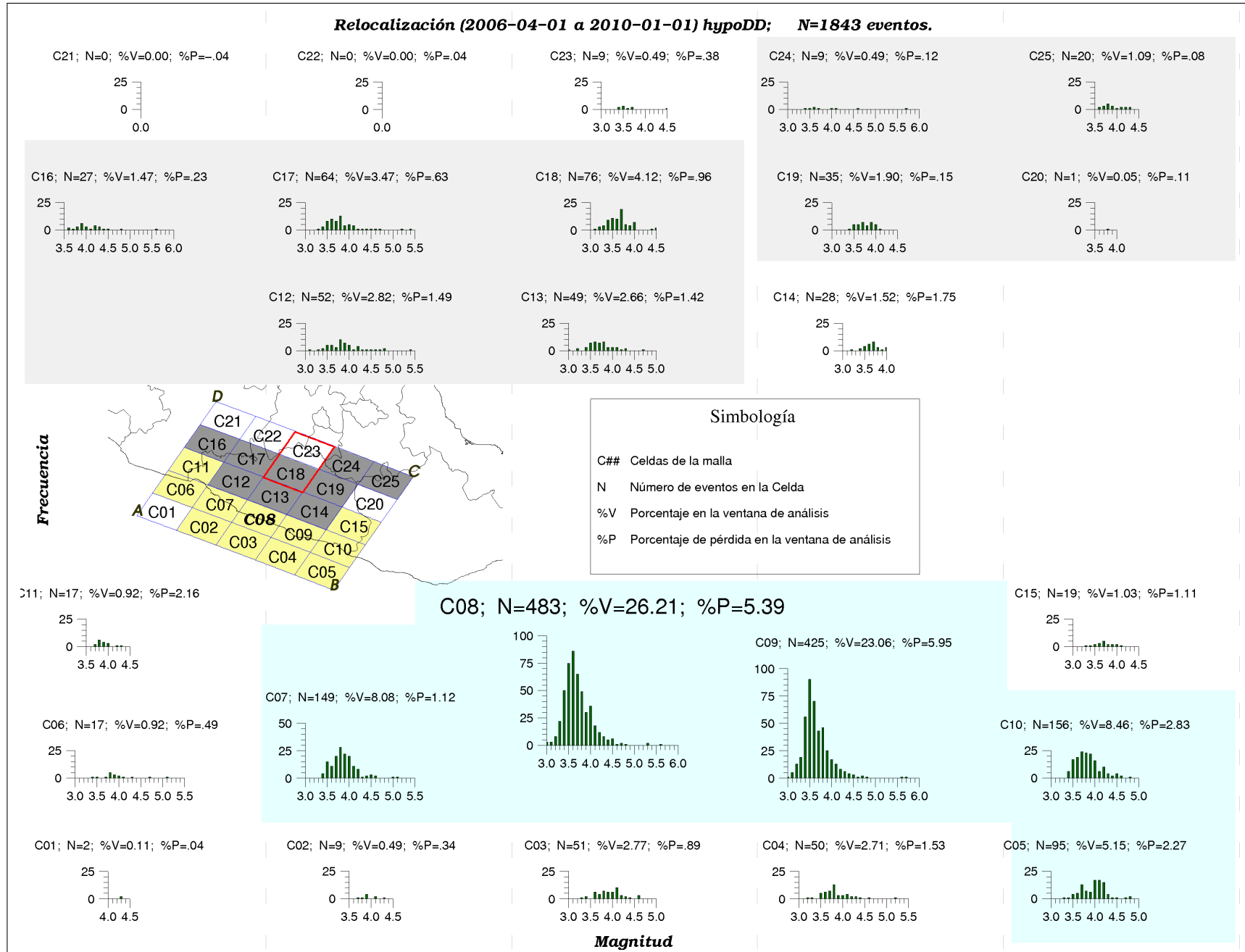


Figura 5.16: Histograma de Frecuencias Ventana Tres Relocalizada.

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.

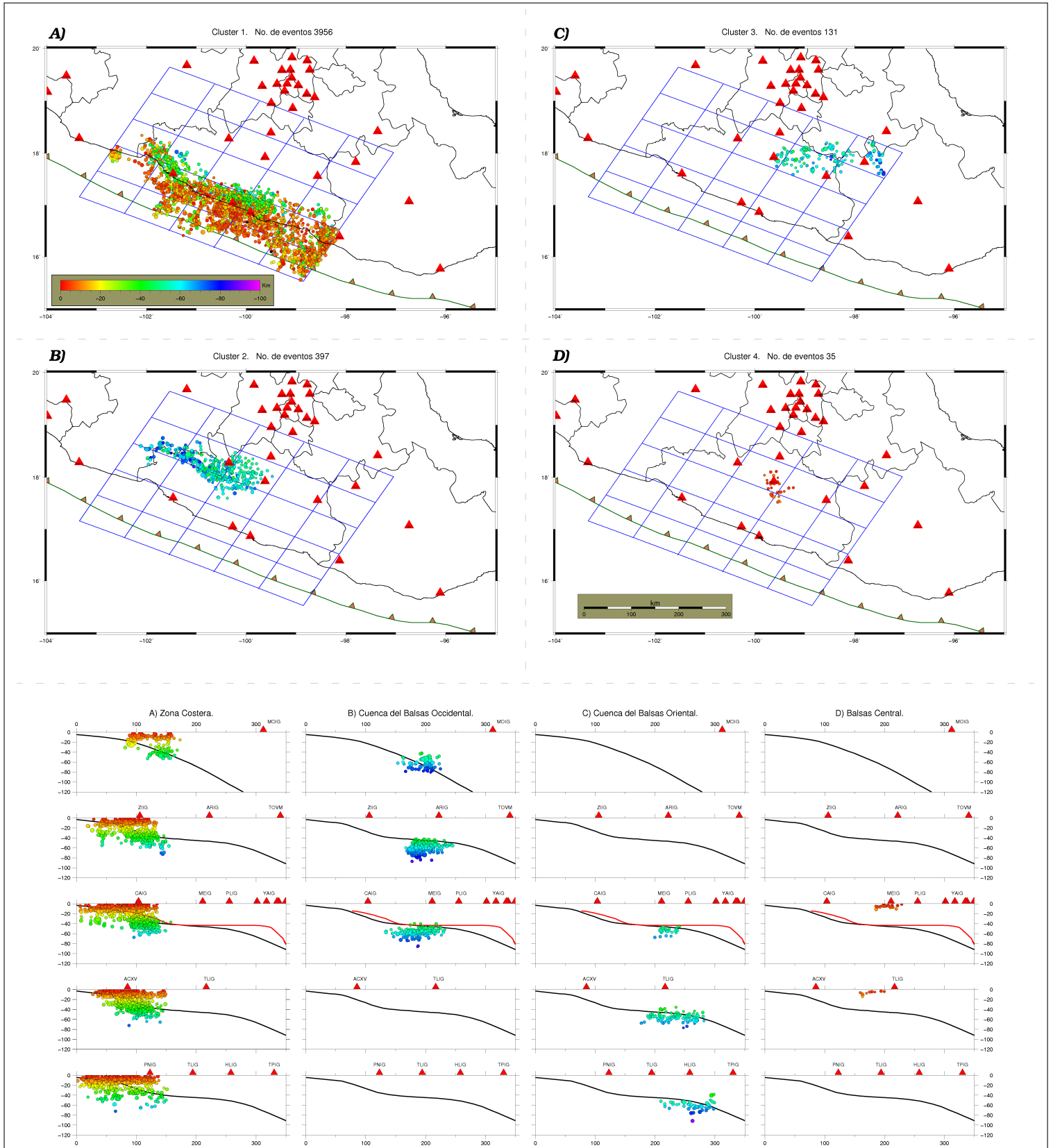


Figura 5.17: Subzonas de sismicidad que arroja el programa hypoDD.