
CAPITULO 4

DISCUSION Y RESULTADOS

4.1 Resultados del análisis de parámetros

La sismicidad del campo geotérmico Los Humeros que se analizó para este trabajo está dividida en dos periodos, el primero de ellos comprende de 1997-2002 y el otro de 2004-2008. Como se explicó anteriormente, la distinción entre los periodos se debe al cambio de posiciones de las estaciones. Cada periodo está dividido, a su vez, en las zonas: Norte, Sur, Este, Oeste y Centro del campo. Esta última división se realizó para conocer la proveniencia de los sismos, ya que para este estudio de anisotropía es importante conocer el área barrida por las ondas de corte y determinar las posibles estructuras entre la fuente y receptor. La Zona Centro tiene más del 85% de los epicentros, por lo que los resultados estadísticos de polarización (θ) y retraso (δt) de ondas S se resumirán a la zona Centro. Figura 4.2.

A continuación se analizan los parámetros de anisotropía de la zona Centro que tendrá los valores más relevantes en este estudio de acuerdo a la metodología descrita en el Capítulo 3.

En la Tabla 4, se puede observar las características de algunos sismos: número de evento (N), fecha, coordenadas geográficas, profundidad (Z), número de estaciones (E), rms, Md, y las estaciones donde cada una muestra los valores de polarización de la onda qS1; a partir de ella se realizó el análisis estadístico de las estaciones. Adicionalmente se realizó una tabla para los retrasos de tiempo.

Tabla 1. Características de los sismos, N=numero de evento, fecha, coordenadas geográficas, Z=profundidad (km), E=número de estaciones, rms= error cuadrático medio, Md= magnitud de duración, y estaciones S01, S02, S03, S04, S05, S06 con su respectivo valor de polarización de onda qS1 (grados).

N	Evento	Lat.	Lon.	Z (km)	E	rms	Md	S01	S02	S03	S04	S05	S06
1	1997 1213 1104 53.1	19.686	-97.45	3.9	5	0	1	91	300	315	342	214	90
2	1997 1230 1614 44.3	19.686	-97.46	3.3	5	0.1	1.3	84	30		5	350	300
3	1997 1230 1709 24.5	19.686	-97.46	3.7	6	0.1	1.5	120	355	125	140	305	
4	1997 1230 1726 58.1	19.687	-97.45	2.8	6	0.2	1.7	60	255	57	330	20	160
5	1997 1230 1953 52.9	19.686	-97.45	2.9	6	0.2	1.9	60	200	190	-	-	-
6	1997 1230 2002 1.2	19.685	-97.46	2.8	6	0.1	1.6	58	35	330	260	25	253
7	1997 1231 0503 57.8	19.686	-97.45	3.4	6	0.1	1.9	150	210	147	327	20	60

4.2 Parámetro de polarización de la onda de corte qS1

En zona centro del campo Los Humeros del periodo 1997-2002 las direcciones de polarización de la onda qS1 para cada estación se muestran en diagramas de rosas Figura 4.1, las mayores amplitudes representan una mayor ocurrencia de polarización.

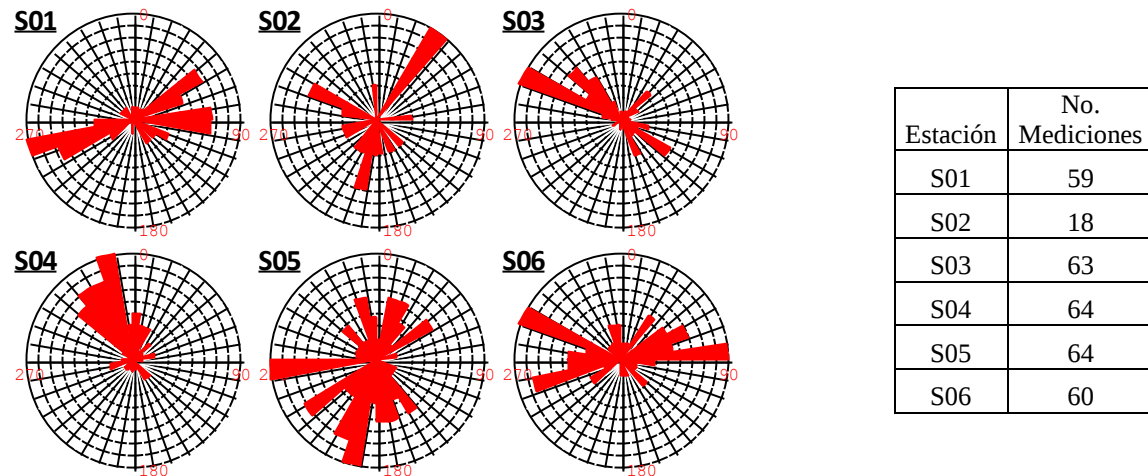


Figura 4.1 Diagramas de polarización de la onda qS1 obtenidos para cada estación sísmica. Los eventos provienen de la zona Centro del campo. A la derecha se muestra una tabla con el número mediciones de polarización por estación.

La Figura 4.2 muestra rosetas con polarización de la onda qS1 de 12 eventos localizados en la zona Centro de 2004-2008.; las estaciones HU5 y HU6 (antes S05 y S06) tienen casi los mismos valores debido a que no cambiaron de posición, las demás estaciones variaron de posición. Se observa que el número de eventos para este periodo se redujo debido, principalmente, a que muchos sismos no fueron localizados en 5 o más estaciones, por lo que se utilizaron algunos eventos mejor localizados en cuatro estaciones. Figura 4.3.

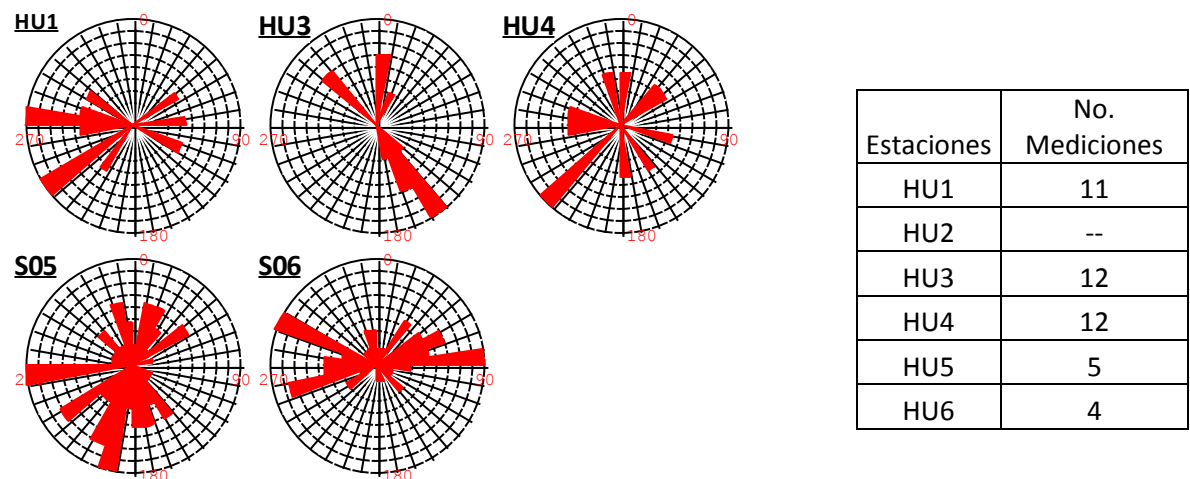


Figura 4.2. Las rosetas muestran las direcciones de polarización de la onda qS1 de cada estación. Los datos son 12 eventos que provienen de la zona Centro del campo para el periodo 2004-2008.

Observaciones:

En la estación S01 y HU1 (2do periodo), los esfuerzos se alinean aproximadamente en la dirección E-W y ligeramente NE-SW, posiblemente a causa de fracturamiento asociado a un sistema de esfuerzos de compresión dentro del Cinturón Volcánicos Transmexicano (Ferrari, 1994b, Suter, 1991, Cserna et al., 1988).

La estación S06 muestra polaridad preferencial casi E-W a causa de sistemas de fracturamiento coincidente en la dirección con la falla Las Papas.

-La estación S02, muestra dirección de polarización NE-SW coincidente con esfuerzos en todo el CVTM (Suter, 1991, Cserna, 1988). Sin embargo, la poca cantidad de datos no permite hacer una interpretación adecuada.

-La estación S05 presenta polaridad casi N-S como NE-SW. La primera se explicaría por el fracturamiento asociado a la falla Los Humeros, mientras la segunda se asocia a un sistema de esfuerzos regionales NE-SW a lo largo del CVTM (Suter, 1991, Cserna, 1988).

-Las estaciones S03 y S04, del primer periodo, tienen polarizaciones preferenciales NW-SE, contraria a los esfuerzos regionales posiblemente asociados a las fallas La Antigua y Malpaís. Para el segundo periodo, la estación HU3 tiene la misma polaridad, en cambio la estación HU4 relocalizada en el Centro del campo, cambia de polaridad a NE-SW en dirección de fallas en esta misma dirección.

-Las polarizaciones en las estaciones se correlacionan con la tectónica del lugar, en dirección de las fallas. Las estaciones S01, S06 y S05 tienen una tendencia NE-SW coincidente con esfuerzos regionales y las estaciones S03 y S04 muestran una tendencia NW-SE perpendicular a las primeras.

Lo anterior indica que el sistema de esfuerzos regionales NE-SW mencionados por Ferrari et al., 1994b y Cserna, 1988 tienen influencia en esta parte del Cinturón Volcánico Transmexicano y las polarizaciones de las ondas de corte qS_1 serían evidencia de éstos esfuerzos. Mientras que perpendicular a dichos esfuerzos se crean los pares conjugados de fallas.

De acuerdo a la hipótesis de la anisotropía de dilatación extensiva (EDA) por Crampin, (1978) sugiere que la anisotropía en los humeros, es causada por fallas, fracturas y microfracturas alineadas por los esfuerzos máximos horizontales de compresión.

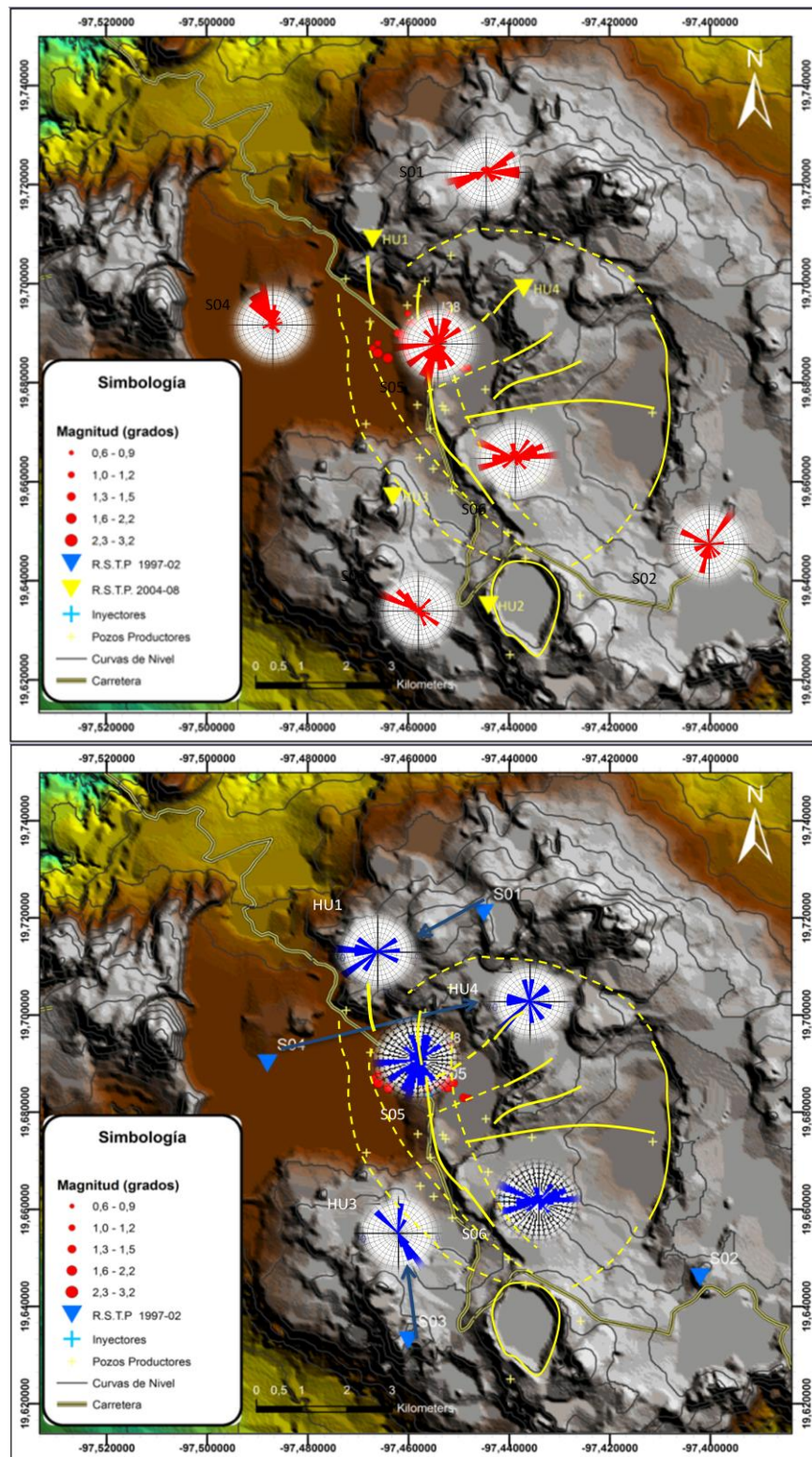


Figura 4.3. En este mapa digital de altitud, se muestran: Arriba. Las polarizaciones de onda qS1de las estaciones para el primer periodo 1997-2002. Abajo, el mismo mapa con las polarizaciones del periodo de 2004-2008. Se muestran demás con flechas el desplazamiento de las estaciones HU1, HU3 y HU4 mientras que la HU5 y HU6 no cambian de posición, la HU2 no figura al presentar poca información.

La Figura 4.4, muestra una propuesta de zonificación de fallas y fracturas, es decir, áreas en donde puede haber la misma dirección de fallas, fracturas y esfuerzos.

En la zona color rosa, las estaciones S04, S03 y HU3 indican polarización preferencial NW-SE. Al norte, la estación S01 en sus dos periodos muestra otra zona en color amarillo con dirección preferencial casi E-W y, adicionalmente la estación S06 muestra una clara tendencia en la misma dirección. Al centro del campo las estaciones S05 y HU4 presentan dirección NE-SW, al igual que la estación S02.

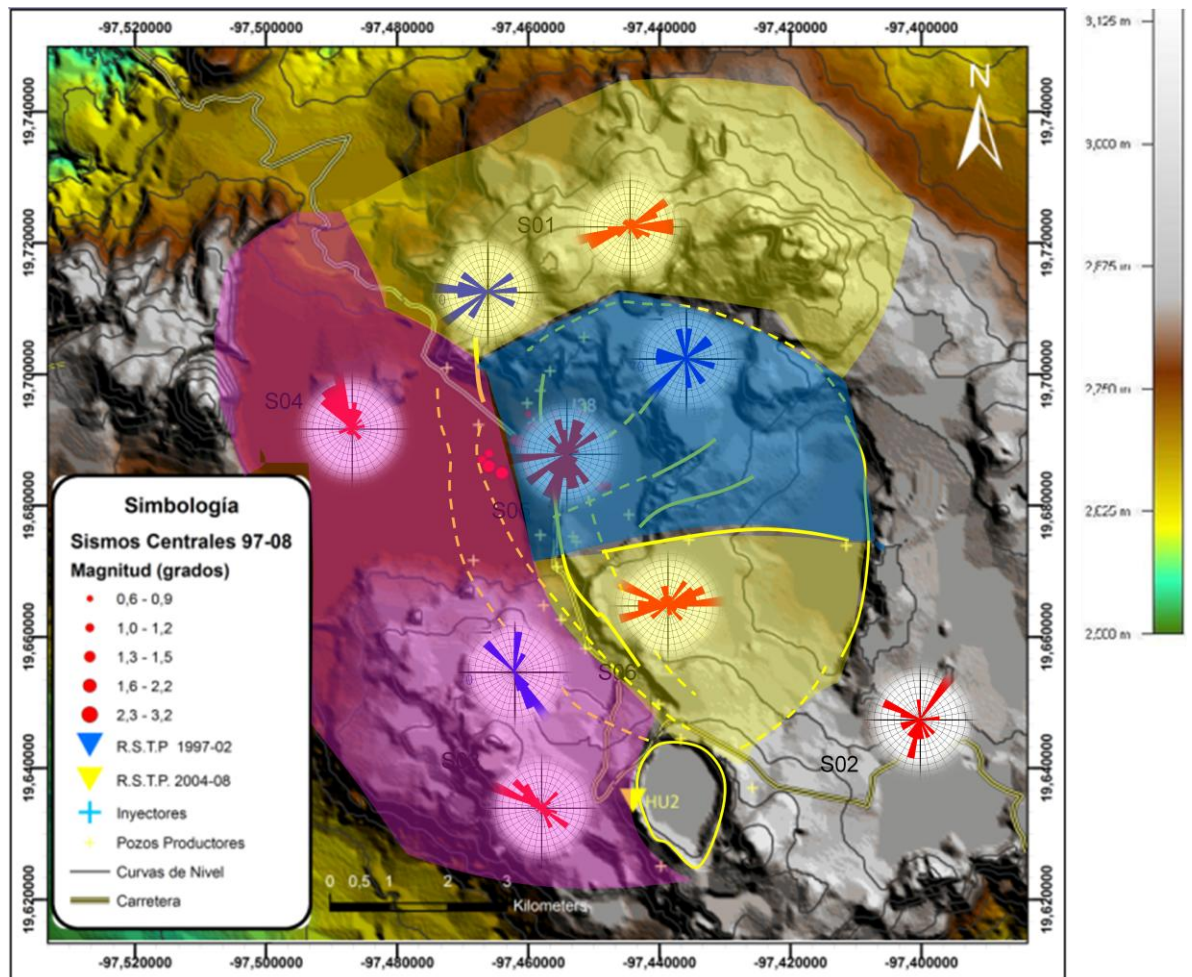


Figura 4.4 Mapa de elevación que muestra la zonificación de fallas, las áreas del mismo color son una propuesta de las direcciones predominantes de las fallas y fracturas, en rosa la dirección preferencial sería NW-SE, en azul NE-SW y en amarillo E-W.

Como se puede observar en el mapa, la zona color rosa indica un fracturamiento (y, por lo tanto, de polaridad de onda qS1) en dirección preferencial NW-SE. La zona se delimita, al Este, por la falla Malpaís y La Antigua, al Sur, por la Caldera Xalapasco, al Norte, por la falla La Cuesta, que tiene dirección N-S, y al Este por la el colapso Los Potreros que delimita mediante fallas en este colapso exterior.

La zona en color azul (dirección NE-SW) ocupa el centro del campo geotérmico y está limitado al Este por el colapso Los Potreros, mientras que al sur se limita por la falla Las Víboras que es donde cambia la dirección de fracturamiento y finalmente ésta zona está limitada en el occidente por la falla La Antigua que a su vez es el límite de la zona color rosa.

En color amarillo se muestran en dos zonas en el campo Los Humeros: al Norte (estaciones S01 y HU1) que es coincidente con esfuerzos mencionados por Ferrari que indica que hay esfuerzos E-W en esta parte del CVTM y en cuando a la zona Sur (estación S06), esta polarización está implicada con la presencia de la falla Las Víboras y fracturamiento asociado a ésta dirección.

Podemos concluir que el campo Los Humeros, al estar al Oriente del CVTM está influenciado por esfuerzos en dirección E-W, (estaciones S01, HU1) de acuerdo a Ferrari, 1994b. Por otro lado Suter, 2001 y Cserna et al., 1988 encontraron esfuerzos de compresión en varias zonas del CVTM son NE-SW que se observa en la caldera los Humeros (S05 y HU4 y posiblemente S02) en la zona centro en color azul, finalmente estos esfuerzos tectónicos generan fallas y fracturas paralela y también de manera perpendicular que se manifiestan al Este del campo (estaciones S04, S03 u HU3).

4.3 Tiempos de retardo de las ondas qS1 y qS2

El tiempo de retardo qS1-qS2 (δt) de las ondas de corte representa el grado de anisotropía de una zona barrida por estas ondas S. El retraso de las ondas es un fenómeno acumulativo, mientras mayor sea la longitud que atraviese la onda S del cuerpo anisótropo, mayor será la separación de las ondas qS1 y qS2. La separación se conserva durante todo el viaje de las ondas. (Crampin y Booth, 1989)

La dificultad de interpretar este parámetro es que se desconoce del ángulo con el que incida en el medio anisótropo (con incidencia normal la separación es máxima y perpendicular es mínima), así como de otros factores físicos del cuerpo que afectan el grado de anisotropía como: la densidad de los materiales, densidad de fracturas y poros, contenido de fluidos, etc.

Las siguientes gráficas Figura 4.3.2 se muestran el tiempo de retraso entre las ondas qS1 y qS2 de los sismos del periodo de 1997-2002.

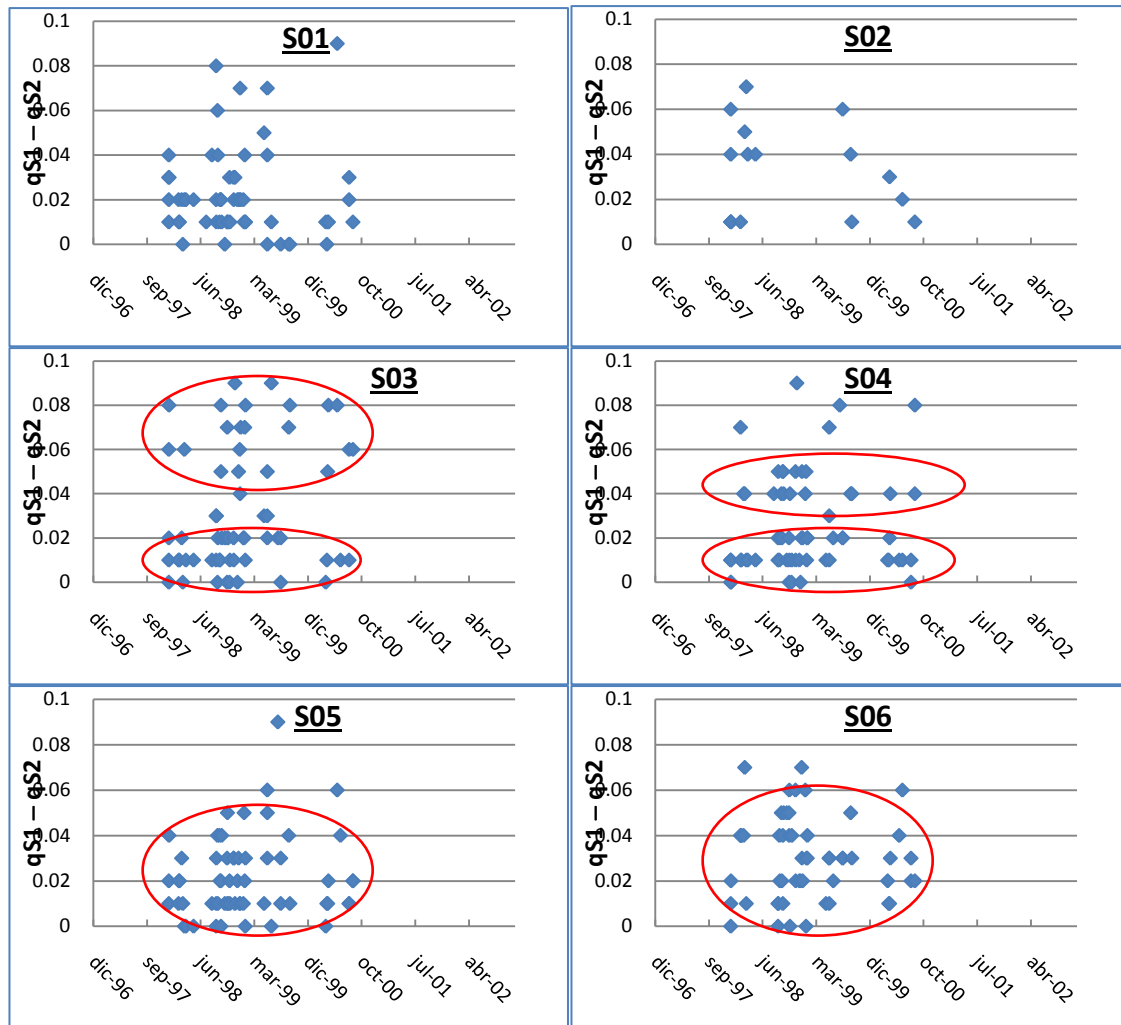


Figura 4.3.2. Graficas de tiempo de retardo (qS2-qS1) contra tiempo (mes-año) del las estaciones de la zona Centro del periodo 1997-2002. Se observan épocas de mayor sismicidad (abscisas) y rango de mayor retrasos de tiempo (ordenadas). En círculos rojos las principales acumulaciones que indican zonas de anisotropía. Las elipses muestran zonas de anisotropía.

Para el periodo 2004-2008, se realizó el mismo análisis de las gráficas de retraso entre ondas qS1 y qS2 contra tiempo de los eventos (mes-año). Figura 4.3.3

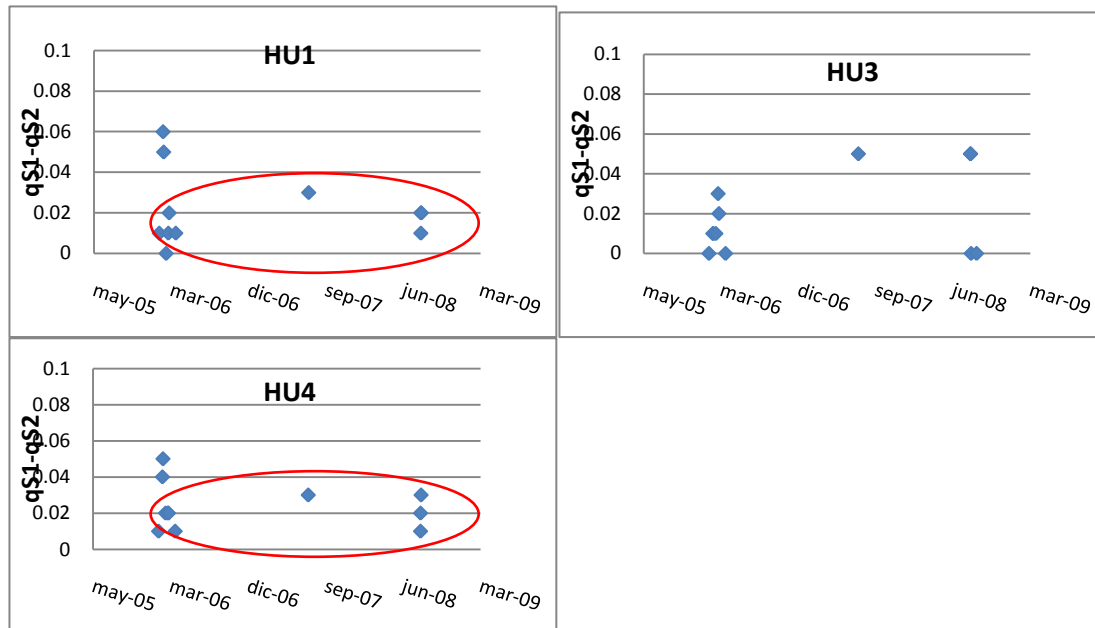


Figura 4.3.3. Gráficas de tiempo de retardo (qS2-qS1) contra tiempo (mes-año) de las estaciones de la zona Centro del segundo periodo (2004-2008). Se muestran épocas de mayor sismicidad (abscisas) y rango de mayor retraso de tiempo (ordenadas).

El número de eventos para este periodo se redujo respecto al anterior, por lo que se observa poca información para realizar una interpretación estadística, sin embargo se puede observar que los valores de la mayoría de las estaciones se detectan a finales 2005 e inicio de 2006.

Observaciones:

- Las estaciones S03 y S04 presentan dos intervalos de retraso, es decir, dos posibles zonas de anisotropía, la primera muy pequeño entre [0.0-0.02] que se interpreta como un volumen de anisotropía de poco espesor o un bajo grado de anisotropía, el otro conjunto de valores [0.05 - 0.09] indica una zona de mayor espesor o grado de anisotropía por que la diferencia de las ondas S aumenta.
- Los valores de las estaciones S01, S05 y S06 lo único que indican es que presentan una sola zona de anisotropía entre los valores qS1 -qS1 de [0.01-0.05].

4.4 Graficas de S-P

El valor S-P es la diferencia de tiempo entre los arribos de la onda S respecto a la onda P de los eventos localizados. El tiempo S-P aumenta a medida que la fuente tiene una mayor distancia de la estación.

En las siguientes gráficas S-P vs Polarización (θ) la acumulación de los datos indican que los eventos provienen de la misma zona, de un volumen confinado, es decir, mientras los valores S-P indican la distancia, los valores de polarización (θ) están concentrada alrededor de un valor que indique la dirección preferencial (García, 2006).

Las gráficas de la Figura 4.4.1 muestran valores acotados de polarización (θ) entre $[0-180^\circ]$ y no valores acimutalmente de $[0-360^\circ]$. El motivo de mostrar así las gráficas es para evitar observar dos zonas aparentes de polarización en las graficas de dispersión. Figura 4.4.

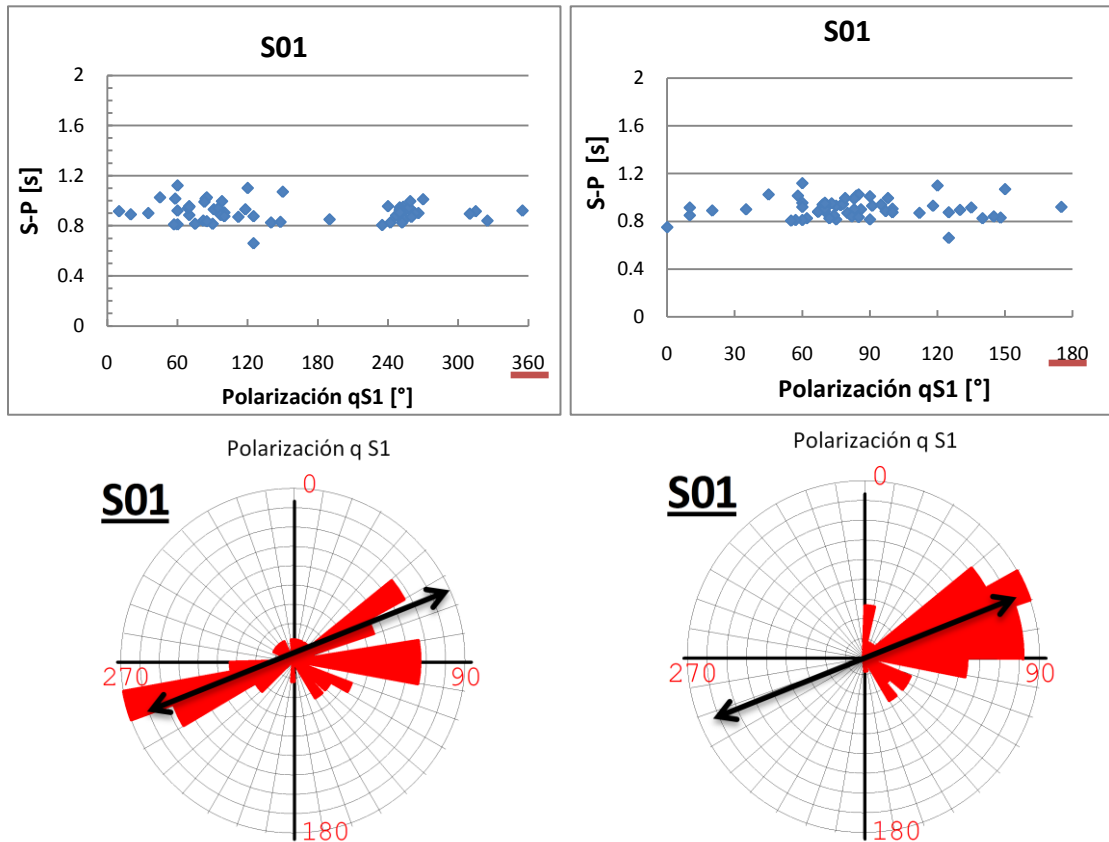


Figura 4.4. Izquierda. La gráfica de dispersión de datos y la roseta de la estación S01 tienen valores acimutales de polarización entre $[0-360^\circ]$, la grafica de dispersión muestra dos zonas $70^\circ-90^\circ$ y 250° °, sin embargo los valores están separadas a 180, en la roseta se observa claramente la polarización preferencial. Derecha. Se observa que restando los 180° a los valores la dirección de polarización qS1 se mantiene en una sola zona, la roseta muestra valores entre $[70^\circ-90^\circ]$.

Con las modificaciones anteriores los valores de polarización se encuentran confinados en una sola zona Figura 4.4 además de que se tienen una mejor visualización en ambos tipos de gráficos.

Los valores de polarización qS1 contra S-P de cada una de las estaciones para el periodo de 1997-2002 se muestran a continuación.

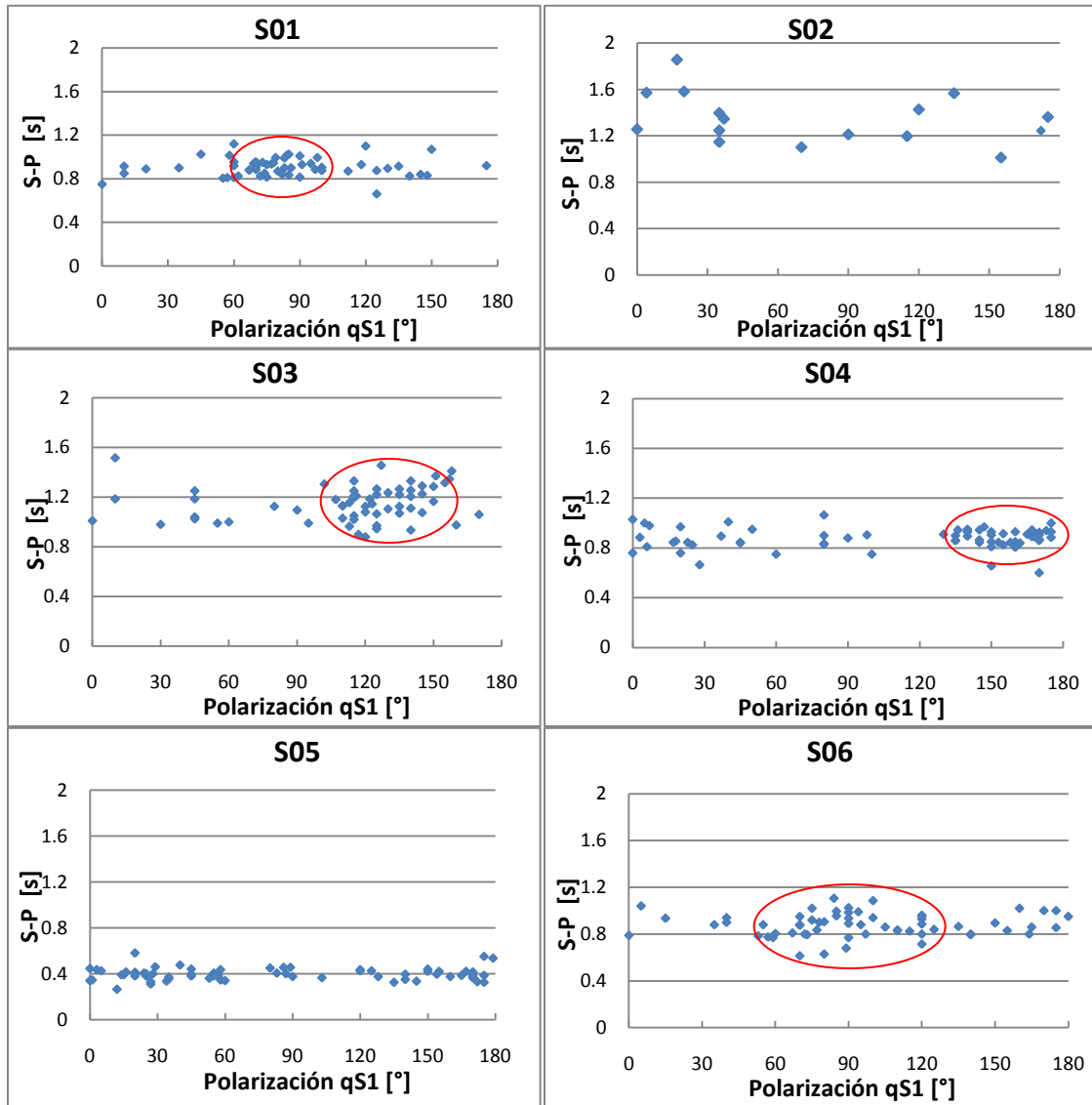


Figura 4.4.1. Las gráficas de polarización qS1 (θ) contra S-P de las estaciones del periodo 1997-2002 muestran valores más agrupados en el eje S-P que el de polaridad (θ). Los valores de S-P están asociados a la distancia y profundidad. Las elipses muestran la mayor concentración de datos. La polarización de las estaciones S05 y S02 se aprecian mejor en graficas de roseta.

El mismo análisis se realizó con los sismos del periodo 2004-2008, el rango de los valores es el mismo que el del periodo anterior. Se observa una menor cantidad de datos.

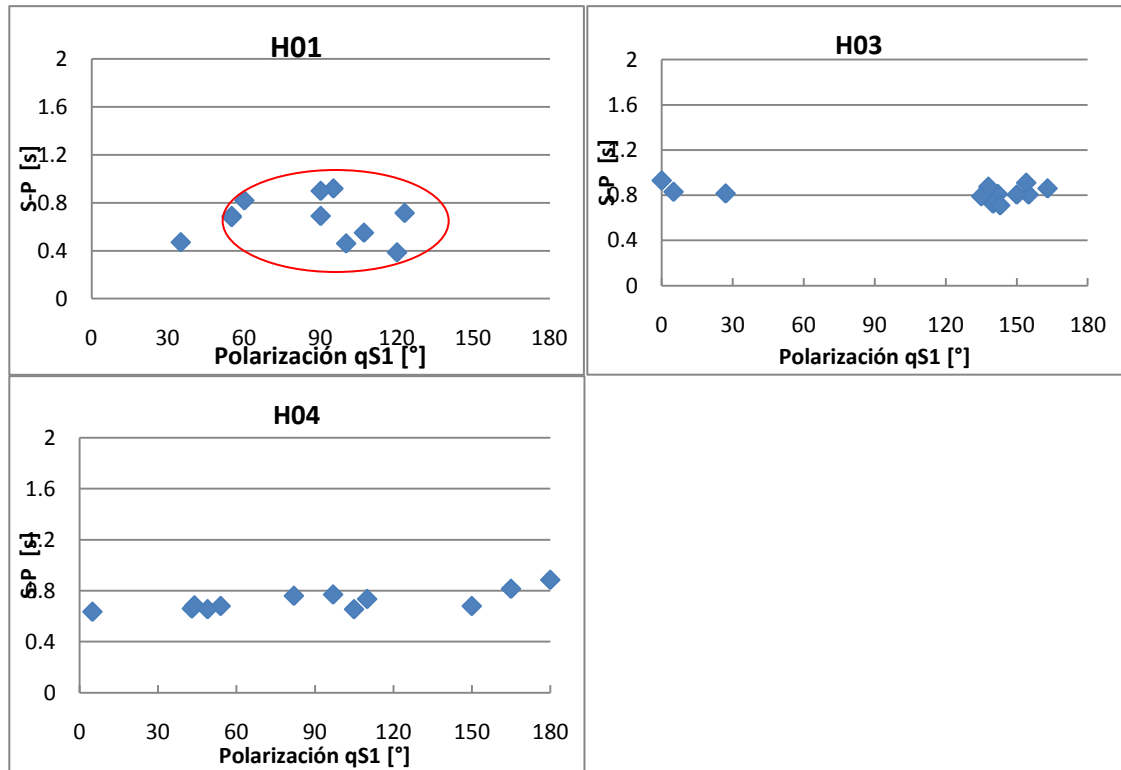


Figura 4.4.2 Gráficas de polarización qS1 (θ) contra S-P del periodo 2004-2008 muestran valores más agrupados en la S-P que la polaridad (θ).

Observaciones:

De acuerdo con los valores de polarización (θ) y el retraso de tiempo se puede determinar que las ondas provenientes de un mismo lugar, tienen una dirección particular en cada estación relacionada con elementos estructurales como las fallas y fracturas.

Estas gráficas son otra manera de visualizar la polarizaciones de la onda qS1 de las estaciones que hasta ahora ha sido el parámetro más representativo para la interpretación de la dirección de fracturas y fallas (Figura 4.4) y al graficarlo con la diferencia de tiempo de ondas S-P permite visualizar de otra manera la presencia de cuerpos anisótropos entre la fuente y las estaciones.

4.5 Esfuerzos tectónicos del Cinturón Volcánico Trasmexicano (CVTM)

El régimen de esfuerzos presentes en la Cuenca del Valle de México y en el campo Los Humeros parece estar relacionados según el análisis de fracturamiento y esfuerzos dentro del Cinturón Volcánico Trasmexicano.

Entre las principales causas de esfuerzos horizontales dentro del Cinturón Volcánico Mexicano se encuentran las propuestas de Cserna et al., (1988) y Suter, (1991).

Cserna et al., 1988, sugiere que el campo de esfuerzos regionales en el Cinturón Volcánico Trasmexicano tiene dirección NE-SW producto del cabalgamiento de la placa Norteamericana sobre la placa de Cocos y la placa Rivera. Este movimiento induce sistemas de fallas y fracturamiento principalmente en dirección NE-SW en el CVTM. Figura 4.5.

Sutter, (2001), propone que la zonas occidente y centro del CVTM está expuesto a esfuerzos distensivos casi N-S mientras que la parte Oriental, cerca del campo Los Humeros, hay esfuerzos E-W son menos evidentes. La causa de dichos esfuerzos, de acuerdo con Suter et al (2001) es que la parte central está colapsando por una compensación isostática por su alta elevación y además en esta parte central la corteza es más delgada (30-40km) que la parte Oriental (40-50km).

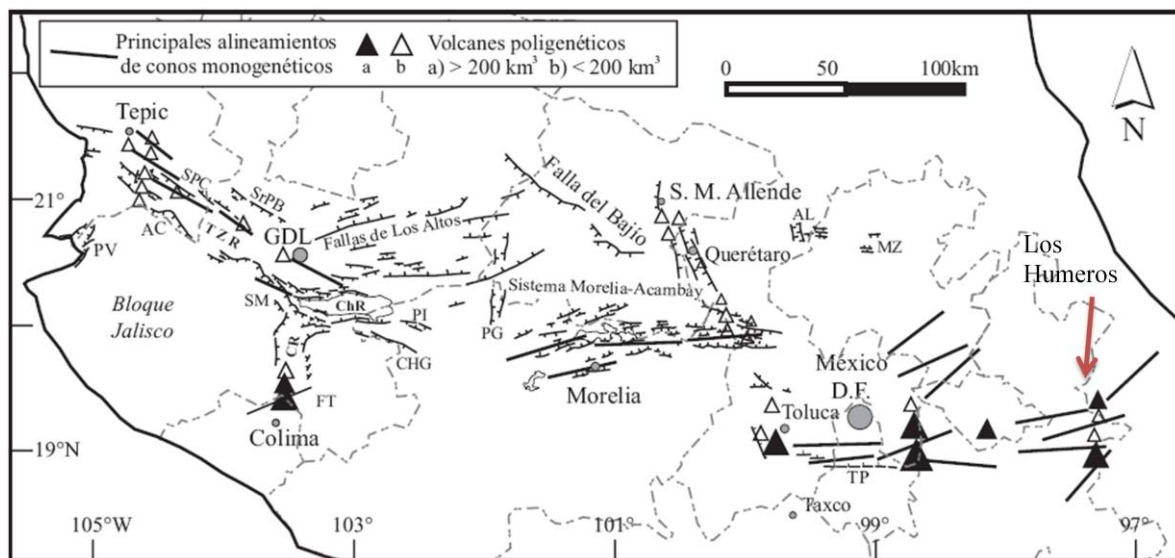


Figura 4.5. Cinturón Volcánico Trasmexicano donde se muestra fracturamiento preferencial NE-SW y NE-SW en gran parte del CVTM. (Gomez-Teuna et al., 2005).