



---

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**TESIS:**

**ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LAS ZONAS GEOTÉRMICAS ACOCULCO Y LOS  
HUMEROS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL  
TERRITORIO**

**PRESENTA: Ing. Geociencias Maria Felix Gaitan Ramirez**

**Asesor: Dr. Víctor Hugo Garduño Monrroy**

**Co-asesor: Dra. Martha Gabriela Gómez Vasconcelos**

**MORELIA, MICHOACÁN FEBRERO DE 2020**

## DEDICATORIA

*A mi familia, mis dos grandes pilares mis padres Ma. Dolores y Victorino; a mis hermanos Laura, Julio y Julissa, mis grandes cómplices y compañeros de aventuras.*

*Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy, por la pasión y amor que siempre mostró en el quehacer científico, mi mentor y ejemplo a seguir.*



## AGRADECIMIENTOS

Por medio de estas líneas deseo expresar mi sincera gratitud a todas las personas e instituciones que me han permitido llevar a cabo este proyecto; en primera instancia a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) por permitirme ser parte del posgrado de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio a cargo del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT), así como al programa CONACYT por otorgarme la beca de maestría.

Al Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy, mi asesor, quien me permitió formar parte de este gran proyecto, por todas sus enseñanzas, consejos y sobre todo por la libertad de acción y pensamiento que en todo momento me dio y quien me permitió ser parte del proyecto GEMex.

Al proyecto GEMex, PT. 4.2: *“Relación entre el fracturamiento y la trayectoria de fluidos en sistemas activos”* por brindar financiamiento a este trabajo de investigación para desarrollar el trabajo de campo.

A mis revisores de tesis Dra. Martha Gabriela Gómez Vasconcelos, Dr. J. Arturo Muñiz Jauregui, Dr. Antoni Pola Villaseñor, Dr. Pedro Corona Chávez, Dra. Aída López Hernández y el Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto, primeramente, por sus revisiones y comentarios; así como aportaciones que han permitido la culminación de este trabajo.

A mis compañeros de proyecto, especialmente Adrián Jiménez Haro, de quien he podido aprender innumerables lecciones, por su paciencia y profesionalismo, así como aportaciones y correcciones. A Mc. Fidel Gómez Alvarez, por las todas tus aportaciones, profesionalismo e interés. A mis compañeros, Javier Gameros, Sergio Nájera, Monserrat Magaña.

Aunado a ello deseo extender mi gratitud a todos aquellos que de alguna u otra manera me han apoyado e impulsado para llegar a este momento: mis profesores de todos los niveles académicos ya que sin sus enseñanzas nada de esto sería posible; a mis padres por impulsarme y apoyarme a cumplir mis sueños y objetivos.

Finalmente agradezco a todo aquel que lea este trabajo por su interés.



## RESUMEN

El análisis estructural detallado es de suma importancia dentro de cualquier proyecto de exploración, no siendo la excepción los que se encuentran enfocados en energía geotérmica, ya que los sistemas de fallas y fracturas representan un importante papel en la circulación de fluidos hidrotermales, de lo cual depende la productividad y viabilidad de la explotación de un yacimiento geotérmico. En el área de estudio se encuentran presentes los yacimientos geotérmicos de Acoculco y Los Humeros, alojados en las secuencias sedimentarias Mesozoicas. Donde estudios realizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en Acoculco indican temperaturas de alrededor de 300 °C y permeabilidad casi nula, mientras el sistema geotérmico de Los Humeros, actualmente en explotación, presenta en su porción norte temperaturas de 380 °C, y baja saturación de fluidos.

En este trabajo se presenta un detallado análisis estructural a distintas escalas de observación; siendo el objetivo reconstruir la evolución de la deformación, identificando las principales estructuras, analizar el campo de esfuerzos actual y su relación con estructuras reactivadas, señalando cuales se encuentran orientadas favorablemente con el tensor de esfuerzos actual y son propicias para la circulación de fluidos hidrotermales.

El análisis morfoestructural y los resultados de levantamientos estructurales escala mesoscópica muestran que esta región ha sido afectada por tres fases de deformación, que incluyen el proceso orogénico Laramide, que dio lugar a una serie de pliegues y cabalgaduras de dirección NW-SE con vergencia al NE, además de sistemas de fracturas propias de la deformación plicativa. Posteriormente, durante el Mioceno, se presenta un régimen de extensión con un Shmín NE-SW, caracterizado por fallamiento normal de dirección NW-SE, vulcanismo fisural y diques piroclásticos, los cuales cortan las estructuras Laramidicas. Posteriormente, durante el Plioceno se desarrolla una serie de fallas normales de dirección NE-SW, conocido como sistema de fallas Apan-Tlaloc, las cuales han formado una serie de Horsts y grabens, influenciando los lineamientos volcánicos monogenéticos del Campo Volcánico Apan-Tezontepec, así como la reactivación del sistema NW-SE como fallamiento lateral, las cuales actúan como un sistema de fallas de transferencia.

Las estructuras con mayor potencial para la circulación de fluidos, de acuerdo con el campo de esfuerzos imperante para esta región caracterizado por un Shmin NW-SE, son las fallas



regionales y zonas de fracturamiento de orientación NE-SW y NW-SE debido a su carácter regional y profundidad de penetración. Aunado a lo anterior, el intenso fracturamiento de la deformación plicativa es de gran importancia, especialmente las fracturas de orientación NE-SW y NW-SE dentro de las secuencias carbonatadas, donde se alojan los sistemas geotérmicos.

Palabras clave: Orogenia Laramide, Análisis cinemático, tensor de esfuerzos, Geotermia, Acoculco, Los Humeros.

## ABSTRACT

The Structural analysis is of paramount importance in any exploration project, with no exception being those focused on geothermal energy, since fault and fracture systems represent an important role in the circulation of hydrothermal fluids, of which the productivity and viability of the exploitation of a geothermal deposit depends. The geothermal deposits of Acoculco and Los Humeros, housed in the Mesozoic sedimentary sequences, are present in the study area. Studies carried out by the Federal Electricity Commission (CFE) in Acoculco indicate temperatures of ca. 300 ° C and almost zero permeability, while the Los Humeros geothermal system, currently in operation, presents in its northern portion temperatures of ca. 380 ° C, and low fluid saturation.

This paper presents a detailed structural analysis at different observation scales; the objective being to reconstruct the evolution of the deformation, identifying the main structures, analyzing the current stress field and its relationship with reactivated structures, pointing out which are favorably oriented with the current stress tensor and are conducive to the circulation of hydrothermal fluids.

The morphostructural analysis and the results of mesoscopic scale structural surveys show that this region has been affected by three deformation phases, which include the Laramide orogenic process that resulted in a series of NW-SE direction folds and ridges with vergence to the NE. In addition to fracture systems typical of the plicative deformation. Later, during the Miocene, there was an extension regime with a  $\sigma_3$  NE-SW, characterized by normal NW-SE faults, fissural volcanism and pyroclastic dikes, which cut the Laramidic structures. Subsequently, during the Pliocene a series of normal faults of NE-SW direction were developed, known as the Apan-Tlaloc fault system, which have formed a series of Horst and grabens, influencing the volcanic guidelines monogenetic of the Apan-Tezontepec Volcanic



*Análisis cinemático de las zonas geotérmicas Acoculco y Los Humeros*

Field, as well as the reactivation of the NW-SE system as lateral faults, as a transfer failure system.

The structures with the greatest potential for fluid circulation, according to the prevailing field of stress for this region characterized by a  $\sigma_3$  NW-SE, are the regional faults and fracture zones with NE-SW and NW-SE orientation, due to their regional character and depth of penetration, coupled with this intense fracturing of the plicative deformation of great importance, suitable to its NE-SW and NW-SE orientation within the carbonated sequences, where the geothermal systems are housed.



## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE .....	vi
Índice de tablas y figuras.....	vii
CAPITULO I.- GENERALIDADES .....	1
I.1.- Introducción .....	1
I.2.- Planteamiento del Problema.....	2
I.3.- Justificación .....	3
I.4.- Objetivos .....	4
I.5.- Localización.....	4
CAPITULO II.- ANTECEDENTES.....	6
II.1.- Marco Geológico .....	6
II.2.- Contexto Estructural.....	9
II.3.- Contexto Geotérmico.....	11
CAPITULO III.- METODOLOGÍA.....	14
III.1.- Recopilación bibliográfica: .....	14
III.2.- Integración de datos geológico-estructurales .....	14
III.3.- Metodología análisis morfoestructural .....	15
III.4.- Análisis micro y mesoestructural .....	17
III.5.- Procesamiento de datos de campo.....	18
CAPITULO IV.- MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL.....	20
Fallas activas y migración de fluidos.....	24
Campo de esfuerzos y circulación de fluidos hidrotermales .....	27
CAPITULO V.- RESULTADOS .....	28
V.1.- Análisis Morfoestructural.....	28
V.2.- Análisis cinemático .....	39
5.2.1.- Fase 1: Compresión NE-SW (Cretácico superior-Paleógeno).....	45
5.2.2.- Fase 2: Extensión NE-SW (Mioceno Superior) .....	48
5.2.3.- Fase 3: Extensión NW-SE .....	54
5.2.4.- Análisis y caracterización de fracturamiento .....	62



5.2.5.- Deformación Caldera Acoculco .....	66
CAPÍTULO VI. - DISCUSIÓN.....	69
VI.1.- Evolución del campo de esfuerzos .....	69
i) Compresión NE-SW.....	69
ii) Extensión NE-SW.....	71
iii) Extensión NW-SE.....	71
VI.2.- Relación del campo de esfuerzos con la circulación de fluidos hidrotermales. Implicación estructural en los yacimientos geotérmicos. ....	74
VI. 3.- Conclusiones.....	76

### Índice de tablas y figuras

<b>Figura 1.-</b> a) Mapa de localización (Sistema de coordenadas geográficas), el contorno rojo delimita la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), y en achurado azul la Sierra Madre Oriental, los límites de las placas tectónicas (líneas de color naranja), zona de subducción (líneas de color rojo), flechas blancas velocidad de convergencia y flechas azul al interior de la FVTM, tensores de deformación; b) zona de estudio (coordenadas UTM), las circunferencias en rojo son las calderas de Acoculco y los Humeros al NW y SE de Horts Chignahuapan, respectivamente; se incluyen las principales vías de comunicación (líneas en blanco), cuerpos de agua y las principales áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepec (OC), Teziutlán (TZ), así como las estructuras: Horst Rosario-Acoculco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh) y el Volcán Cerro Grande (VCG).....	5
<b>Figura 2.-</b> Mapa geológico (modificado del SGM), recuadro en color rojo indica el área de estudio; círculos rojos Caldera Acoculco y Caldera Los Humeros. ....	9
<b>Figura 3.-</b> Mapa estructural tomado de García-Palomo et al. (2018), el cual comprende la porción NW del área de estudio, donde se observa el sistema de fallas Apan-Tlaloc de orientación NE-SW, el cual representa la deformación Plioceno-Pleistoceno del área de estudio. ....	11
<b>Figura 4.-</b> Modelos de sombras con distinto ángulo de incidencia de luz a) 45°, b)135°, c) 225 y d) 315°, con el cambio en este parámetro los patrones lineales que resaltan en cada una de las figuras, muestran importantes variaciones, en a y c las estructuras NW muestran un mayor realce, mientras que en b y d) el realce superior es para las estructuras NE; la Caldera de Acoculco (Cac) y la Caldera de Los Humeros (CLH) (circunferencias en color rojo).....	16
<b>Figura 5.-</b> Estaciones de campo características del área de estudio, a) contacto de rocas mesozoicas y vulcanismo Mioceno sobre Río Axaxalpa, b) planos de estratificación de secuencia carbonatada, c) fallas normales NW-SE en secuencia vulcanosedimentaria del Mioceno y d) fallas al interior de la caldera Acoculco. ....	18
<b>Figura 6.-</b> Ventana principal del programa Wín-Tensor, donde se introducen los datos de análisis. ....	20
<b>Figura 7.-</b> Planos potenciales de fracturamiento desarrollados en pruebas de compresión en laboratorio. (A) Fracturas de extensión (B y C) Fracturas de cizalla (Modificado de Nelson, 2001). ....	22
<b>Figura 8.-</b> Régimen de esfuerzos relacionados con la clasificación hecha por Anderson y características principales, modificada de: Cervený et al. (2004). ....	23
<b>Figura 9.-</b> clasificación de sistemas de fracturas generados por plegamiento, Modificado de Hancock (1985). ....	23
<b>Figura 10.-</b> Esquema que muestra fracturas asociadas a un pliegue. Se muestra también la posición de las fracturas en una proyección estereográfica. modificado de: Twiss y Moores (1992). ....	24
<b>Figura 11.-</b> Configuración estructural característica de los sistemas geotérmicos en la región de la Gran Cuenca. A. Falla normal mayor. B. Curvas en falla normal mayor. C. Punta de falla o terminación con falla. D. Falla de paso o rampa de relevo. E. Intersección de fallas. F. Zona de alojamiento. G. Zona de transferencia de desplazamiento, G. Traslación transversal en la zona de falla principal (modificado de Faults y Hinz, 2015). 26	





**Figura 12.-** Mapa hipsométrico del área de estudio. Valor altitud mínimo 14 m.s.n.m y máximo 3004 m.s.n.m.; en la porción superior derecha de la imagen se ubica el mapa de localización. En el mapa hipsométrico se incluyen las principales vías de acceso, y localidades más importantes en la región: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlan (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepc (OC), Teziutlán (TZ), así como las estructuras: Horst Rosario-Acoculco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh) y el Volcán Cerro Grande (VCG); así como las calderas de Acoculco y Los Humeros. .... 29

**Figura 13.-** Mapa de pendientes, para el cual se empleó una escala de colores con cinco intervalos que responden a 0-10° planicies (color verde<sub>1</sub>), 10°-20°(verde<sub>2</sub>), 20°-30° (amarillo),30°-45° (naranja) y >45° (rojo); además de las principales vías de comunicación y áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlan (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepc (OC), Teziutlán (TZ) ; estructuras volcánicas y estructuras más relevantes: Caldera Acoculco, Horst Rosario-Acoculco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh), Volcán Cerro Grande (VCG), Campo Volcánico Apan Tezontepec (CVAT) y la Caldera Los Humeros..... 30

**Figura 14.-** Mapa de disección vertical, en la leyenda se incluye la escala con los rangos empleados, van de 0 a 880 (separados en 9 rangos, en tonos de rojo) relacionados con las distintas unidades litológicas y estructuras lineales; los valores menores se encuentran relacionados a planicies rellenas por depósitos aluviales recientes, mientras los valores más altos, se encuentran relacionadas a sectores donde afloran las secuencias sedimentarias mesozoicas (porción oriente del Horst Chignahuapan): se incluyen las principales carreteras y área urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepc (OC), Teziutlán (TZ); así como las principales estructuras conocidas como Caldera Acoculco, Horst Rosario Acoculco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh), Volcán Cerro Grande (VCG), Campo Volcánico Apan Tezontepec (CVAT) y la Caldera Los Humeros. .... 33

**Figura 15.-** Mapa de cuencas hidrológicas y clasificación de orden de drenaje. En la leyenda se incluye una clasificación de colores para identificar cada una de las cuencas, mientras que al interior del mapa se cuenta con el nombre de la misma, además se incluyeron las principales vías de comunicación y zonas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepc (OC), Teziutlán (TZ), además las circunferencias punteadas en color negro indican la posición de las zonas geotérmicas de Acoculco y Los Humeros. .... 34

**Figura 16.-** Diagrama de rosa en el cual se incluyen los 10,242 morfolineamientos trazados a partir de los mapas y modelos: hipsométrico, pendiente, disección vertical y redes de drenaje. .... 36

**Figura 17.-** Mapa de morfolineamientos (líneas en color rojo) en el área de estudio, presentan tendencias NW-SE y NE-SW principalmente, se incluyen las principales vías de comunicación y áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepc (OC), Teziutlán (TZ). .... 37

**Figura 18.-** Mapa comparativo entre la densidad de drenaje a) y densidad de lineamientos b), al interior de la zona de estudio en ambos casos los sectores donde el color es rojo más intenso, representan zonas con mayores densidades, siendo muy similares para el sector centro del Horst Chignahuapan y oeste de la caldera Acoculco. Donde se incluyen las principales vías de comunicación y área urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepc (OC), Teziutlán (TZ). .... 38

**Figura 19.-** Características geométricas y datos cinemáticos de campo: a) gráfica pitch/inclinación de datos extracaldérea; b) diagrama de rosas, para el cual se excluyen estaciones all interior de la Caldera Acoculco y relacionados a la Orogenia Laramide; c) datos al interior de la Caldera Acoculco. .... 40

**Figura 20.-** Características de estructuras NW-SE: a) diagrama de rosas (N290°-340°); b) estereograma de datos de falla; c) diagrama pitch/inclinación con predominio de fallas con desplazamiento vertical (normal, de acuerdo con los datos de campo), fallas con desplazamiento a rumbo y un tercer grupo con estrías oblicuas; d, e, f, g, h, i) estereogramas separados por cinemática de fallas: d) falla normal con componente lateral izquierda, e) falla normal con componente lateral derecha, f) y g) corresponden a fallas con estrías oblicuas entre 31° y 59° con componente izquierdo y derecho respectivamente, h) falla laterales izquierdas y i) fallas laterales derechas. .... 41

**Figura 21.-** a): Diagrama de rosas de fallas NE-SW donde sobresalen dos tendencias N20°-N30° y N60°-70°; b): estereograma con planos de dirección NE-SW; c): grafica de relación pitch/ inclinación, la presencia de fallas con movimiento en la vertical, movimiento oblicuo y movimientos horizontal, en la parte inferior se presentan planos de fallas y estrías relacionados con fallas; d): normal con componente izquierda; e): falla normal con componente derecha; f) y g): planos de falla con estrías oblicuas izquierda y derecha h) e i): fallas con desplazamiento lateral izquierdo y derecho, respectivamente. .... 42



**Figura 22.-** Mapa geológico-estructural, en el cual se han considerado la presencia de 4 unidades del Jurásico (inferior, medio y superior en colores azul); 4 del Cretácico (inferior, medio, superior polígonos de color verde); vulcanismo del Mioceno, sedimentos del terciario (al NE del área), vulcanismo del Mioceno y el relacionado con las calderas de Acoculco y Los Humeros. Se incluyen las principales estructuras principales como: Falla Apan (FAp), Falla Chignahuapan (FCh), Falla Axaxalpa (Fax), Falla Acoculco (FAc), Falla Tlaxco (FTx) y la Falla Tlaxcala (FTIx), sí como el Horst Rosario Acoculco (HRA), Horst Chignahuapan (HCh), Graben Chignahuapan (GCh). Donde las fallas normales (color rojo oscuro), lineamientos volcánicos del Campo Volcánico Apan-Tezontepec (líneas punteadas en color amarillo). Las principales vías de comunicación y áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepc (OC), Teziutlán (TZ). ..... 44

**Figura 23.-** Plegamiento característico, en las secuencias calcáreas del cretácico, a), c) y d) pliegues chevrón y b) pliegue apretado acostado. .... 45

**Figura 24.-** Plegamiento característico en unidades sedimentarias jurásicas, a) capas deformadas en vista panorámica de la estación Acf\_190; b) fotografías pliegues de escala métrica en estación Acf\_125. .... 46

**Figura 25.-** Estructuras de deformación característica de la orogenia Laramide (Acf\_70), a): falla inversa y b): pliegues tipo chevron. .... 46

**Figura 26.-** Mapa estructural, con la localización de las estaciones en las cuales se calcularon los tensores de esfuerzo característicos de la orogenia laramide, así como los estereogramas de este cálculo, en los cuales se ha observado una etapa compresiva NE-SW característica, se han incluido las principales áreas urbanas: Huachinango (HCH), Zacatlán (Zc), Chignahuapan (CH), Aquixtla (AQX) y Ocotepc (OC), unidades estratigráficas las vías de comunicación, de lado derecho se encuentran diagramas con solución de esfuerzos para esta fase, y en la esquina superior izquierda los valores de los planos de estratificación medidos en campo. Se incluyeron las unidades sedimentarias mesozoicas (leyenda: azul para unidades del jurásico y verde para las del cretácico). .... 47

**Figura 27.-** Diagrama de líneas tangentes para fallas normales de orientación NW-SE (línea en color morado: M), su polo (círculo relleno en rojo) el plano tangente ( $\sigma_3$ ) (la línea punteada en color negro) y el plano de falla NE-SW secundario (línea color rojo); b): triángulo rectángulo, en el cual se simula la relación directa existente entre la inclinación del plano de falla (hipotenusa) y el desplazamiento existente en la horizontal ( $x=C.A.$ ). ... 48

**Figura 28.-** Fallas NE-SW y NW-SE cortando depósitos sedimentarios secuencia Nocoyoco, del lado derecho estereograma de datos de campo estación Acf\_201, modelo 2D y 3D de los planos de falla NW-SE y NE-SW contemporáneos. .... 49

**Figura 29.-** a): Afloramiento de la estación Acf\_133 localizada sobre la Ignimbrita Matamoros (el óvalo de color amarillo indica la escala); b): estrías verticales de movimiento normal característicos de los planos de falla; c) y d): soluciones de campo de esfuerzos para fallas normal con componente lateral izquierda y derecha respectivamente. .... 50

**Figura 30.-** Fallas NW-SE en las estaciones 159, 160 y 161; a): plano de falla; b): estrías características de fallas NW-SE; c) y d): dique piroclástico emplazado en una falla normal NW-SE situada al sur del Volcán Cerro Grande. .... 51

**Figura 31.-** Fallas normales de orientación NW-SE, afectando la secuencia sedimentaria Nocayoco. .... 52

**Figura 32.-** Mapa estructural de la extensión NE-SW del Mioceno, se incluyen las estaciones para esta fase de deformación, así como estereogramas con paleotensor de esfuerzo calculado, además se incluyen las principales vías de comunicación y área urbanas: Chignahuapan (Ch), Zacatlán (Zc), Apizaco (Apz), Apan (Ap), Oriental (OR), Ocotepc (OC), Teziutlán (Tz), Huachinango (HCH), Aquixtla (Aqx), Tepeapulco (Tp), Tulancingo (TGO); principales estructuras: Caldera Acoculco (CAc), Caldera Los Humeros (CLH), Horst Rosario Acoculco (HRAc), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh). Las estructuras relacionadas entre las que se encuentran fallas normales (en color rojo) NW-SE: Falla Tlaxco (FTx), y el Sistema de Fallas Nocoyoco (SFNy); colapsos (en negro); Dique (Color morado); fallas laterales (líneas en rojo), en color naranja se encuentran la Falla Acoculco (FAc) y Falla Piedras Encimadas (FPE), aunado a ello se presentan las unidades de este periodo (leyenda) ..... 53

**Figura 33.-** Diagramas de líneas tangentes. En rojo planos de falla principal (Fallas normal con componente lateral izquierda); en amarillo plano tangente que contiene la estría y el polo del plano de falla; y en negro plano de falla NW-SE. .... 54

**Figura 34.-** a): vista panorámica de la mesa de basaltos, paralela a la falla N 60°; b): estación Acf\_181 de falla NE-SW cortando calizas cretácicas; c): acercamiento de plano de falla con estrías; d): estereograma de datos de falla con dos etapas de movimiento (en rojo movimiento normal y negro desplazamiento lateral). .... 55

**Figura 35.-** a) Plano de falla Axaxalpa en la estación Acf\_100; b): diagramas con las características de los planos de falla medidos en campo sobre la traza de Falla Axaxalpa en el cual se han graficado la relación pitch vs inclinación, el cual muestra que la mayoría de los datos representan un movimiento vertical se da en planos



con ángulos mayores a 55°; c) estrías características de la Falla Axaxalpa .en la estación Acf\_81; d): estereograma con planos de falla con los datos de la estación acf\_100. .... 56

**Figura 36.-** Datos de la estación Acf\_30, los cuales son representativos de la Falla Chignahuapan. a): estereograma de una falla normal con componente lateral izquierda que se encuentran buzando al sureste en la estación Acf\_30; b): diagrama de rosas para el buzamiento de los planos que es entre 50° a 65°, característicos de una falla normal; c): diagrama de rosas de dirección del plano de fallas (30°-40°)..... 57

**Figura 37.-** Afloramiento sobre depósitos piroclásticos relacionados a la actividad de la Caldera Acoculco, que fueron cortados por planos de fallas normales NE-SW con buzamiento al NW, en la estación Acf\_144, en la esquina superior derecha se muestra estereograma con planos de falla medidos en campo y solución de esfuerzos calculados con un  $\sigma_3$  NW-SE. .... 58

**Figura 38.-** Estrías en plano de fallas Acoculco, Acf\_15 estrías oblicuas y Acf\_49 en donde se presentan tanto estrías oblicuas como horizontales, y diagramas elaborados en win-tensor con el módulo PBT que permite la visualización de los planos y las estrías para la caracterización de los mismos. .... 59

**Figura 39.-** Estereogramas de fallas laterales izquierdas, en las estaciones Acf\_76, 142 y 143, a) las líneas en rojo y naranja corresponden a fallas con cinemática lateral izquierda, mientras que las de color negro muestran una componente normal mayor. .... 60

**Figura 40.-** Mapa estructural al centro de la imagen , que incluye estructuras de deformación entre las que se encuentran fallas NE-SW: Falla Apan (FAp), Falla Chignahuapan (FCh), Falla Axaxalpa (Fax), y NW-SE: Falla Acoculco (FAc) y Falla Tlaxco (FTx), estaciones estructurales (puntos en color rojo); lineamiento volcánicos (líneas punteadas en color amarillo), dique (amarillo) y colapsos (en color negro), los yacimientos geotérmicos : Caldera Acoculco (CAc) y Caldera Los Humeros; las principales vías de comunicación y área urbanas: Chignahuapan (Ch), Zacatlán (Zc), Apizaco (Apz), Apan (Ap), Tepeapulco (Tp), Oriental (OR), Ocotepc (OC), Teziutlán (Tz), Tulancingo (TGO), Huachinango (HCH), Aquixtla (Aqx) ..... 61

**Figura 41.-** Datos de fracturas en la estación Acf\_163; a): estereograma de fracturas cerradas; b1) a b4) fracturas cerradas rotadas (plano S0 en la horizontal) y clasificación de fracturas: b1) rosa mexicano fracturas de tensión AC, amarillo fracturas de tensión BC las cuales son paralelas a la dirección del pavimento; b2) fracturas conjugadas HKO respecto al ángulo "b". .... 63

**Figura 42.-** a): fracturas cerradas NNE y NE-SW (líneas color negro) y relación con plano S0 (línea color verde); b): fracturas cerradas después de ser rotadas, fracturas de tensión BC (líneas color amarillo), fracturas tensión AC (líneas de color rojo), set de fracturas conjugadas OKL respecto al ángulo C (líneas color de color azul), y fracturas que no muestran relación con el sistema de plegamiento (líneas color negro); c): fracturas abiertas de dirección preferencial NE-SW medidas en el afloramiento; d): fotografía de afloramiento, la flecha en amarillo indica el norte, y en rojo se han remarcado las fracturas; e): bloque idealizado de los sets de fracturas cerradas de tensión BC (líneas amarillas), fracturas AC (líneas color rojo), fracturas OKL -> C (líneas color azul), y. 63

**Figura 43.-** a): Estereograma con fracturas cerradas de dirección NE-SW, NNE y NNW; plano S0 (líneas color verde) y su polo respectivo (circulo verde); b): fracturas de tensión AC (líneas color rosa) y fracturas de tensión BC (líneas color amarillo), sistema de fracturas conjugada OKL respecto a "c" en color rojo y en negro fracturas HKL; c): fracturas abiertas de dirección NE-SW y cálculo de esfuerzos para esta estación; d): afloramiento y localización de plano de estratificación sobre el cual se tomaron datos de fracturas e): vista ideal de sistemas de fracturas con la misma leyenda de colores de inciso b)..... 64

**Figura 44.-** fracturamiento en estación Acf\_171, a) fracturas cerradas; b1, b2 y b3: fracturas cerradas tras ser rotadas, clasificadas de acuerdo con el modelo de Hancock, (1985); fracturas de tensión BC (en color amarillo), fracturas tensión AC (líneas de color rosa); b2) fracturas de cizalla OKL "c" (color rojo de orientación ENE), HOL "c" (rojo NNW-SSE) y b3) otras no clasificadas; c) fracturas abiertas; d) fotografía con fracturas NE-SW abiertas, características de la estación. .... 65

**Figura 45.-** Características de fracturamiento en Acf\_175, a) estereograma de fracturas cerradas, la línea y el punto verde representan los valores S0; b) imagen de pavimento fracturado en rojo fracturas cerradas y en negro fracturas abiertas c) fracturas cerradas después de ser rotadas, en color amarillo fracturas de tensión BC, en rosa fracturas de tensión AC, en rojo fracturas OKL respecto al ángulo c; d) modelo de fracturas (misma leyenda que en c; e) fracturas abiertas de la estación. .... 65

**Figura 46.-** Diagrama de rosas de fracturas en conos cineríticos del Campo monogenético Apan-Tezontepec. .... 66

**Figura 47.-** Características de planos de falla al interior de la caldera Acoculco; a) relación pitch/inclinación. 67

**Figura 48.-** planos de falla característicos; a) Acf\_137, fallas normales E-W, al interior de la caldera Ac; b) falla NNE-SSW en estación Acf\_135..... 68

**Figura 49.-** a) Sedimentos del plioceno deformados en las proximidades del pozo EAc\_01, al interior de la Caldera Acoculco; b) estereograma de fracturas en los sedimentos. .... 68



**Figura 50.-** Diagramas de datos estructurales recabados al interior de la caldera Acoculco; a): diagrama de rosas de fallas al interior de la caldera, las figuras b, c, d, e y representan estaciones estructurales donde se puede ver los distintos planos de falla y su cinemática..... 69

**Figura 51.-** a) Pliegues chevron característicos de la deformación Laramide (Acf\_70); b) cálculo de acortamiento en la estación Acf\_178..... 70

**Figura 52.-** Fracturas (en color naranja) características producto de deformación plicativa en unidades sedimentarias Mesozoicas..... 70

**Figura 53.** Columna estratigráfica compuesta del área de estudio, del lado derecho se encuentran las tres fases de deformación con las estructuras principales asociadas y fallas de transferencia para la extensión NE-SW y NW-SE..... 73

**Figura 54.-** Modelo estructural local, en el cual se muestran la distribución de los pozos geotérmicos EAC\_01 y EAC\_02 (puntos en rojo), geometría de los trenes de fallas, su cinemática, el vector  $\sigma_3$  regional (flechas en color verde) y local (flechas en color azul) para el área de los pozos geotérmicos. .... 75

**Figura 55.-** líneas de intersección de fracturas en la vecindad de pozos geotérmicos: a) fracturas NE-SW y b) fracturas NW-SE..... 76

**Tabla 1.-** Índices geomorfológicos empleados en este estudio, método de cálculo y características más relevantes. .... 15

**Tabla 2.-** Información general de subcuencas hidrológicas en el área de estudio. .... 17

**Tabla 3.-** Ejemplo de estación estructural en base de datos empleados, posteriormente para su análisis con los softwares Dips, Spheristat y/o Win-Tensor. .... 19

**Tabla 4.-** Parámetros de cuenca y subcuenca en el área de estudio ..... 32



## CAPITULO I.- GENERALIDADES

### I.1.- Introducción

México es un país privilegiado por la cantidad de recursos geotérmicos que posee, según datos de la International Renewable Energy Agency (IRENA), se ubica en sexto lugar de capacidad instalada con 951 Mw en 2019, lo cual representa menos del 2% de la energía eléctrica producida en territorio nacional, situándose por debajo de países como Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía y Nueva Zelanda. Por lo cual, recientemente se han llevado a cabo distintos proyectos de exploración como: CEMIE-geo y GEMex; que consisten en estudios multidisciplinarios enfocados en la caracterización de zonas potenciales para la explotación de este valioso recurso.

Este trabajo se ha llevado a cabo como parte del proyecto GEMex PT. 4.2: “Relación entre el fracturamiento y la trayectoria de fluidos en sistemas activos”. Debido a que el análisis estructural forma parte de los estudios integrales que se desarrollan en distintas etapas de la exploración en zonas geotérmicas, tanto para la evaluación de zonas de interés geotérmico como para campos geotérmicos en explotación. Durante la etapa de exploración, los estudios estructurales permiten caracterizar las redes de fracturamiento que controlan el movimiento de fluidos en el sistema geotérmico, así como las condiciones del campo de esfuerzos imperante en la región (OLADE, 1994). El análisis cinemático nos permite definir la evolución tectónica, conocer la relación que existe entre el tensor de esfuerzos regional con la geometría de las fallas y fracturas que afectan al sistema geotérmico y entender cuáles de éstas son favorables para la circulación de los fluidos dentro de toda la red de estructuras en el sistema.

En la región de estudio, los análisis geológicos han sido numerosos y de carácter multidisciplinario (Gómez-Tuena y Carrasco-Núñez; 2000; García-Tovar et al., 2015, Gómez-Alvarez 2019) , sin embargo, pocos trabajos han abordado el aspecto estructural regional, donde García-Palomo et al. (2002; 2018) han definido el Sistema de fallas Apan-Tlaloc de dirección NE-SW, mientras que al oriente de la región Andreani et al. (2008), mencionan la presencia de una estructura NW-SE, la cual representa la continuación de la Falla Veracruz. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en los sectores de los yacimientos geotérmicos, siendo los de carácter geológico (López-Hernández et al., 2009; Sosa-Ceballos et al., 2018; Avellán et al., 2018) los principales en el área de



Acoculco. Mientras que en la región de Los Humeros se contempla tanto la caracterización geológica (Arellano et al., 2000; Wilcox, 2011; Carrasco-Núñez et al., 2015, 2017, 2018), estructural tanto por geólogos de CFE (datos expuesto en reuniones del proyecto GEMex) como por otros autores (Carrasco-Núñez et al., 2015; Norini et al., 2019), así como de carácter geofísico (Gutiérrez-Negrín y Quijano León, 2004; Lermo et al., 2008; Arellano et al., 2000, 2011).

El objetivo de esta tesis es reconstruir la evolución tectónica y estructural, identificando los estilos de cada una de sus etapas, analizar el campo de esfuerzos actual y su relación con estructuras reactivadas, así como identificar los sistemas estructurales propicios para la circulación de fluidos hidrotermales de interés económico.

## **I.2.- Planteamiento del Problema**

Al interior de los sistemas geotérmicos, la comprensión de las redes de fracturas juega un papel primordial, es por ello que el análisis geológico estructural es parte integral en la fase de exploración de cualquier proyecto geotérmico (OLADE, 1994). La reconstrucción de las fases de deformación nos permite conocer la cronología de formación de los distintos sistemas de fallas y fracturas y su relación con los sistemas geotérmicos.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) clasificó al yacimiento de Acoculco como EGS (sistema geotérmico mejorado) debido a que al perforar dos pozos encontraron temperaturas de alrededor de 300 °C a una profundidad de 2,000 m con ausencia de fluidos y baja permeabilidad. Por lo que, el sistema geotérmico fue considerado propicio para el desarrollo de un sistema geotérmico mejorado (Enhanced Geothermal System), donde los estudios principalmente han sido de carácter geológico (López-Hernández et al. (2009); Sosa-Ceballos et al., 2018; Avellán et al., 2018, 2019). Por otra parte, en el campo geotérmicos de Los Humeros se han identificado dos yacimientos geotérmicos a distinta profundidad (Arellano et al., 1998) con temperaturas de 280° (1600 a 1025 msnm) y ~330 °C debajo de los 850 m, este último considerado como un SHGS (Sistema geotérmico supercaliente), y presenta una baja saturación de líquido, en el cual se han llevado a cabo numerosas investigaciones de carácter geológico (Ferriz y Mahood, 1984; Wilcox, 2011; Carrasco-Núñez et al., 2017, 2018).

El presente trabajo de tesis surge debido principalmente a que se desconoce la relación entre los sistemas de fallas y la red de fracturamiento de la zona, así como la cronología, geometría y demás características; por lo cual no se ha podido determinar con certeza



cuáles sistemas de fallas y fracturas son favorables para la conducción de fluidos hidrotermales actualmente. Por lo anterior, la presente investigación está enfocada en determinar la evolución cinemática, así como la presencia de distintas estructuras aprovechando que ambos yacimientos presentan un basamento común, el cual aflora en el alto estructural conocido como Horst Chignahuapan (HCh), teniendo como fin principal definir si las fallas y fracturas presentes que pueden servir para que los fluidos hidrotermales puedan llegar a la superficie del terreno.

### **I.3.- Justificación**

Al interior del área de estudio se encuentran dos yacimientos geotérmicos: Las Calderas de Acoculco y Los Humeros. Sin embargo, los estudios geológicos estructurales únicamente se han enfocado en el interior de las zonas geotérmicas, como en Los Humeros donde distintos análisis contemplan la interacción de estructuras producto de la deformación de la caldera y el tensor de esfuerzos regional (CFE, 5 reunión GEMex; Norini et al., 2019), o bien el análisis de sistemas de fallamiento específicos como el analizado al NE del Horst Chignahuapan por García-Palomo et al. (2002, 2018); la Falla Agua Blanca (Andreani et al., 2008); mientras el interior del HCh, y zonas aledañas han sido poco o nulamente estudiadas debido al mayor énfasis de estudio en las zonas geotérmicas. Por lo anterior, y a partir de la caracterización de los diferentes sistemas de fallas y fracturas, cronología, geometría, actividad y características físicas, se podrán definir áreas de interés en ambas zonas geotérmicas (Acoculco y los Humeros), que presenten en subsuelo zonas de permeabilidad importante con características de flujo de fluidos ideales para la producción. Esto reducirá la incertidumbre haciendo que más número de pozos sean exitosos. Respecto a la estimulación hidráulica en Acoculco, este conocimiento servirá como base para la planeación de la prueba de estimulación hidráulica e incluso en un caso ideal, evitar la estimulación explotando a este sistema geotérmico como un yacimiento convencional.

**Hipótesis:** El campo de esfuerzos cuaternario (actual) ha incrementado la permeabilidad secundaria a partir de la presencia de estructuras frágiles, las cuales se encuentran orientadas favorablemente con el campo de esfuerzos, permitiendo el ascenso de fluidos en sectores intensamente fracturados al interior del yacimiento geotérmico.



#### I.4.- Objetivos

**Objetivo General:** Definir y caracterizar los sistemas de fallas y fracturas, su evolución espacio temporal, cronología, características físicas y geométricas para entender su relación con los sistemas geotérmicos de Acoculco y Los Humeros.

#### Objetivos específicos:

- Reconocer las principales unidades estructurales.
- Realizar la cartografía geológico estructural del área de estudio.
- Llevar a cabo un análisis meso y microestructural.
- Realizar un análisis cronológico del fallamiento y fracturamiento.
- Analizar el fracturamiento en las unidades mesozoicas con base en su génesis.
- Determinar la relación que existe entre las estructuras producto de la deformación frágil de edad reciente con los sistemas geotérmicos Acoculco y Los Humeros.
- Definir la evolución del campo de esfuerzos con base en el análisis estructural de fallas a partir del análisis de indicadores cinemáticos.
- Caracterizar el campo de esfuerzos actual en ambas zonas.
- Definir áreas con características de permeabilidad más favorables.

#### I.5.- Localización

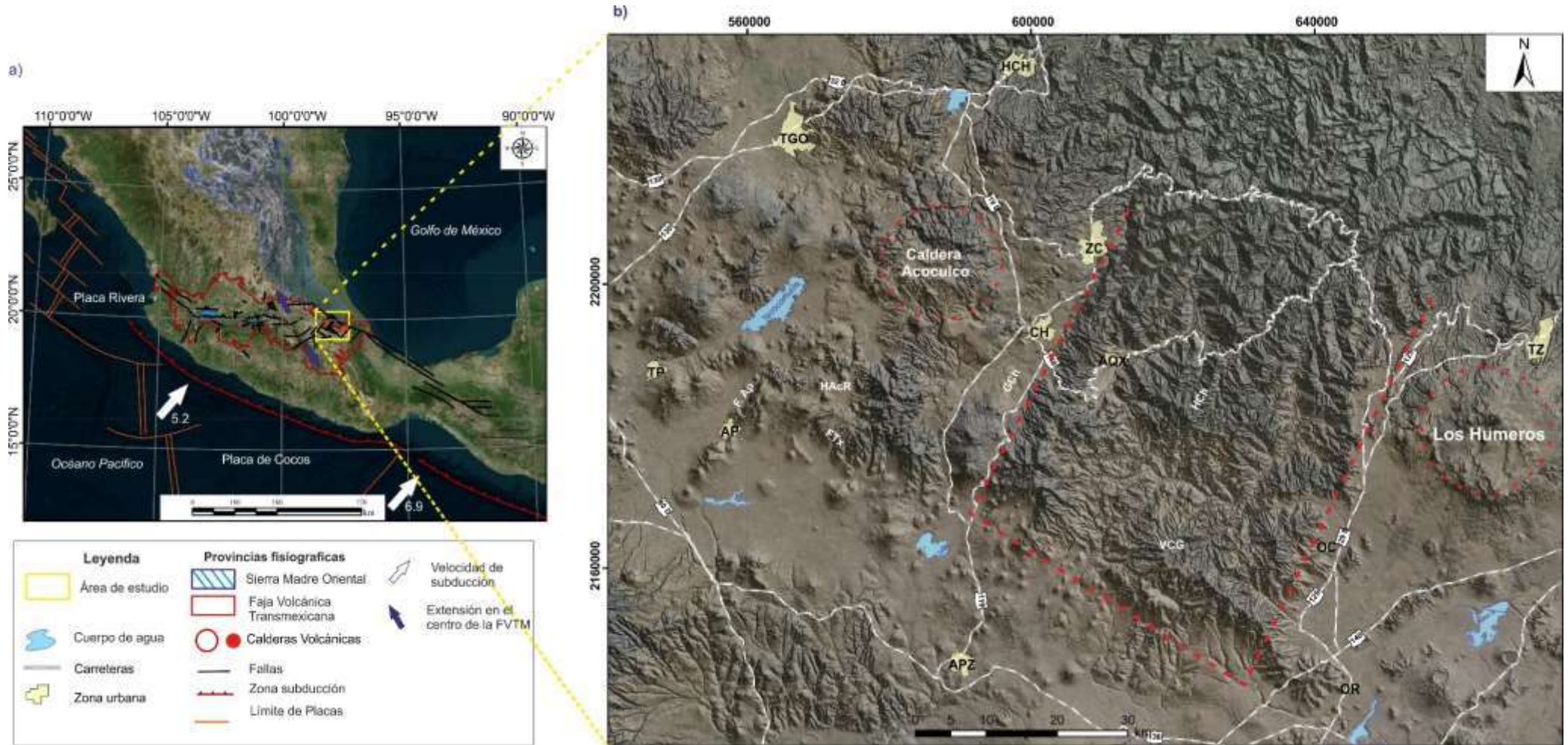
El área de estudio se encuentra en la porción centro-oriente de la República Mexicana en territorio de los estados de Puebla, Veracruz, Tlaxcala e Hidalgo, cubriendo un área total de 13, 340 km<sup>2</sup>, limitado por las coordenadas UTM 2135116 a 2234794 m latitud norte y 674556 a 540504 m longitud este, en la región 14 N en el sistema de coordenadas UTM (Fig. 1). Las principales vías de comunicación están constituidas por las carreteras federales 130, 132 D, 119, 119 D, 129, 129 D, 40, 140 y 148, además de numerosas terracerías que comunican las distintas comunidades.

Desde el punto de vista geológico, esta región se ubica en la intersección de las provincias geológicas Sierra Madre Oriental (SMOr) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). En la figura 1a, se observan estas dos provincias geológicas y la ubicación de la zona de estudio, en cuyo interior se encuentran dos yacimientos geotérmicos (Fig. 1 b): la caldera de Acoculco y la caldera de Los Humeros. Estos dos sistemas de calderas se encuentran separadas por el Horst Chignahuapan, sitio en el que se expone el basamento de ambos yacimientos.





*Análisis cinemático de las zonas geotérmicas Acozulco y Los Humeros*



**Figura 1.-** a) Mapa de localización (Sistema de coordenadas geográficas), el contorno rojo delimita la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), y en achurado azul la Sierra Madre Oriental, los límites de las placas tectónicas (líneas de color naranja), zona de subducción (líneas de color rojo), flechas blancas velocidad de convergencia y flechas azul al interior de la FVTM, tensores de deformación; b) zona de estudio (coordenadas UTM), las circunferencias en rojo son las calderas de Acozulco y los Humeros al NW y SE de Horts Chignahuapan, respectivamente; se incluyen las principales vías de comunicación (líneas en blanco), cuerpos de agua y las principales áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocoteppec (OC), Teziutlán (TZ), así como las estructuras: Horst Rosario-Acozulco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh) y el Volcán Cerro Grande (VCG).

## CAPITULO II.- ANTECEDENTES

Los estudios que se han llevado a cabo en el área son numerosos y variados, sin embargo, pueden ser agrupados de acuerdo a los resultados por ellos obtenidos y las características de este análisis. Esta subdivisión toma un papel más práctico: (1) contexto geológico, (2) marco geológico estructural, (3) así como aquellos relacionados directamente con los recursos geotérmicos.

### II.1.- Marco Geológico

La zona de estudio se encuentra en el límite oriente de la FVTM donde se intercepta con la SMOr, donde los trabajos realizados por PEMEX constituyen la base cartográfica de las cartas geológico-mineras escalas 1:250,000 (Fig. 2): Pachuca (F14-11), 1997; Ciudad de México (E14-2), 2002; Poza Rica (F14-12), 2004; Veracruz (E14-3) 2002 y 1:50,000: Huachinango (F14-D83), 2005; Chignahuapan (E14-B13), 2017; Filomeno Mata (F14-D84), 2017; Zacatlán (E14-B14), 1997; Mexcaltepec (E14-B24), 2012; Teziutlán (E14-B15), 2011; y Xonacatlán (E14-B35), 2011. Donde las unidades más antiguas reportadas en el área de estudio corresponden al macizo Teziutlán, que comprende un complejo cristalino paleozoico-mesozoico de rocas metamórficas e intrusivas, incluyendo esquistos verdes, granodioritas y granitos (246–131 Ma, K / Ar; [Yáñez-García y García-Duran, 1982](#)), cubiertas por las unidades de la SMOr. La cual ha sido definida como una cordillera de dirección preferencial NNW-SSE, con una longitud de más de 800 km y un ancho variable entre 80 a 100 km, situada en la porción noreste de la República Mexicana ([Eguíluz et al., 2000](#)), la cual se extiende desde Parral Chihuahua hasta Zongolica Veracruz ([Chavez-Cabello et al., 2011](#)). Esta cadena montañosa se generó tras la deformación y levantamiento de unidades principalmente mesozoicas plegadas y cabalgadas durante la Orogenia Laramide del Cretácico tardío-Paleoceno.

En la zona de análisis, las secuencias sedimentarias de la SMOr afloran en la porción centro-oriental, en el denominado Horst Chignahuapan ([García-Palomo et al., 2002](#)) y en el sector este en una franja de dirección NW-SE, conformada por unidades sedimentarias que constituyen el basamento regional, donde se instauraron los sistemas geotérmicos. Las secuencias de basamento fueron cortadas por los pozos perforados por la CFE: en la Caldera Acoculco (CAc) ([Lorenzo-Pulido et al., 2011](#)) y la Caldera Los Humeros (CLH) ([Cedillo et al., 1994](#); [Carrasco-Núñez, et al., 2008](#), [Viggiano-Guerra et al., 2011](#)), así como en pozos profundos perforados en la cuenca de México por PEMEX. Estas unidades fueron depositadas durante la apertura y evolución de la cuenca del Golfo de México, y corresponden a secuencias sedimentarias de origen



terrágeno continental del Jurásico y carbonatos de origen marino depositados durante el Cretácico (De la Cruz y Castillo Hernández, 1986; SGM, 1997, 2000; Eguíluz *et al.*, 2000; Padilla y Sánchez, 2007; López-Hernández *et al.*, 2009). Según el Servicio Geológico Mexicano (SGM), las principales unidades de la SMO que afloran y que se han reportado en subsuelo en el área de estudio corresponden a las formaciones Cahuassas, Tepexic, Tamán, Pimienta, Tamaulipas inferior, Tamaulipas superior, Agua Nueva-San Felipe y Méndez.

Además, Las rocas sedimentarias mesozoicas son cortadas por cuerpos intrusivos de composición granodiorítica y sienítica, con edades que varían entre 50 y 14.5 Ma en la cuenca Libres Oriental (De Cerna *et al.*, 1974 y Yañez-García y García-Duran, 1982), y dentro del Horst Chignahuapan se reportan una serie de intrusivos de composición granítica-diorítica, con edades de  $23.6 \pm 0.7$  Ma a  $7.27 \pm 0.11$  Ma (Gómez-Alvarez, 2019). Aunado a ello estas secuencias sedimentarias, están cubiertas discordantemente por sucesiones de vulcanismo de la FVTM, la cual ha sido definida como el arco volcánico reciente de aproximadamente 1,000 km de longitud y un ancho variable entre 80 y 230 km. La cual se extiende sobre el margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la Trinchera Mesoamericana, con una dirección preferencial E-W en las porciones central y oriental, mientras el sector occidental es WNW-ESE, dando lugar a un ángulo cercano a los  $16^\circ$  respecto a la trinchera (Ferrari, 2000; Gómez-Tuena *et al.*, 2005; Ferrari *et al.*, 2011), mientras que otras provincias geológicas del Terciario medio y tardío presentan una orientación preferencial NNW-SSE (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992).

La FVTM ha sido dividida en tres sectores, con base en características geológicas y tectónicas (Demant, 1978; Pasquarè *et al.*, 1988, Gómez-Tuena, 2007): la porción occidental se encuentra entre la costa del Golfo de California y el punto triple de los rifts de Tepic-Zacoalco, Chapala y Colima (Allan, 1986); la porción centro está comprendida entre dicha estructura y el Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2005); y la porción oriental se localiza entre el sistema de fallas anterior y la costa del Golfo de México, en este último, se encuentra la zona de estudio.

El inicio eruptivo de la FVTM en el área de estudio se encuentra representado por un vulcanismo andesítico para el que se han reportado varias edades: la andesita Apan ( $13.4 \pm 0.6$  y  $12.4 \pm 0.4$  Ma), la cual se localiza al SW de la ciudad del mismo nombre (García-Palomo *et al.*, 2002), la andesita el Peñón ( $12.7 \pm 0.06$  Ma) (López-Hernández *et al.*, 2009), y las secuencias volcánicas del Volcán Cerro Grande (VCG), (Carrasco-Núñez *et al.*, 1997; Gómez-Tuena y Carrasco-Núñez; 2000) emplazado entre 11 y 9 Ma, dando origen a flujos de lava principalmente de composición andesítica y depósitos



piroclásticos de composición ácida. Así mismo, al oeste de la ciudad de Apan se ubica una estructura semicircular en donde aflora la Ignimbrita Matamoros en la vecindad de la ciudad de Mariano Matamoros, sobreyaciendo a la andesita el Peñón ([García-Palomo et al., 2002](#)).

Aunado a lo anterior, al noroeste del área de estudio, sobreyaciendo las secuencias Mesozoicas, en el área comprendida por las cartas Huachinango y Filomeno Mata, el SGM (2017) reporta flujos de lava de composición basáltica, andesítica y andesítico basáltica, consideradas del Pleistoceno, que corresponde con andesitas-basálticas del Neógeno de ~5 Ma reportadas por [Cantagrel y Robin \(1979\)](#). De igual forma, al noreste de la CLH se ha reportado vulcanismo fisural, representado por el flujo de lava andesítico Tezihutlán datado entre  $1.46\pm 0.31$  Ma y  $2.65\pm 0.42$  Ma ([Carrasco-Núñez et al., 2017a](#)).

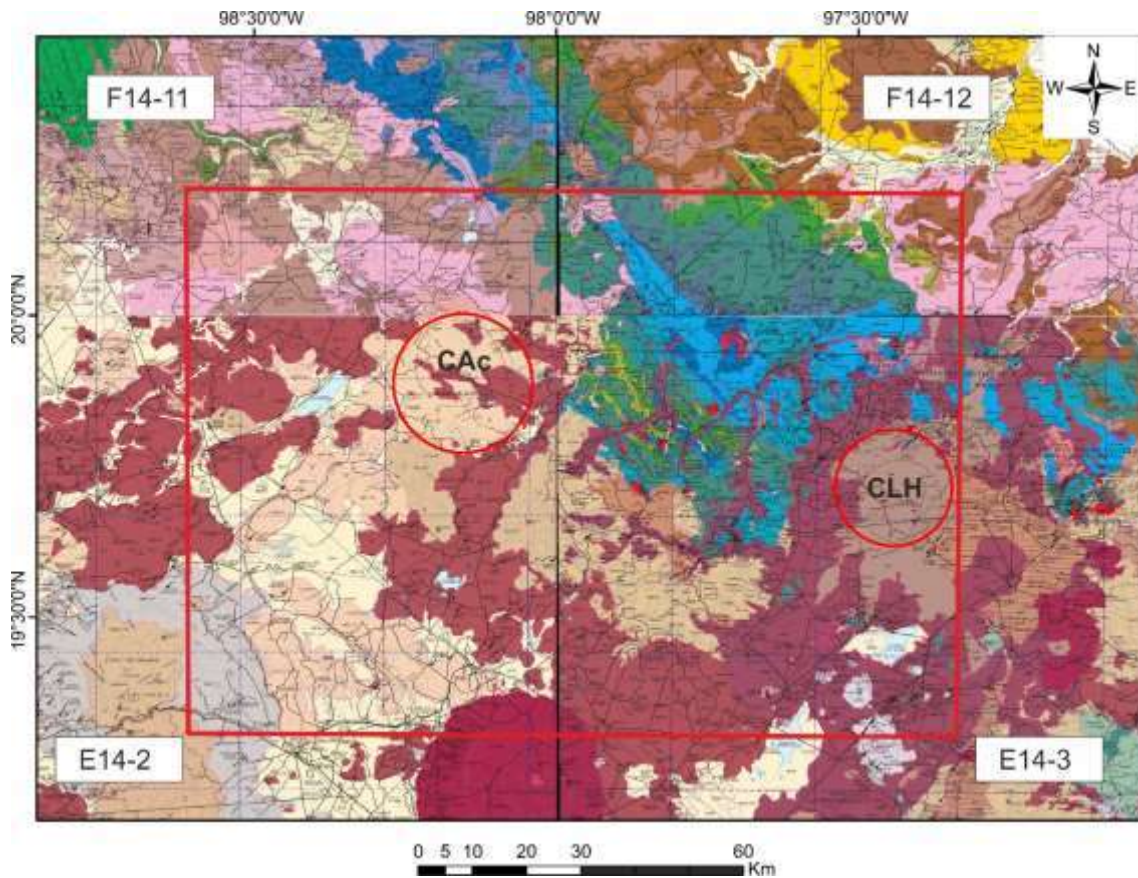
Por otra parte, el vulcanismo asociado con la evolución del Campo Volcánico Apan-Tezontepec (CVAT) se emplazó discordantemente sobre rocas volcánicas del Mioceno medio, después de un hiatus magmático de ~7 Ma, donde se reinició el magmatismo hace ~3 Ma con la formación de domos dacíticos, flujos de lava y conos de escoria de composición andesítico-basáltico ([García-Palomo et al. 2002](#), [García-Tovar et al., 2015](#)). Mientras que la CAc se formó durante el Plio-Pleistoceno (3-1.5 Ma), con el emplazamiento de magmas riolíticos y dacíticos en forma de flujos de lava, domos y flujos piroclásticos ([López-Hernández et al., 2009](#)). Para la cual [Avellán et al. \(2018\)](#) describen 29 unidades relacionadas con la evolución de la CAc en donde incluye la Ignimbrita Acoculco relacionada con la formación de la caldera, seis unidades de vulcanismo postcaldera temprana y 22 unidades postcaldera tardía, para las cuales cuentan con numerosos fechamientos.

Por otro lado, en la CLH se han identificado tres estadios explosivos principales representados por la Ignimbrita Xaltipán, la Toba Faby y la Ignimbrita Zaragoza ([Ferriz y Mahood, 1984](#), [Carrasco-Núñez et al., 2017b](#); [2017b](#); [2018](#)). La primera y más importante de esta etapa está representada por la actividad silícica que inició con el emplazamiento de la Ignimbrita Xáltipan ([Yáñez y García, 1982](#)) dando lugar a la formación de la CLH ([Ferriz y Mahood, 1984](#)), y más recientemente, por vulcanismo monogenético bimodal del Campo Volcánico Serdán-Oriental ([Carrasco-Núñez et al., 2014](#)).

Finalmente, al suroeste del área de estudio aflora la secuencia volcánica de Tlaloc, la cual está compuesta por el estratovolcán del mismo nombre y consiste en secuencias efusivas y piroclásticas formadas por flujos de lava andesíticos basales a flujos de lava



dacíticos con edades comprendidas entre 1.82 y 0.3 Ma (Cadoux et al., 2011; Macías et al., 2012) y depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos emplazados hace 0.129 Ma (Meier, 2007; Macías et al., 2012; Rueda et al., 2013).



**Figura 2.-** Mapa geológico (modificado del SGM), recuadro en color rojo indica el área de estudio; círculos rojos Caldera Acozulco y Caldera Los Humeros.

## II.2.- Contexto Estructural

Los análisis de deformación mencionan que el primer evento del cual se tiene registro corresponde a un sistema de compresión con estructuras de dirección NE-SW conocida como Orogenia Laramide del Cretácico tardío-Paleoceno, la cual dio lugar a la SMOr (Suter, 1987; Suter et al., 1997; Eguiluz et al., 2000; English y Johnston, 2004; Padilla y Sánchez, 2007; Chávez-Cabello et al., 2011; Cuéllar-Cárdenas et al., 2012; Fitz-Diaz et al., 2012; Fitz-Diaz et al., 2014). Para el cual Suter (1991) propone como producto de la reducción en el ángulo de subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Norteamericana; como resultado de esto se generó un sistema de compresión que dio lugar a que las secuencias sedimentarias sufrieran una intensa deformación formándose pliegues y cabalgaduras de orientación preferencial NW-SE, que en la región de análisis se encuentran caracterizadas por fallamiento inverso de bajo ángulo, con vergencia al noreste (Eguiluz et al., 2000; Padilla y Sánchez, 2007). Además, Tardy et al. (1975), presentaron un análisis estructural detallado de la porción entre Torreón, Coahuila y

San Luis Potosí, mientras que en la porción centro de México los límites temporales para la deformación laramídica fueron analizados por [Cuellar Cárdenas et al. \(2012\)](#).

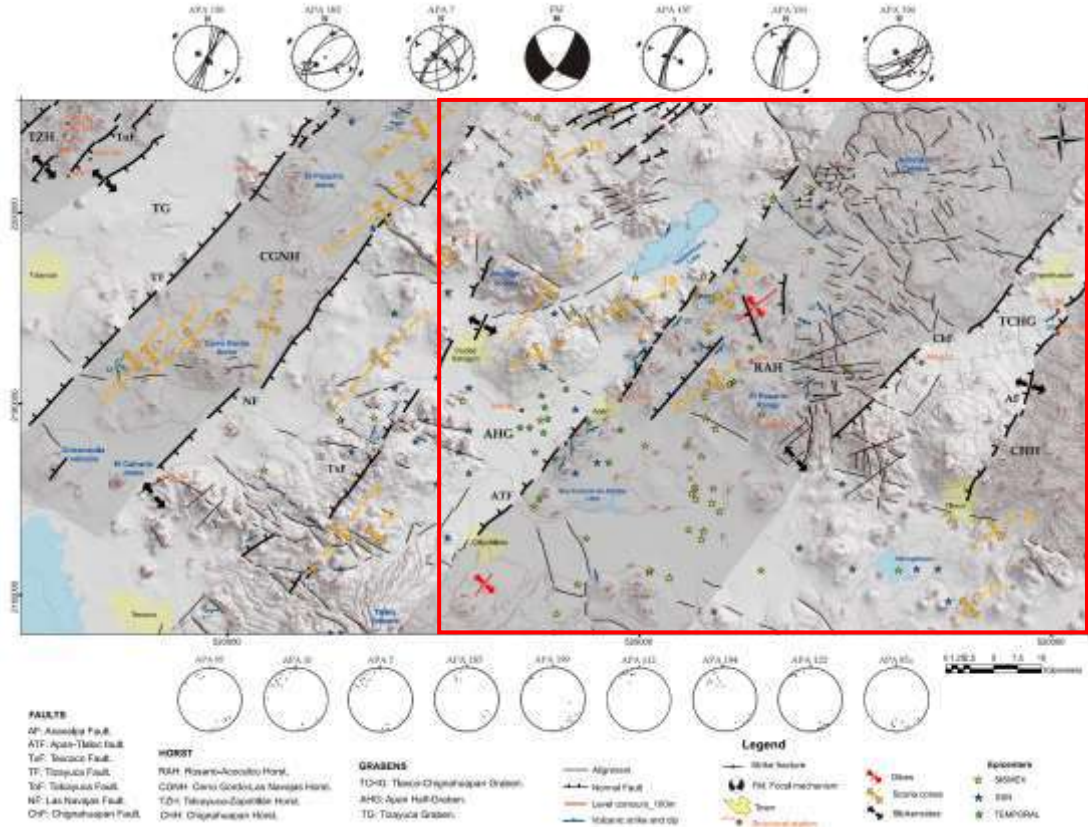
Por otra parte, la deformación frágil en el área de estudio se encuentra representada por fallas y fracturas de dirección NW-SE, las cuales cortaron las secuencias volcánicas del Volcán Cerro Grande (VCG) del Mioceno ([Gómez-Tuena y Carrasco-Núñez., 2000](#)). Mientras que, en la región de Apan [García-Palomo et al. \(2002\)](#) reportó fallas normales de orientación NW-SE, las cuales [López-Hernández et al. \(2009\)](#) denominaron como sistema de fallas Tulancingo-Tlaxco, que cortaron unidades al interior del Complejo Volcánico Tulancingo Acoculco. En esta misma región [Andreani et al. \(2008, 2008a\)](#) reportaron en la porción oriente de la zona de estudio la falla Agua Blanca de dirección NW-SE como continuación de la falla Veracruz, la cual muestra desplazamiento lateral izquierdo, de acuerdo con sus datos de campo, y afecta lavas de composición basáltica del Neógeno entre Teziutlán y Huachinango.

Posteriormente durante el Plioceno-Pleistoceno, la deformación en este sector fue acomodada por fallas normales de orientación preferencial NE-SW (Fig. 3), relacionadas con la tectónica transtensiva de la FVTM, dando lugar a estructuras tipo graben y horst ([García-Palomo et al., 2002; López-Hernández et al., 2009; García-Palomo et al., 2018](#)). En donde [García-Palomo et al. \(2002, 2018\)](#) identificaron estructuras NE-SW, describiendo su geometría y cinemática, entre las que se encuentran: la Falla Axaxalpa (FAx), el Sistema de Fallas Apan-Tlaloc, la Falla Texcoco y la Falla Tizayuca, así como estructuras tipo horst. Entre los que se encuentran el Horst Chignahuapan, definido como un bloque de 5 km de ancho y 10 km de longitud, con rangos altitudinales de 2800 a 3200 m, limitado al norte por la FAx.; mientras que el Horst Rosario Acoculco está limitado por la Falla Apan y la Falla Chignahuapan al norte y sur respectivamente. Otra de las estructuras relevantes mencionadas es el Graben Chignahuapan de dirección NE-SW, con 40 km de longitud y 15 km de ancho; así como el Semigraben Apan, limitado por los Horst Rosario Acoculco y Cerro Gordo Las Navajas.

Aunado a lo anterior en la región de Apan, la distribución de la actividad monogenética es controlada por estructuras de horsts y grabens como son: el Graben de Apan (GAp), Horst Rosario Acoculco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh) y el Horst Chignahuapan (HCh), limitados mediante fallas normales de dirección NE-SW que responden al régimen transtensivo izquierdo con un esfuerzo mínimo compresivo (Shmín) NW-SE de la FVTM; [García-Palomo et al. \(2002; 2018\)](#), sostienen además que las fallas NE son estructuras potencialmente activas. Por otra parte, al suroeste de la zona de estudio se localiza la Falla Tlaxcala de orientación ~ E-W, la cual corta la secuencia volcánica



Tlaloc con un escarpe de 200 m que de acuerdo con [Lermo-Samaniego y Vernal-Esquía \(2006\)](#) es sísmicamente activa y el Graben de Libres-Oriental, de edad probablemente Oligocénica y de tendencia NE-SW ([Garduño et al., 1985](#)).



**Figura 3.-** Mapa estructural tomado de [García-Palomo et al. \(2018\)](#), el cual comprende la porción NW del área de estudio, donde se observa el sistema de fallas Apan-Tlaloc de orientación NE-SW, el cual representa la deformación Plioceno-Pleistoceno del área de estudio.

### II.3.- Contexto Geotérmico

Los estudios geológicos de la Caldera Acoculco (CAc) fueron inicialmente desarrollados por geólogos de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE (GPGE-CFE), ([De la Cruz y Castillo-Hernández, 1986](#)), mencionando por primera vez la estructura caldérica, quienes además describieron zonas de alteración acompañadas de manantiales ácidos fríos. Posteriormente, [López-Hernández et al. \(2009\)](#) aportaron un gran número de datos vulcanológicos, geofísicos y geoquímicos para la caracterización de la evolución del yacimiento. Así mismo, se han publicado algunas descripciones petrográficas detalladas de las unidades cortadas por los pozos EAC\_1 ([Rocha-López et al., 2006](#)) y EAC\_2 ([Viggiano-Guerra et al., 2011](#)), contemplando algunas de las unidades asociadas al vulcanismo de la CAc (ignimbritas, flujos de lava dacíticos, riolíticos y andesíticos) detalladas en superficie por [Avellán et al. \(2018\)](#), en donde se contemplan flujos de lava basáltica, andesitas, flujos piroclásticos, y estructuras

volcánicas como conos de escoria y domos riolíticos, así como la presencia de depósitos lacustres al interior de la caldera.

Hasta el momento no se han identificado manifestaciones hidrotermales superficiales calientes en la CAc, aunque se reporta la emisión de gases fríos Alcaparrosa y Los Azufres en las inmediaciones de Cruz Colorada (López-Hernández et al., 2009). Por otro lado, investigaciones previas basadas en consideraciones geológicas, geofísicas, petrográficas y en geoquímica de gases, han clasificado el sistema geotérmico de la CAc como un yacimiento de tipo HDR (López-Hernández et al., 2009; Viggiano-Guerra et al., 2011; Lorenzo-Pulido et al., 2011; Peiffer et al., 2014; Canet et al., 2015) debido a la presencia de al menos dos fases de mineralización que desencadenaron la pérdida de permeabilidad y posterior auto sellamiento del sistema geotérmico por una intensa precipitación mineral (López -Hernández et al., 2009).

Durante la perforación de los pozos exploratorios en la CAc se identificó un intrusivo granítico y una zona de metamorfismo de contacto compuesta por mármol y skarn de entre 600 y 800 m de espesor, sin embargo, tanto López-Hernández et al. (2009) como Sosa-Ceballos et al. (2018) proponen que la fuente que aporta el calor al sistema geotérmico podrían ser intrusiones tardías de diques y sills relacionados a la actividad volcánica monogenética. Además, desde el punto de vista estructural, se han identificado tres sistemas prioritarios de fallas y fracturas en la CAc: NW-SE, NE-SW y las fallas y fracturas propias de la caldera (López-Hernández, 2009).

En el yacimiento geotérmico de Acoculco, CFE perforó dos pozos exploratorios: el EAC-1 en 1995 y el EAC-2 en 2008, con una profundidad promedio de 2000 y 1900 m, encontrando temperaturas de 265 y 300 °C, respectivamente, sin embargo, en ambos casos la permeabilidad estimada fue casi nula debido a que las fracturas fueron selladas por la precipitación de minerales hidrotermales (Tello-Hinojosa, 1986; De la Cruz y Castillo, 1986; Palma-Guzmán, 1987; Lorenzo-Pulido et al., 2011; Viggiano-Guerra et al., 2011).

Por otra parte, el campo geotérmico Los Humeros, los primeros estudios geológicos se realizan en 1978 por la CFE y en 1982 se perforó el primer pozo. En 1990 comienza la explotación comercial del campo geotérmico, el cual actualmente produce alrededor de 65 MW. Los Humeros es la caldera (CLH) activa más grande de la FVTM: se trata de un centro eruptivo compuesto por productos volcánicos de composición basáltico, andesítico y riolítico del Pleistoceno-Holoceno (Ferriz y Mahood, 1984, 1987; Yañez y García, 1982). Los Humeros forman parte de la llamada cuenca Serdán-Oriental, la cual se caracteriza por la presencia de vulcanismo bimodal monogenético Cuaternario,





representado por conos de ceniza y maars basálticos y riolíticos, así como domos riolíticos. La primera erupción formadora de la CLH, se produjo con la emisión de la ignimbrita Xaltipan datada en  $164.0 \pm 4.2$  ka por Carrasco-Núñez et al. (2018), posterior al colapso caldérico se presentan alternancia de actividad explosiva y efusiva, que incluye el emplazamiento de domos riolíticos (Ferriz y Mahood, 1984), seguida por una sucesión de repetidos episodios de depósitos de caída de pómez separados por paleosuelos que en conjunto son llamados toba Faby (Ferriz y Mahood 1984, Willcox, 2011). Un siguiente episodio formador de la caldera corresponde con la Caldera Los Potreros asociada con la emisión de la ignimbrita Zaragoza (Carrasco-Núñez et al., 2015, 2017a, 2017b, 2018), así como el posterior emplazamiento de lavas riodacíticas y erupciones explosivas. La caracterización del yacimiento se llevó a cabo por medio de estudios de tipo geológico (Pérez-Reynoso, 1978, Yañez-García et al., 1979, Ferriz y Mahood, 1984, Viggiano y Robles, 1988<sup>a, b</sup>; Cedillo, 1997, Arellano et al., 2000, Lorenzo-Pulido, 2008) complementados por estudios geofísicos como análisis de sismicidad (Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2004; Lermo et al., 2008), sísmica de reflexión (COMESA, 1998) y gravimetría (Campos-Enríquez, 1992), además de estudios de geoquímica de fluidos (Barragan et al., 1988), con el análisis integral de los datos de 42 pozos geotérmicos (geológicos, geoquímicos, geofísicos), en la construcción de modelos de distribución de presión inicial, indicando la presencia de dos yacimientos entre 1600-1025 y 800-100 msnm: el primero de líquido dominante y el segundo de baja saturación de líquido con temperaturas de 280° y 330° respectivamente (Arellano et al., 1998, 2000; 2001).



## CAPITULO III.- METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en cinco fases constituidas por trabajo de gabinete y de campo, mismas que estuvieron enfocadas en la identificación de estructuras producto de la deformación, así como su geometría y cinemática.

### III.1.- Recopilación bibliográfica:

La recopilación de material bibliográfico incluyó la revisión de artículos científicos, tesis e informes técnicos principalmente; esta información sirvió para comprender aspectos regionales y locales del área de estudio desde la estratigrafía volcánica y sedimentaria, los procesos de deformación que han tenido lugar en la zona, y otros más particulares como características de los sistemas geotérmicos, incluyendo la revisión de los aspectos teóricos que corresponden a la presente investigación.

La revisión y recopilación de material cartográfico incluyó mapas topográficos de INEGI, escalas 1:250,000 y 1:50,000, mapas geológicos-mineros del Servicio Geológico Mexicano (SGM) escalas 1:250,000 y 1:50,000, Modelos Digitales de Elevación (DEM) con resolución de 30 y 15 m de INEGI, imágenes satelitales de Google Earth y SAS. Planet, además de otros mapas publicados en distintas revistas, los cuales funcionaron como cartografía base, la cual permitió generar la cartografía temática propia de esta investigación.

### III.2.- Integración de datos geológico-estructurales

Para la definición de la geología, se compilaron los mapas geológicos publicados por el SGM escala 1:250,000, que incluye las cartas geológicas con clave: 88\_F14-11, 89\_E14-2, 96\_F14-12 y 97\_E14-3, además de las cartas escala 1:50,000, Huachinango (F14-D83), Chignahuapan (E14-B13), Filomeno Mata (F14-D84), Zacatlán (E14-B14), Mexcaltepec (E14-B24), Teziutlán (E14-B15) y Xonacatlán (E14-B35). A esto se suma la cartografía producto de distintas investigaciones, como el mapa geológico de la caldera Acoculco publicado por [Avellán et al. \(2018\)](#); para Los Humeros el mapa de [Carrasco-Núñez et al. \(2018\)](#); vulcanismo Mioceno al interior y exterior del Horts Chignahuapan ([Gómez-Tuena et al., 2000](#); [García-Palomo et al., 2002](#); [2017](#); [Gómez-Alvarez 2019](#)) y el Campo Volcánico Apan-Tezontepec ([García-Palomo et al., 2002](#); [García-Tovar et al., 2015](#)).

En esta fase de la investigación se incluyó la digitalización de la cartografía geológica de la zona de estudio a partir de la revisión de mapas y datos geológicos publicados, además del trabajo de campo realizado en este proyecto e interpretación morfológica de las unidades. Aunado a ello se construyó una columna estratigráfica.



### III.3.- Metodología análisis morfoestructural

Para la generación de los modelos y el cálculo de los índices morfométricos (Tabla 1) fueron empleados los insumos cartográficos obtenidos en la etapa 3.1 (DEM, imágenes de Google Earth y SAS. Planet, y la red hidrológica del SIATL-INEGI), los cuales fueron procesados empleando los programas Arc-Gis V.10.5 y Global Mapper v. 9, produciendo distintas capas temáticas. A partir del DEM se generaron modelos de sombras con diferente ángulo de incidencia de la luz solar (Fig. 4), con el fin de resaltar distintos elementos del relieve. De igual forma se generó un mapa de pendientes con el establecimiento de 5 rangos, con una clasificación desde 0 a 10°, de 10 a 20° medianamente inclinado, de 20 a 30° fuertemente inclinado, de 30° a 45° muy fuertemente inclinado, y >45° abrupto, de la escala simplificada expuesta por [Bocco et al. \(2005\)](#), el cual nos permite definir y resaltar geoformas, como zonas de falla, fracturas, aparatos volcánicos, contactos litológicos, entre otros.

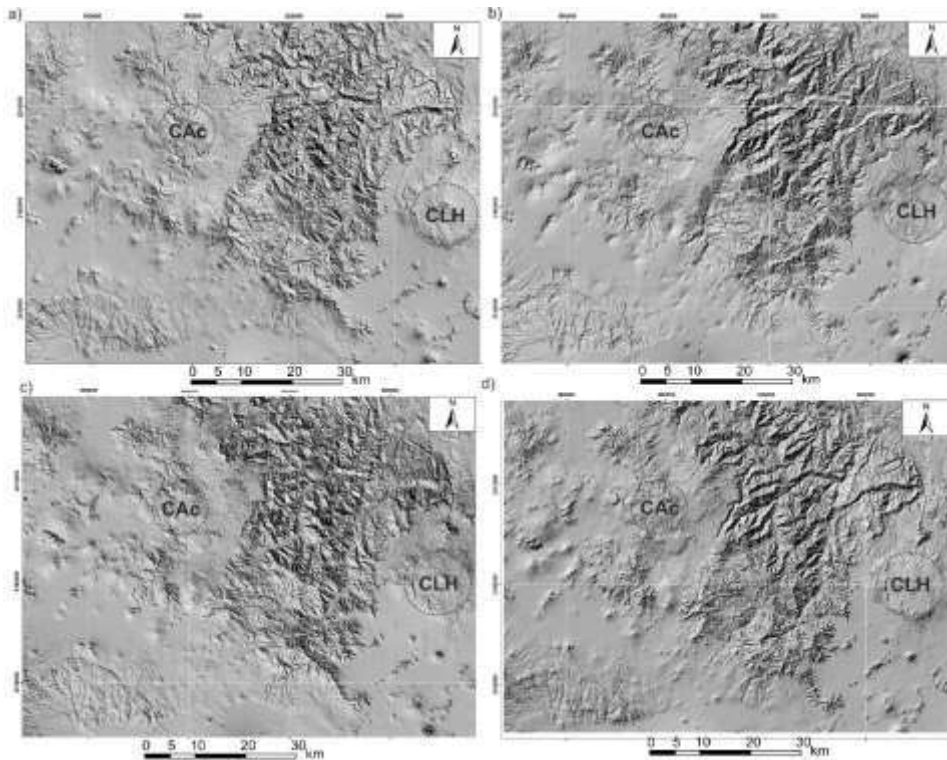
Para el índice de disección vertical: el cual tradicionalmente y de forma manual se obtiene mediante la confección de una malla que a la escala de trabajo represente 1 km<sup>2</sup>, y sobrepuesta a la carta topográfica se contabiliza la diferencia de altura para cada cuadrícula, esta diferencia es la disección vertical ([Priego-Santander et al., 2010](#)), se generó con el software Arc-Gis V. 10.5. Mientras que el análisis de las características geométricas de las cuencas en el área de estudio se ha empleado la metodología expuesta en [Jardi \(1985\)](#), contemplando variables de medición directa, como área de la cuenca (A), perímetro de la cuenca de drenaje (P), y longitud del cauce principal (L), información calculada a partir de los datos descargados de INEGI (Tablas 2 y 4), con los cuales se calcularon las variables indirectas, como Razón de elongación (Re) e Índice de Forma (C), con las fórmulas expuestas en la tabla 1.

Índice Geomorfológico	Método de cálculo	Características
Modelo de pendientes		
Índice de disección vertical o profundidad de disección.	$Dv = H - h$	Indicador del trabajo erosivo realizado por el escurrimiento concentrado de las aguas superficiales.
Índice de forma de la cuenca	$C = \frac{P}{2(\pi * A)^{\frac{1}{2}}}$	
Razón de elongación de la cuenca	$Re = \frac{D}{L}$	

**Tabla 1.-** Índices geomorfológicos empleados en este estudio, método de cálculo y características más relevantes.



Por otra parte, las redes de drenaje fueron analizadas a nivel subcuenca, empleando la regla de [Strahler \(1952\)](#) para la clasificación de la red hídrica (escala 1:50,000), la información general de las subcuencas analizadas se encuentra en la tabla 2, que contiene información como la región hidrográfica, nombre de la cuenca, así como el nombre de la subcuenca. Al conocer estos valores, se realizó una clasificación de color con los órdenes de valor superior (>3), con los cuales se han observado orientaciones preferenciales de los cauces, así como sus relaciones con otros parámetros.



**Figura 4.-** Modelos de sombras con distinto ángulo de incidencia de luz a) 45°, b) 135°, c) 225 y d) 315°, con el cambio en este parámetro los patrones lineales que resaltan en cada una de las figuras, muestran importantes variaciones, en a y c las estructuras NW muestran un mayor realce, mientras que en b y d) el realce superior es para las estructuras NE; la Caldera de Acozulco (CAc) y la Caldera de Los Humeros (CLH) (circunferencias en color rojo).

Las capas temáticas generadas a partir de los índices geomorfométricos fueron empleadas para la identificación de lineamientos estructurales, principalmente relacionados con estructuras de deformación frágil, estas distintas combinaciones de capas se sobrepusieron en el software Arc-Gis, con la finalidad de identificar las estructuras. Para cada uno de los lineamientos se realizó el cálculo de su dirección con la herramienta Cogo, los cuales fueron empleados posteriormente en la construcción de un diagrama de rosa con el programa Dips.

ID	Región hidrográfica	Cuenca	Subcuenca
RH27Be	TUXPAN-NAUTLA	R. TECOLUTLA	R. Apulco
RH27Bd	TUXPAN-NAUTLA	R. TECOLUTLA	R. Tecuantepec
RH27Bc	TUXPAN-NAUTLA	R. TECOLUTLA	R. Laxaxalpan
RH27Bb	TUXPAN-NAUTLA	R. TECOLUTLA	R. Necaxa
RH27Bf	TUXPAN-NAUTLA	R. TECOLUTLA	R. Jobapan
RH26Du	PANUCO	R. MOCTEZUMA	L. Tochac y Tecocomulco
RH18Ai	BALSAS	R. ATOYAC	R. Zahuapan
RH18Ah	BALSAS	R. ATOYAC	L. Totolzingo
RH18Ad	BALSAS	R. ATOYAC	R. Atoyac-San Martin Texmelucan
RH27Ba	TUXPAN-NAUTLA	R. TECOLUTLA	R. Tecolutla
RH27Cb	TUXPAN-NAUTLA	R. CAZONES	R. San Marcos
RH26Dv	PANUCO	R. MOCTEZUMA	R. Metztitlan
RH26Dt	PANUCO	R. MOCTEZUMA	R. Tezontepec
RH27Ai	BALSAS	R. ATOYAC	R. Bobos

**Tabla 2.-** Información general de subcuencas hidrológicas en el área de estudio.

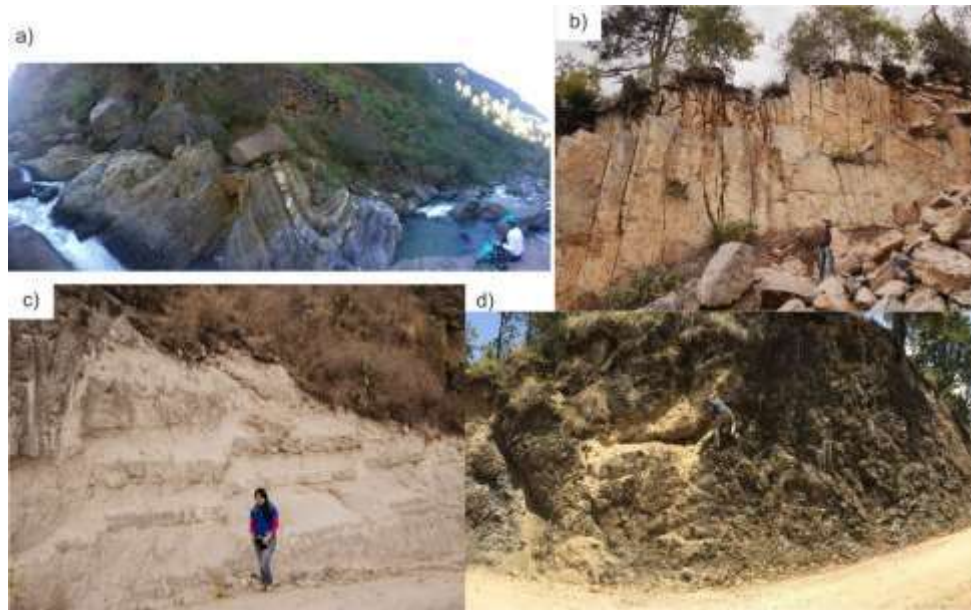
### III.4.- Análisis micro y mesoestructural

Con el término de análisis micro y mesoestructural nos referimos al análisis de campo escala afloramiento. El trabajo de campo contempló el levantamiento de 153 estaciones estructurales integradas por 1504 datos de falla, datos de fracturas para el análisis y relación con plegamiento, considerando las características del fracturamiento (dirección/inclinación), ejes de pliegue (dirección/inmersión), 232 datos de estratificación ( $S_0$ ), entre otros, además, de datos recopilados durante las tres campañas de campo referidos a buzamientos de unidades y otros elementos que nos proporcionan información relacionada con la evolución de la deformación, donde en términos generales se aplicó la siguiente metodología: a) orientación espacial del afloramiento; b) descripción litológica, medición de los elementos como geometría y la orientación de los estratos (buzamiento y dirección del buzamiento); c) identificación de estructuras de génesis tectónica, clasificación y medición de su orientación.

Las estaciones estructurales ubicadas a través de recorridos por carreteras federales y estatales se encuentran distribuidas en gran parte del área de estudio, además de caminos de terracería que comunican a las distintas comunidades y algunos recorridos sobre el cauce de ríos; donde se buscaron cortes naturales o artificiales en los cuales se observaron las estructuras de deformación, en la figura 5 se observan algunas estaciones estructurales características del área de estudio: 5a) y 5b) corresponden a estaciones sobre las secuencias sedimentarias mesozoicas al interior del HCh, mientras que la figura 5c) corresponde a fallas normales de dirección NW-SE en la porción suroeste del HCh y 5d) a estructuras dentro de la CAc. La mayor parte de las estaciones



contienen información de planos de falla con estrías, concentrándose en la traza de las fallas de mayor longitud por su carácter regional.



**Figura 5.-** Estaciones de campo características del área de estudio, a) contacto de rocas mesozoicas y vulcanismo Mioceno sobre Río Axaxalpa, b) planos de estratificación de secuencia carbonatada, c) fallas normales NW-SE en secuencia vulcanosedimentaria del Mioceno y d) fallas al interior de la caldera Acoculco.

La caracterización de la deformación de las unidades sedimentarias presenta un número limitado de estaciones: al interior del Horst Chignahuapan (HCh), en donde se caracterizó el fracturamiento en 6 estaciones estructurales, separando los datos relacionados con el plegamiento de las fracturas producto de deformación posterior. Aunado a ello se cuenta con datos referidos a fracturamiento en conos cineríticos del Campo Volcánico Apan-Tezontepec (CVAT) y estructuras dentro de la CAc, las cuales presentan características particulares y con lo cual se determinó la relevancia de las estructuras locales comparadas con estructuras regionales.

### III.5.- Procesamiento de datos de campo

Los datos compilados en campo se emplearon en la construcción de una base de dato que incluya en su totalidad los elementos anteriormente mencionados (Tabla 3). Estos fueron tratados para cada una de las estaciones estructurales y posteriormente utilizados en el procesado con los softwares Dips, Spheristat y Win-Tensor.

- a) La evaluación de la orientación de los elementos estructurales se llevó a cabo en el programa Dips, el cual nos permitió observar dichos elementos de forma gráfica y evaluar su importancia. Para el cálculo preferencial de sistemas de fallas y

fracturamiento se generaron distintos diagramas rosas con el software Dips v. 5.0, los datos ingresados son dirección de plano e inclinación.

- b) El programa Spheristat fue empleado en el análisis y caracterización de las fracturas en unidades sedimentarias con la finalidad de rotar el fracturamiento y realizar una comparación con los modelos de desarrollo de fracturas asociado a pliegues propuestos por [Hancock y Nelson \(1985\)](#), debido a que nos permite realizar la rotación de planos, lo cual es importante en la clasificación de las fracturas producto de la deformación plicativa. Los datos ingresados son Dirección del plano e inclinación.
- c) Los datos referidos a planos de falla se analizaron mediante el método de diedros rectos con el software Win-Tensor versión 5.8.8 (de uso libre) creado por Werner Kaminsky (University of Washington), el cual permite realizar la separación de las estructuras en distintos subconjuntos con la finalidad de aproximarse con mayor precisión a los valores de paleoesfuerzos, sin embargo, en este trabajo se optó por realizar la separación previa de los datos, debido a que desde la etapa de campo se graficaron estereogramas en el mismo cuaderno para observar orientaciones preferenciales de los sistemas de fallas, por lo que al momento de ingresar los datos en el software se obtienen valores que no representan una error mayor en el tensor de esfuerzos calculado contemplando la información del manual de uso del creador del programa disponible en <http://damiendelvaux.be/Tensor/UserGuides/user-guides.html>.

ACF_60	X	Y	Z				
	610317	2188531	2245				
Descripción: Banco de material, a 300m de Aquixtla donde aflora lava andesítica de estructura masiva y moderadamente fracturada, la cual es cortada por falla normal NW-SE, falla secundaria NE y fracturas sistematicas.							
Datos estructurales					fracturas Ox.	170	75
L2	150	85	60 FLI			110	65
L2	143	66	63 FLI			150	74
L2	135	66	62 FLI			310	88
L2	136	64	72 FLI			308	84
L2	135	68	72 FLI				
L1	145	66	85 FNI				
L1	142	69	83 FNI				
L1	145	65	84 FNI				
L1	150	67	86 FNI				
L1	148	66	90 FN				
	260	86	150 FND				
	266	88	152 FND				

**Tabla 3.-** Ejemplo de estación estructural en base de datos empleados, posteriormente para su análisis con los softwares Dips, *Spheristat* y/o Win-Tensor.



Los datos de entrada incluyen dirección de plano, ángulo de buzamiento y pitch. Estos al generarse el procesamiento incluyen distintas opciones de visualización como es un estereograma, diagrama de rosa entre otros, y el método de diedros rectos, el cual permite la visualización gráfica de los tensores de esfuerzo, en la figura 6 se presenta la ventana principal del programa win-tensor. Además de estos, se empleó el método de líneas tangentes (Fossen, 2010), en la evaluación comparativa del campo de esfuerzos con dos tendencias ortogonales de fallas.

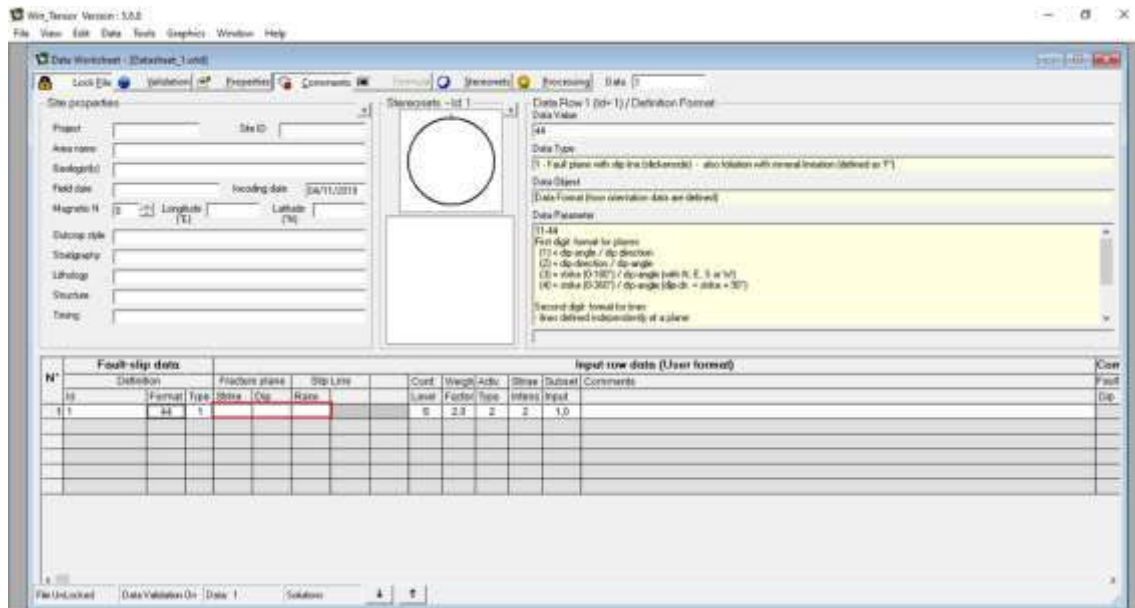


Figura 6.- Ventana principal del programa Win-Tensor, donde se introducen los datos de análisis.

## CAPITULO IV.- MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

Dentro del análisis estructural existen numerosos términos y principios a considerar relacionados directamente con la deformación. El marco teórico-conceptual se enfocó en las características de las estructuras producto de la interacción de esfuerzos tectónicos con distintas unidades litológicas por lo cual los conceptos fundamentales de fuerza, esfuerzo y deformación al tratarse de definiciones y conceptos generales de geología estructural no serán abordados, dado que existen innumerables fuentes de consulta que los abordan (por ejemplo: Fosse, H., 2010; Tarbuck y Lutgens, 2005; Lillo y Oyarzun, 2013, Martínez-Catalán, 2002).

Por otro lado, y dado que dentro del área de estudio se encontraron tanto fallas y pliegues, hemos considerado, la dinámica de estas y la distribución de esfuerzos que han dado lugar a las estructuras, así como sistemas de fracturas relacionadas. Dado que las fracturas son las estructuras más frecuentes en la superficie de la Corteza terrestre, observables en cualquier afloramiento y en cualquier tipo de roca. El estudio de estas es de particular importancia porque afecta la resistencia de las rocas a los





esfuerzos. Estudios realizados en el siglo pasado han demostrado que las fracturas se desarrollan en materiales donde existen pequeñas imperfecciones (fisuras), lo cual ayuda a que se formen dichas estructuras bajo condiciones de tensión externa. La teoría se basa en la propuesta de Griffith (Bahat et al., 2005), la cual explica el proceso del fracturamiento, señalando la importancia de conocer y entender cómo se forman las fracturas para analizar su distribución y geometría en los macizos rocosos.

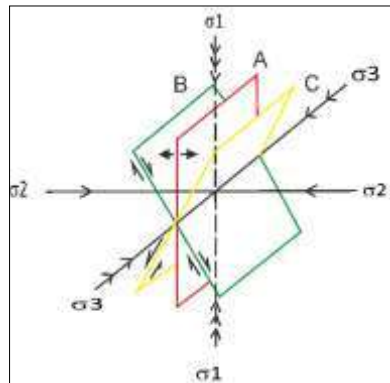
Mecánicamente la fractura se puede definir como el resultado de un proceso de deformación la cual se manifiesta mediante la separación o fragmentación de un cuerpo sólido que este sujeto a un determinado estado de esfuerzos (Bahat et al., 2005). Cuando la roca presenta un cambio de volumen antes de que se rompa tendrá una fractura dúctil o al contrario, las fracturas aparecen sin alguna deformación en la roca, generando una fractura frágil. Existen numerosas clasificaciones para las fracturas, pero en este análisis haremos uso de las expuestas en Nelson (1985; 2001), la cual se ha sustentado a partir de numerosos experimentos de laboratorio, en la cual se contempla una clasificación genérica, así como una clasificación geológica:

**Clasificación genérica de fracturas;** contempla la generación de tres tipos de fracturas (cizalla, extensión y tensión), las cuales fueron observadas de forma consistente durante análisis de laboratorio, donde los ángulos son predictibles en relación a las principales direcciones de esfuerzos, durante pruebas de compresión, extensión y tensión.

- Fracturas de cizalla: se caracterizan por presentar un sentido de desplazamiento paralelo al plano de fractura, las cuales dan lugar a un ángulo agudo respecto a la máxima dirección del esfuerzo compresivo principal ( $\sigma_1$ ) y un ángulo obtuso con respecto a la dirección mínima de esfuerzo compresivo ( $\sigma_3$ ) dentro de la muestra de roca.
- Fracturas de tensión: fracturas en las cuales las dos paredes de la roca agrietada se muevan a cierta distancia una de otra en sentidos opuestos, alejándose del plano de fractura. El plano (A) de la figura 7, representa el tipo de fractura de extensión, las cuales se desarrollan cuando los tres esfuerzos principales son de extensión.
- Fracturas de extensión: son similares a las fracturas de tensión por que en ambos casos las paredes se separan perpendicularmente, a una cierta distancia del plano de fracturamiento. Se debe tomar en cuenta que las fracturas de extensión se forman debido a una componente mínima de esfuerzo principal (compresivo positivo), que es opuesto a la generación de las fracturas de tensión



que se forman por una componente mínima de esfuerzo tensional negativo. Para cualquier estado de esfuerzo triaxial, puede haber dos orientaciones de fractura de cizalla y una orientación de fractura de extensión. El ángulo del esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) biseca el ángulo agudo entre la fractura de cizalla. La fractura de extensión es normal (perpendicular) a  $\sigma_3$  y la línea de intersección de las fracturas es paralela a  $\sigma_2$  (Fig. 7).

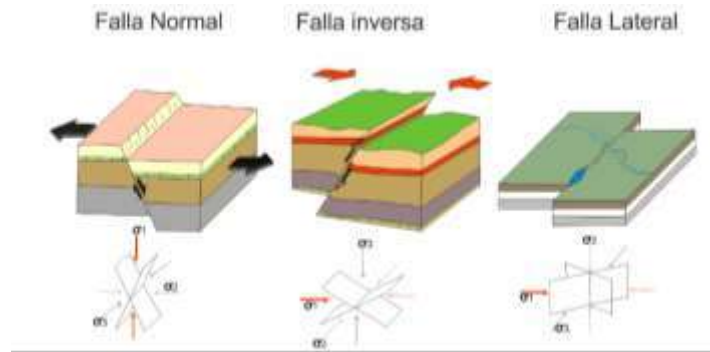


**Figura 7.-** Planos potenciales de fracturamiento desarrollados en pruebas de compresión en laboratorio. (A) Fracturas de extensión (B y C) Fracturas de cizalla (Modificado de Nelson, 2001).

Aunado a lo anterior, se incluyeron las definiciones de las estructuras principales de deformación como los son falla y pliegue.

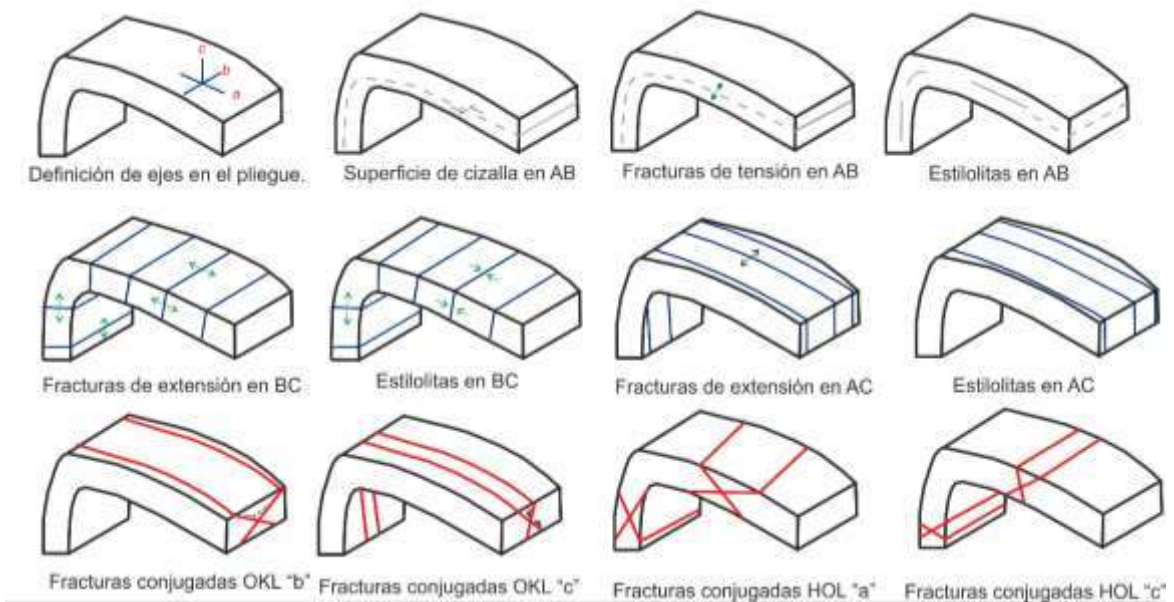
La definición de falla depende del geólogo y el contexto, una definición simple y tradicional establece que se trata de cualquier superficie o zona estrecha con desplazamiento visible de corte a lo largo de la zona. La clasificación de Anderson, que incluye la dinámica de las fallas, se encuentra basada en el posicionamiento de los tres vectores principales de esfuerzo: mayor ( $\sigma_1$ ), medio ( $\sigma_2$ ), y mínimo ( $\sigma_3$ ), ortogonales entre sí, que cumplen el requisito general ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). Dependiendo de las posiciones de los vectores se definen tres tipos de fallas principales tales como: Normales, inversas y transcurrentes (Fig. 8).

Al igual que con las fallas existen numerosas definiciones para los pliegues, en este documento se hará uso de la expuesta por Hasen (1971), quien señala que un pliegue es una distorsión de un volumen de materia, el cual se expresa como un encorvamiento o conjunto de encorvamientos en elementos lineales o planos en el interior de un material. Algunos de las referencias empleadas para descripción y clasificación de pliegues son las que se encuentran en Morgan (1987), el capítulo 7 de Davis y Reynolds (1996) y los capítulos 11 y 12 de Twiss y Moores (1973), en los cuales no se hará énfasis.



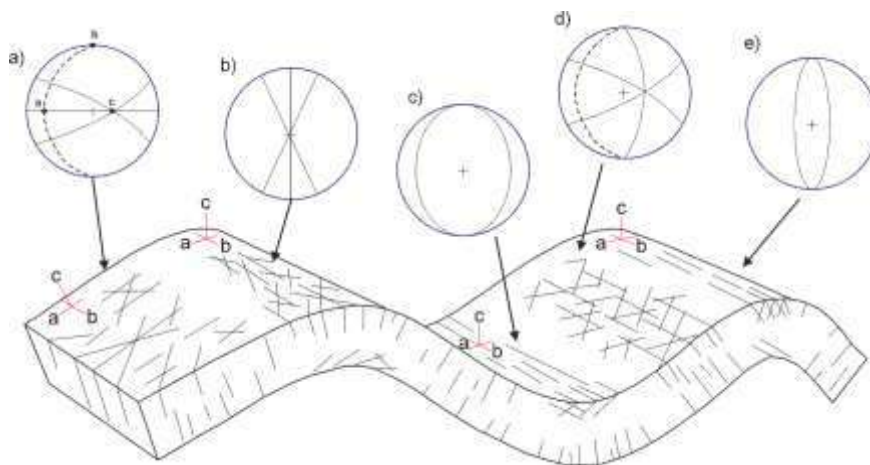
**Figura 8.-** Régimen de esfuerzos relacionados con la clasificación hecha por Anderson y características principales, modificada de: [Cervený et al. \(2004\)](#).

Por otra parte, debido a que la historia de la deformación se refleja en los diversos patrones de fracturamiento creados durante el inicio y desarrollo del plegamiento en la roca, siendo frecuentemente muy complejo. La descripción geométrica del fracturamiento al interior de pliegues ha sido abordado por diversos autores, siendo una de las más comúnmente usadas la creada por [Stearns, 1968](#). Para la correcta interpretación de las relaciones temporales entre el fracturamiento se puede utilizar el modelo de plegamiento de [Price y Cosgrove \(1992\)](#), mejorado por [Peterson-Rodríguez \(2001\)](#). Para la nomenclatura puede ser utilizada la clasificación de las fracturas de [Hancock \(1985\)](#) y [Stearns \(1996\)](#); ambas se fundamentan en el establecimiento primero del rumbo y echado de la capa plegada que contiene a las fracturas, y a partir de lo anterior pueden definirse tres ejes a, b y c, los cuales son la base de la clasificación tanto de las fracturas de tensión como las de cizalla.



**Figura 9.-** clasificación de sistemas de fracturas generados por plegamiento, Modificado de [Hancock \(1985\)](#).

Cuando se tienen rocas involucradas en plegamientos, es conveniente la referencia con orientación dentro de un sistema de coordenadas ortogonal (a, b, c) relacionada a la geometría del pliegue y la estratificación. El eje “a” es paralelo al echado en la estratificación, el eje “b” es paralelo al rumbo de la capa y al eje del pliegue y el eje “c” es en todas partes perpendicular a la capa. El plano de fractura que contiene al eje a y c es llamada fractura ac; la fractura con un plano paralelo al eje b y c es llamada fractura bc y la fractura que contiene al eje a y b es llamada ab (paralela a la estratificación). Estos tipos de fracturas son catalogadas como fracturas de tensión (Fig. 9 y 10). Por otro lado, las fracturas de cizalla se forman siempre en planos conjugados con un ángulo de 60° entre sí. Estas se representan mediante una nomenclatura utilizando las consonantes H, K, L que en un sistema de coordenadas ortogonal serian a, b y c respectivamente. Se asigna un 0 al eje paralelo a la línea definida por la intersección de los planos de fractura y posteriormente, se indica el eje contenido en el ángulo agudo (zona de máximo esfuerzo de compresión ( $\sigma_1$ )) que definen el par conjugado de fracturas (Fig. 9 y 10). En las fracturas de cizalla se generan 6 diferentes tipos de fracturas: hk0 con ángulo agudo al eje a, hk0 con ángulo agudo al eje b, h0l con ángulo agudo al eje a, h0l con ángulo agudo al eje c, 0kl con ángulo agudo al eje b y 0kl con ángulo agudo al eje c.



**Figura 10.-** Esquema que muestra fracturas asociadas a un pliegue. Se muestra también la posición de las fracturas en una proyección estereográfica. modificado de: [Twiss y Moores \(1992\)](#).

#### Fallas activas y migración de fluidos

Pocas fracturas y fallas en las masas de roca fracturada sirven como conductos primarios para la migración de fluidos ([Long et al., 1991](#)) por lo cual es necesario considerar las definiciones y términos de una “fisuración activa”. La definición de [Siemmos y McKinney \(1977\)](#) de falla activa, dice que es aquella que ha tenido movimientos durante el régimen sismotectónico actual, por lo que es probable que

pueda activarse en el futuro, además estas presentan evidencias de movimientos holocénicos, las cuales pueden ser históricas, geológicas, geodésicas o geofísicas (sismológicas).

Por otra parte la permeabilidad primaria de la masa rocosa y, por lo tanto, el flujo de fluido en una secuencia de rocas, se encuentra controlada por la cantidad de espacio disponible en los poros. Las fracturas desarrolladas como resultado de tensiones impuestas aumentan la permeabilidad de una masa de roca y las velocidades del flujo de fluido por órdenes de magnitud (Bolton et al., 1999). Se pueden distinguir niveles de permeabilidad dentro de la arquitectura de una zona de falla (Caine et al., 1996), con las propiedades hidrológicas de las redes de fractura de alta densidad en la zona de daño de una falla que actúa como control dominante en la permeabilidad de las rocas. En un medio arbitrariamente fracturado, la población de fractura se compone a menudo de fracturas en varias orientaciones. Los subconjuntos de esta población podrían ser fracturas extensibles, orientadas perpendicularmente a la tensión menos principal (por ejemplo, Pollard y Aydin, 1988); Fracturas por cizalladura, fallas potencialmente activas en el campo de tensión actual; o ninguno, fallas y fracturas cuyas orientaciones carezcan de relación aparente con el campo de tensión actual.

De acuerdo con las investigaciones de Faulds (2005; 2010; 2012; 2015) al interior de campos geotérmicos existen distintos escenarios estructurales para la circulación de fluidos, dado que distintos campos geotérmicos se encuentran asociados a diversas configuraciones estructurales. En la Figura 11 se muestran algunos de los arreglos más comunes en distintos campos geotérmicos, catalogados en ocho grupos principales, basados en el patrón dominante de fallas. Estos ajustes forman un patrón jerárquico con respecto a la complejidad de la falla. Donde los dos primeros son los arreglos más simples:

1) Segmentos de falla normales principales; 2) curvas de falla, donde se implica un cambio en la geometría de fallas, dando lugar a zonas de dilatación que conducen la afluencia de fluidos y la ruptura de la roca durante el movimiento de la falla (Sibson, 1987; McCaig, 1989). El cambio de orientación y cinemática controlan el carácter dilatorio de las fallas (Branquet et al., 1999; Jolley et al., 1999); 3) terminaciones o puntas de falla, para los cuales existen buenos argumentos desde la perspectiva de la mecánica de la fractura, que hay regiones cercanas a puntas de falla donde dominan tensiones extensas y por lo tanto se puede esperar que muestren permeabilidades mejoradas (Backers y Moeck, 2015); 4) rampas de relevo en fallas normales: en las cuales múltiples fallas menores proporcionan un enlace entre dos estructuras mayores y sirven para



incrementar la densidad de fracturas, así proporcionan el camino para el ascenso de fluidos geotérmicos (Faulds et al., 2006, 2010, 2015); 5) Las intersecciones de fallas: las cuales son comúnmente zonas de fractura mejorada, pero la naturaleza de la intersección también puede ser influenciada por las características cinemáticas de fallas individuales que se desarrollan sincrónicamente y que se cruzan mutuamente (Tripp & Vearncombe, (2004). Por lo que, si una generación anterior de fallas es cruzada por una generación posterior, la intersección puede producir un cuerpo lineal de roca más fracturada o un simple desplazamiento. En el caso de la sincronización, las fallas pueden estar relacionadas a través de una simple relación de corte transversal, o tener una relación de falla maestra y oculta; 6) zonas de alojamiento o terminaciones de fallas solapadas: muestran una complejidad adicional a los casos anteriormente descritos, especialmente donde la rampa de relevo es solapada por varias fallas superpuestas y por tanto contiene múltiples intersecciones de falla (Faulds et al., 2010); 7) zonas de transferencia de desplazamiento en las que las fallas de deslizamiento terminan en matrices de fallas normales; 8) tramos transtensionales o cuencas pull-apart; por último, los vetas metalíferas son a menudo una vía privilegiada para la surgencia de aguas termales. En este sentido hay que resaltar que las vetas se corresponden normalmente con las grandes fracturas del basamento que continúan activas y juegan un doble papel: por un lado hidráulico, favoreciendo la ascensión de las aguas profundas hacia la superficie, y por otro lado químico, favoreciendo el enriquecimiento en sales debido a la disolución de sus sustancias minerales.

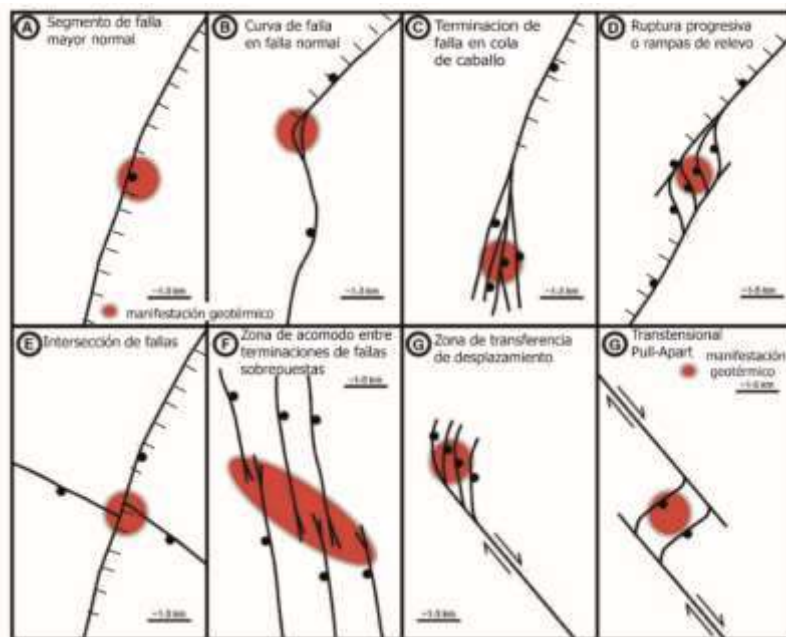


Figura 11.- Configuración estructural característica de los sistemas geotérmicos en la región de la Gran Cuenca. A. Falla normal mayor. B. Curvas en falla normal mayor. C. Punta de falla o terminación con falla.

D. Falla de paso o rampa de relevo. E. Intersección de fallas. F. Zona de alojamiento. G. Zona de transferencia de desplazamiento, G. Traslación transversal en la zona de falla principal (modificado de [Faulds y Hinz, 2015](#)).

### Campo de esfuerzos y circulación de fluidos hidrotermales

La productividad de los sistemas geotérmicos se encuentra frecuentemente controlada por las redes de fallas y fracturas, las cuales pueden tener un efecto positivo en el flujo de fluidos y transporte de calor. Las zonas de falla y fractura sirven como conductos o como barreras para el flujo de fluidos ([Backers y Moeck, 2015](#)), lo cual se encuentra relacionado con el campo de esfuerzos.

Por lo que los cambios producidos en los regímenes de esfuerzos regionales (de superficie) y locales (hidrostáticos y litostáticos) a través del tiempo geológico, pueden generar dos estados: activación o sellamiento de una falla ([Wiprut y Zoback, 2001](#)). El primero ocurre en cuanto se abren trayectorias que no existían previamente, actuando la falla como una ruta de migración de fluidos. Luego es posible que estos eventos se reviertan debido a la mineralización por precipitación de minerales haciendo que la falla se selle. Debido a que no todas las fallas y fracturas contribuyen a la migración de fluidos. La orientación y distribución de dichas estructuras con respecto al campo de esfuerzo imperante son factores cruciales sobre la migración de fluidos a través de ellas y gobiernan la conductividad hidráulica de las mismas. Los esfuerzos normales ( $\sigma_n$ ) a las fallas y fracturas tienden a reducir su apertura, y por consiguiente a inhibir el flujo de fluidos; mientras que los esfuerzos tangenciales ( $\sigma_T$ ) a las mismas tienden a mantenerlas abiertas y a favorecer dicha migración. El cizallamiento, promovido por un esfuerzo diferencial ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) alto, alta presión de fluidos, o un bajo valor de esfuerzo normal a la estructura, focaliza la migración de fluidos ([Barton et al., 1995](#)) ya que él mismo constituye el mejor mecanismo para producir dilatación en la falla ([Aydin; 2000](#)). Las fallas o fracturas críticamente activas bajo un campo de esfuerzo determinado son aquellas orientadas óptimamente de manera tal que la relación de esfuerzo de cizalla a esfuerzo normal ( $\sigma_T / \sigma_n$ ) se encuentre próxima al valor crítico (gobernado por el coeficiente de fricción del plano de falla) por encima del cual se produce la ruptura ([Byerlee, 1978; Jaeger y Cook, 1979](#)). Por esta razón, las fallas activas durante el campo de esfuerzo imperante pueden tener un importante efecto sobre la migración de fluidos ([Barton et al., 1995](#)).



## CAPITULO V.- RESULTADOS

### V.1.- Análisis Morfoestructural

La geomorfología estructural trata los fundamentos litológicos y tectónicos que definen el relieve de la superficie terrestre, las morfoestructuras y las geoformas, sus contactos y las relaciones de la hidrografía con el relieve a diferentes escalas. Además, analiza la lucha constante entre los procesos tectónicos que tienden a generar topografía y los procesos superficiales que denudan y rejuvenecen paulatinamente el relieve creado (Burbank y Anderson; 2001), lo cual es de gran utilidad al analizar grandes extensiones en estudios regionales. En este análisis se generaron cuatro mapas temáticos: hipsométrico, pendientes, disección vertical y análisis de las redes de drenaje (geometría de cuencas), a partir de los cuales se caracterizaron y se creó un modelo de morfolineamientos detallado para este sector.

#### *Modelo hipsométrico*

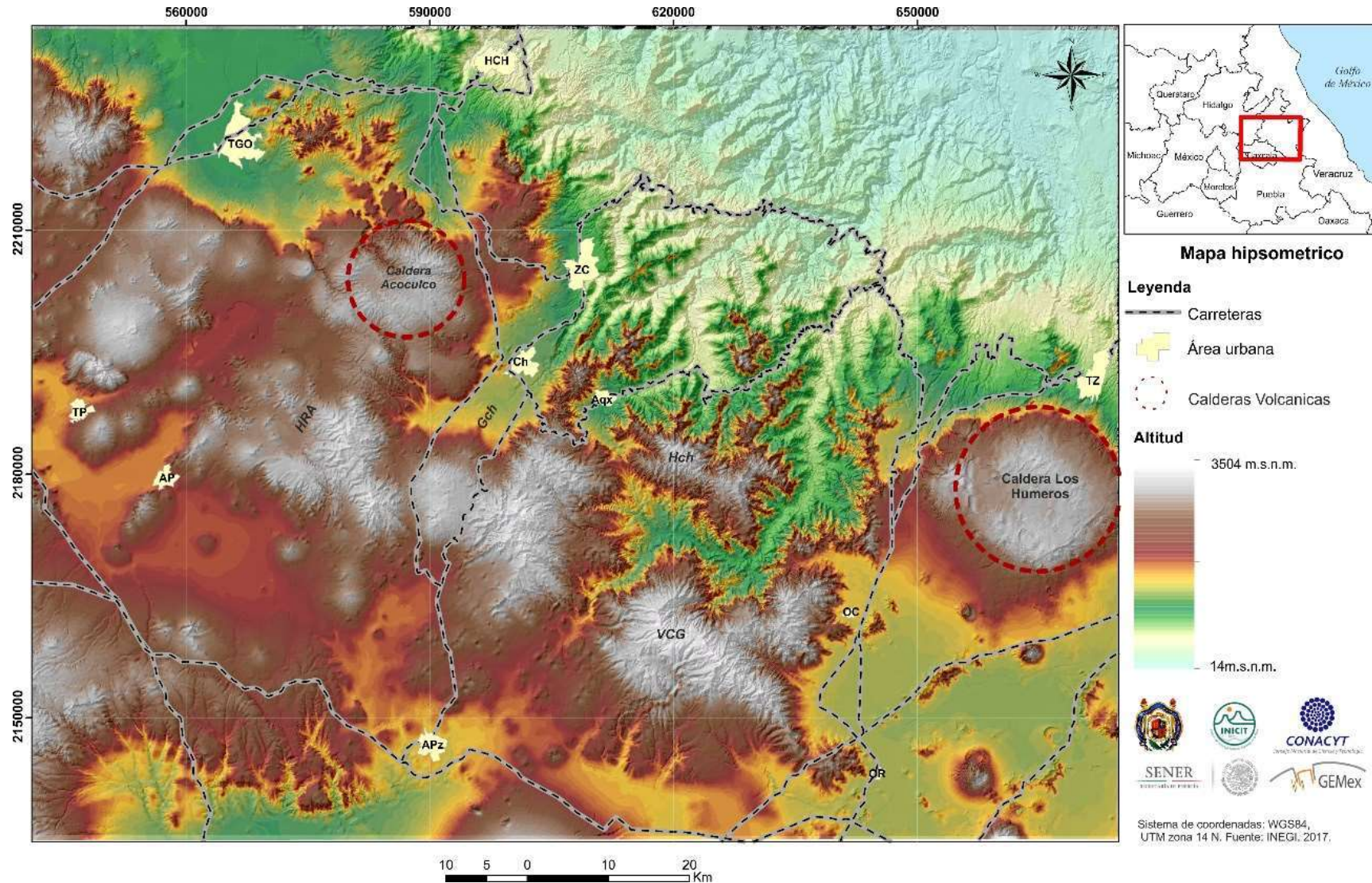
La elaboración del mapa hipsométrico (Fig. 12) del área de estudio permitió realizar el análisis de la variación topográfica, identificando alturas entre 14 y 3504 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Las cotas mínimas se observaron en la porción noreste del área de estudio, las cuales incrementan gradualmente en dirección suroeste hasta la altura de las ciudades de Teziutlán-Huachinango, mientras que las elevaciones máximas muestran una distribución controlada por la presencia de estructuras tipo graben y horst, así como cuerpos volcánicos.

Las secuencias sedimentarias mesozoicas con mayor altitud (2800-3000 m.s.n.m) afloran en el centro del Horst Chignahuapan (HCh). Los estratovolcanes miocénicos alineados NW-SE en la porción suroeste del área de estudio también se encuentran en este rango altitudinal, aunado a ello los cuerpos volcánicos del Plioceno-Holoceno muestran altitudes similares, mientras que los rangos intermedios se encuentran limitados por los volcanes semiescudo y sus coladas de lava, dando lugar a sectores alargados en dirección noreste y noroeste.





*Análisis cinemático de las zonas geotérmicas Acoculco y Los Humeros*

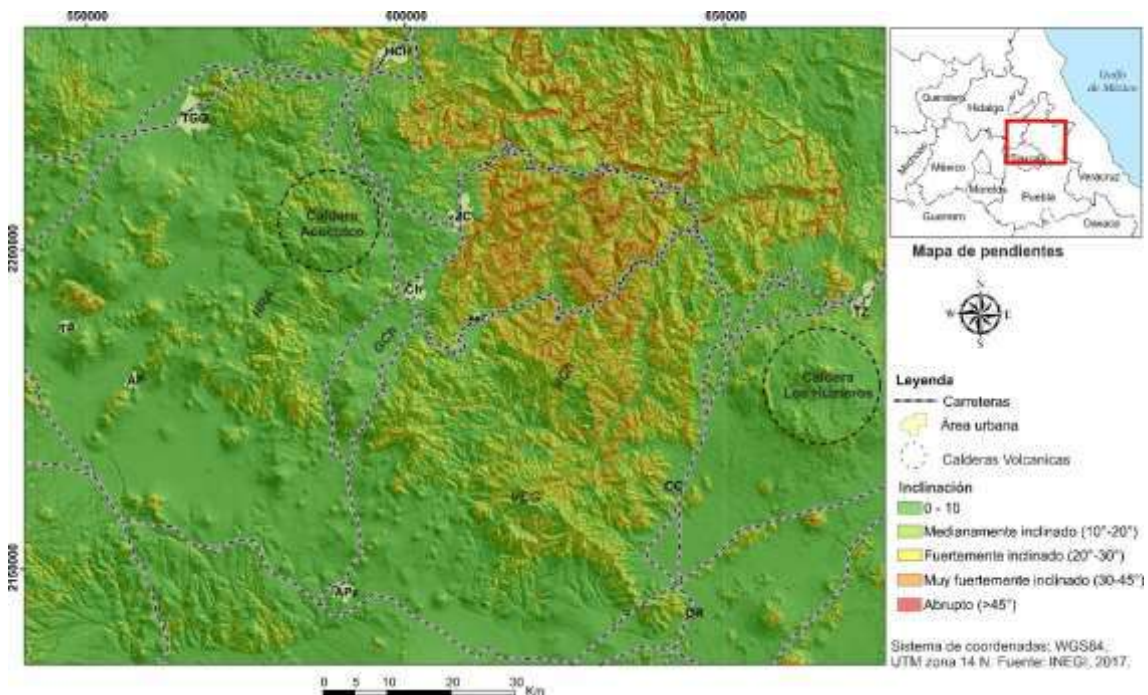


**Figura 12.-** Mapa hipsométrico del área de estudio. Valor altitud mínimo 14 m.s.n.m y máximo 3004 m.s.n.m.; en la porción superior derecha de la imagen se ubica el mapa de localización. En el mapa hipsométrico se incluyen las principales vías de acceso, y localidades más importantes en la región: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlan (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocoteppec (OC), Teziutlán (TZ), así como las estructuras: Horst Rosario-Acoculco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh) y el Volcán Cerro Grande (VCG); así como las calderas de Acoculco y Los Humeros.

### Mapa de pendientes

El mapa de pendientes muestra la inclinación del terreno, en donde se identificaron importantes cambios de pendiente íntimamente relacionados con la distribución de las unidades litológicas. Las pendientes que van de 0° a 10° representan planicies cubiertas por depósitos aluviales, las cuales están interrumpidas por aparatos volcánicos (estratovolcanes y conos cineríticos) y estructuras tipo graben y semigraben, como lo son Graben Apan, Graben Chignahuapan, Cuenca Libres Oriental y la Depresión Apizaco-Tlaxco como las más relevantes dentro del área de estudio, siendo las tres primeras de orientación NE-SW y la última de orientación NW-SE. Además, las pendientes abruptas > 45°, se localizan al interior del Horst Chignahuapan (HCh) en la porción oriente, estando restringidas por la distribución de las unidades Mesozoicas, aunque en menor medida también se observaron en las laderas de algunos estratovolcanes, coladas de lavas, y zonas de colapso.

El mapa de pendientes permitió identificar patrones lineales relacionados principalmente con fallas y colapsos, así como definir los lineamientos de conos monogenéticos del Campo Volcánico Apan Tezontepec (CVAT) y otras estructuras lineales y semicirculares. Las tendencias principales de lineamientos observadas presentan orientación NW-SE y NE-SW (Fig. 13).



**Figura 13.-** Mapa de pendientes, para el cual se empleó una escala de colores con cinco intervalos que responden a 0-10° planicies (color verde<sub>1</sub>), 10°-20°(verde<sub>2</sub>), 20°-30° (amarillo),30°-45° (naranja) y >45° (rojo); además de las principales vías de comunicación y áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlan (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocoteppec (OC), Teziutlán (TZ) ; estructuras volcánicas y estructuras más relevantes: Caldera

Acoculco, Horst Rosario-Acoculco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh), Volcán Cerro Grande (VCG), Campo Volcánico Apan Tezontepec (CVAT) y la Caldera Los Humeros.

#### *Índice de disección vertical*

Parámetro morfométrico que representa la amplitud del relieve (altura relativa) por unidad de área y se expresa en  $m/km^2$ . Sirve principalmente para definir algunos tipos de relieve (montañas, lomeríos y planicies) y nos ofrece información sobre la energía del mismo. En localidades con homogeneidad litológica, la presencia de mayor disección vertical sugiere ascensos neotectónicos notables (Ordaz-Hernández et al., 2011). El modelo que se ha obtenido presenta 9 rangos de valores, donde los intervalos inferiores a 90 corresponden a planicies, mientras que los rangos por encima de este valor representan zonas de montaña (Fig. 14).

Los valores más altos se encuentran expuestos en las regiones donde están aflorando las unidades sedimentarias mesozoicas, mientras que los valores intermedios corresponden a las unidades del Mioceno, seguido por los depósitos volcánicos Plío-Cuaternarios, y los valores menores corresponden a zonas de depósito. Aunado a ello, se observaron patrones lineales de dirección NW-SE y NE-SW.

#### *Red de drenaje (Análisis de geometría de cuencas)*

El área de estudio se encuentra conformada por cuatro subcuencas y la fracción de otras nueve, las cuales pertenecen a 3 regiones hidrográficas: Tuxpan-Nautla, Panuco y Balsas, en la tabla 5 podemos observar la información general de estas. Los parámetros base empleados fueron área (A), perímetro (P) y longitud de la cuenca, utilizados para realizar el cálculo de la razón de elongación (Re) e índice de forma (C), para los cuales Jardí, (1985) mencionó que los valores de Re varían entre 1-0, estando los valores más bajos relacionados con cuencas alargadas, mientras que los valores de C fluctuarán entre 1 y 2, donde los valores altos se encuentran relacionados con cuencas lobuladas.

Además de los parámetros anteriores para definir características de las cuencas, se realizó la clasificación del orden de drenaje al interior de cada una de las subcuencas, para lo cual se aplicó la metodología de Strahler (1952). En la figura 15 se observan los polígonos de las cuencas superficiales, y los causes de los ríos de orden superior (valores de 4 en amarillo, 5 naranja, 6 rojo<sub>1</sub> y 7 rojo<sub>2</sub>), en donde se observó que las redes de drenaje de orden superior presentan orientaciones preferenciales de dirección NE-SW y NW-SE en menor proporción, compatibles con los sistemas de fallamiento.

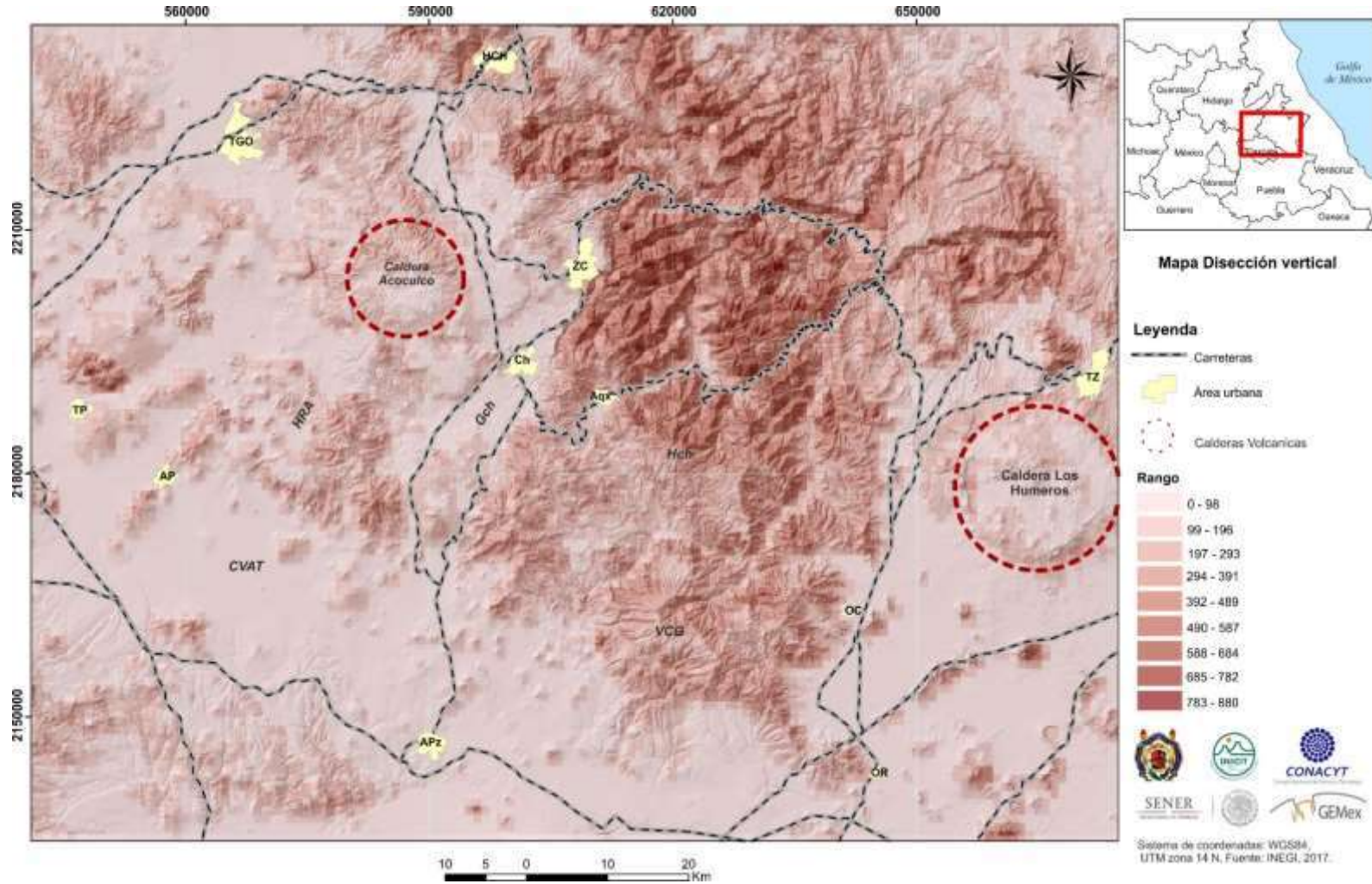


Nombre	Área (A) km <sup>2</sup>	Perímetro (P) km	Longitud (L <sub>w</sub> ) km	Razón de elongación (Re)	Índice de forma (C)
R. Apulco	2109,37	337,45	123,04	0,4214286	2,07266025
R. Tecuantepec	1056,34	205,55	80,78	0,45424688	1,78406505
R. Laxaxalpan	1608,95	289,34	105,16	0,43064027	2,03484939
R. Necaxa	900,78	226,61	85,5	0,39631197	2,12992726
R. Jobapan	502,21	188,42	67,8	0,37317017	2,37180723
L. Tochac y Tecomulco	1901,56	257,75	65,08	0,7564869	1,66739588
R. Zahuapan	1632,65	225,5	64,99	0,70193024	1,57432745
L. Totolzingo	4918,72	376,59	87,85	0,90131838	1,51473898
R. Atoyac-San Martin Texmelucan	1967,5	260,56	79,17	0,63254389	1,65708751
R. Tecolutla	1644,4	405,07	*	*	2,81787299
R. San Marcos	1635,23	317,77	97,77	0,46695792	2,2167593
R. Metztitlan	2821,42	361,38	122,46	0,48970389	1,91922243
R. Tezontepec	2067,25	277,39	84,11	0,610299212	1,72103368
R. Bobos	1789,85	234,23	63,04	0,7576804	1,56181384

**Tabla 4.-** Parámetros de cuenca y subcuenca en el área de estudio

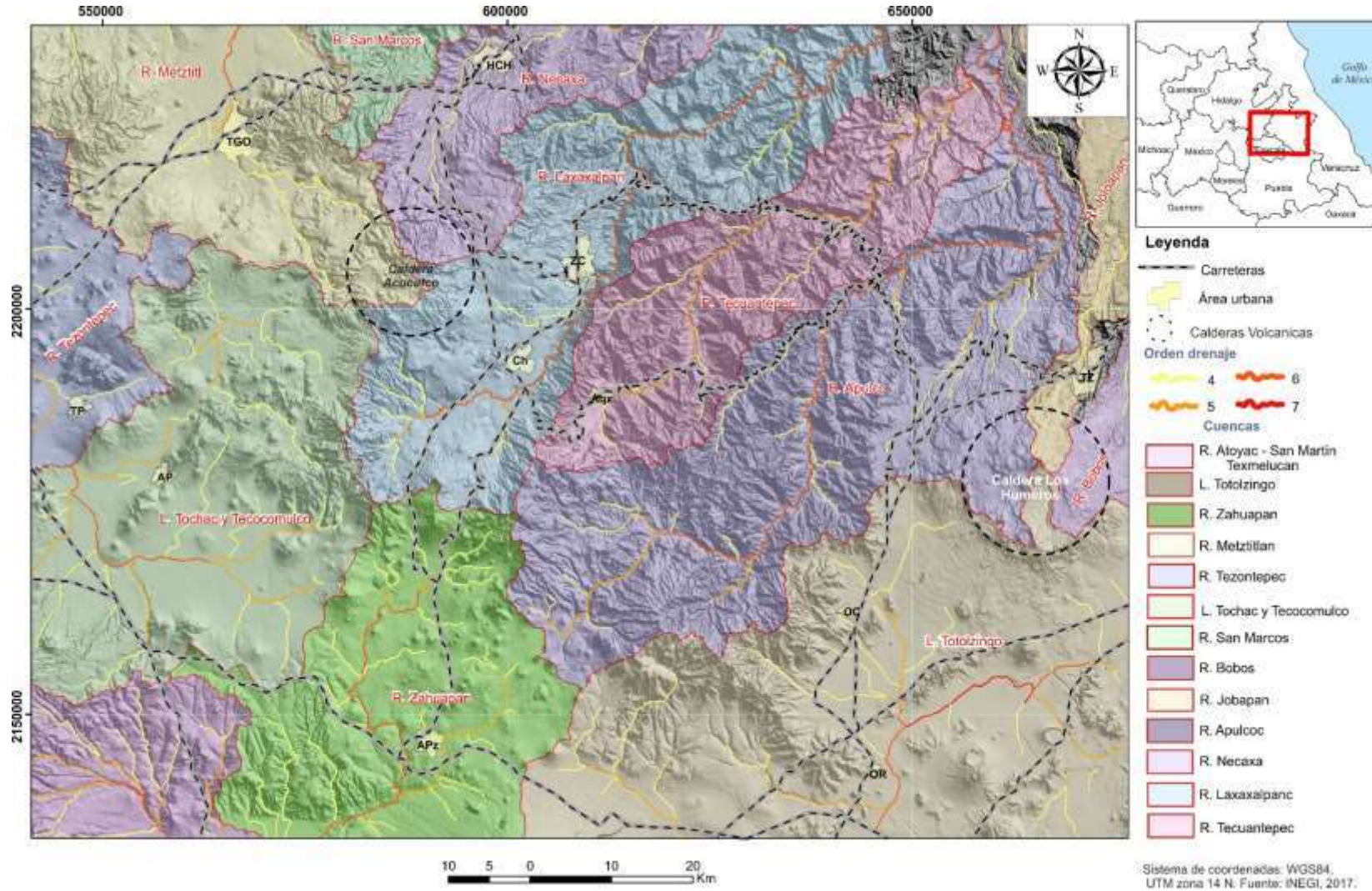
Las geometrías de las cuencas se desarrollan en respuesta a la naturaleza y distribución del levantamiento y el hundimiento, la disposición espacial de las fallas, la resistencia relativa de los diferentes tipos de rocas y los parámetros hidrológicos influenciados climáticamente (Burkan y Anderson, 2012). Las características geométricas obtenidas en el área de estudio, las cuencas alargadas (valores de  $Re < 0.5$ ) se encuentran sobre las unidades del Mesozoico y Mioceno, y en estructuras tipo graben y horst de orientación NE-SW, como lo son Apulco y Tecuantepec, sobre el HCh, la Cuenca Laxaxalpa, que se caracteriza porque en la porción oriente afloran sedimentos mesozoicos y la porción occidente corresponde con el graben Chignahuapan (GCh), mientras que las cuencas con valores de  $Re > 0.5$  se caracterizan porque en estas aflora vulcanismo del Plio-Pleistoceno y las fallas regionales no son tan prominentes.

*Análisis cinemático de las zonas geotérmicas Acozulco y Los Humeros*



**Figura 14.-** Mapa de disección vertical, en la leyenda se incluye la escala con los rangos empleados, van de 0 a 880 (separados en 9 rangos, en tonos de rojo) relacionados con las distintas unidades litológicas y estructuras lineales; los valores menores se encuentran relacionados a planicies rellenas por depósitos aluviales recientes, mientras los valores más altos, se encuentran relacionadas a sectores donde afloran las secuencias sedimentarias mesozoicas (porción oriente del Horst Chignahuapan): se incluyen las principales carreteras y áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocotepéc (OC), Teziutlán (TZ); así como las principales estructuras conocidas como Caldera Acozulco, Horst Rosario Acozulco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh), Volcán Cerro Grande (VCG), Campo Volcánico Apan Tezontepec (CVAT) y la Caldera Los Humeros.

*Análisis cinemático de las zonas geotérmicas Acoculco y Los Humeros*



**Figura 15.-** Mapa de cuencas hidrológicas y clasificación de orden de drenaje. En la leyenda se incluye una clasificación de colores para identificar cada una de las cuencas, mientras que al interior del mapa se cuenta con el nombre de la misma, además se incluyeron las principales vías de comunicación y zonas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (OR), Ocotepc (OC), Teziutlán (TZ), además las circunferencias punteadas en color negro indican la posición de las zonas geotérmicas de Acoculco y Los Humeros.

### *Morfolineamientos*

Con base en las características de los mapas y modelos anteriores se construyó un mapa de morfolineamientos donde se decidió dar mayor énfasis a las estructuras producto de la deformación frágil como fallas, lineamientos formados por sistemas de fracturas, algunos curvilineamientos generados por sectores de colapso volcánicos y en menor proporción ejes de pliegues; en total se identificaron 10,242 morfolineamientos, los cuales presentan dos conjuntos de orientaciones preferenciales NW-SE y NE-SW (Figs. 16 y 17) que corresponden con los sistemas de fallas regionales. Las fallas encontradas son de tipo normal y de movimiento a rumbo, en ambos casos el mapa de pendientes ha sido muy útil para ubicar estas estructuras, sin embargo, en el caso de las fallas normales se presentan escarpes muy pronunciados, mientras las fallas laterales únicamente se encuentran representadas por lineamientos que cortan y/o desplazan a otras estructuras.

Se trazaron 10,242 líneas relacionadas con lineamientos de posible origen estructural, los cuales se agruparon en el diagrama de rosa de la figura 16, así como el mapa de densidad de lineamientos. En la figura 18 puede observarse el mapa de densidad de drenaje (del lado izquierdo), el cual se generó en Arc-Gis con la red de drenaje superficial escala 1:50,000 de INEGI y se comparó con la densidad de morfolineamientos (lado derecho, Fig.18) delimitados a partir de los patrones lineales que resaltan los mapas temáticos expuestos anteriormente.

Dentro del análisis morfoestructural fueron definidos algunos de los términos empleados como lo son:

Lineamientos de fallas y fracturas (con movimiento a rumbo) de las cuales se puede definir su cinemática en este análisis, mediante el análisis geométrico de los lineamientos, que en su mayoría se encuentran representados por patrones lineales.

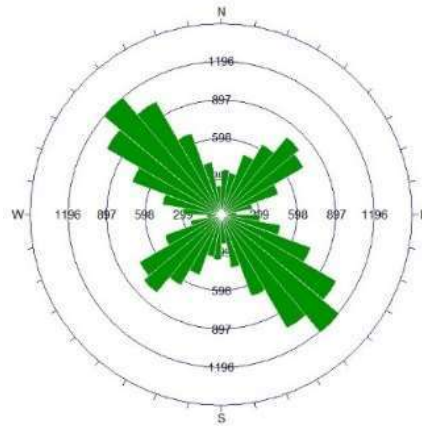
Fallas normales: estructuras con desplazamientos verticales donde se pueden apreciar los escarpes de las estructuras y la geometría de estas.

Estructuras de colapso: estructuras semicirculares con cambios abruptos de pendiente y niveles de altura, donde resaltan los colapsos caldericos de la CAC y CLH.

Las principales estructuras de colapso identificadas se encuentran sobre la traza de una falla de orientación NW-SE desde la localidad de Apan a Oriental (denominada Falla Tlaxco (FTx)): sobre el Volcán Cerro Grande (VCG) se observaron dos pequeños colapsos, uno en la cima del volcán con buzamiento al NE y otro sobre el flanco SW, el cual abre al SW, hacia el NW se observa otro colapso de mayores dimensiones el cual describe un sector en forma de herradura abierto al SW, así como en la Ignimbrita



Matamoros una geoforma semicircular que rodea este depósito, además de estos se encuentran otros sobre el volcán Las Navajas al NW del área de estudio. Al interior del HCh también se observaron colapsos en forma de herradura con orientación NW y SE, principalmente en la porción centro del HCh.



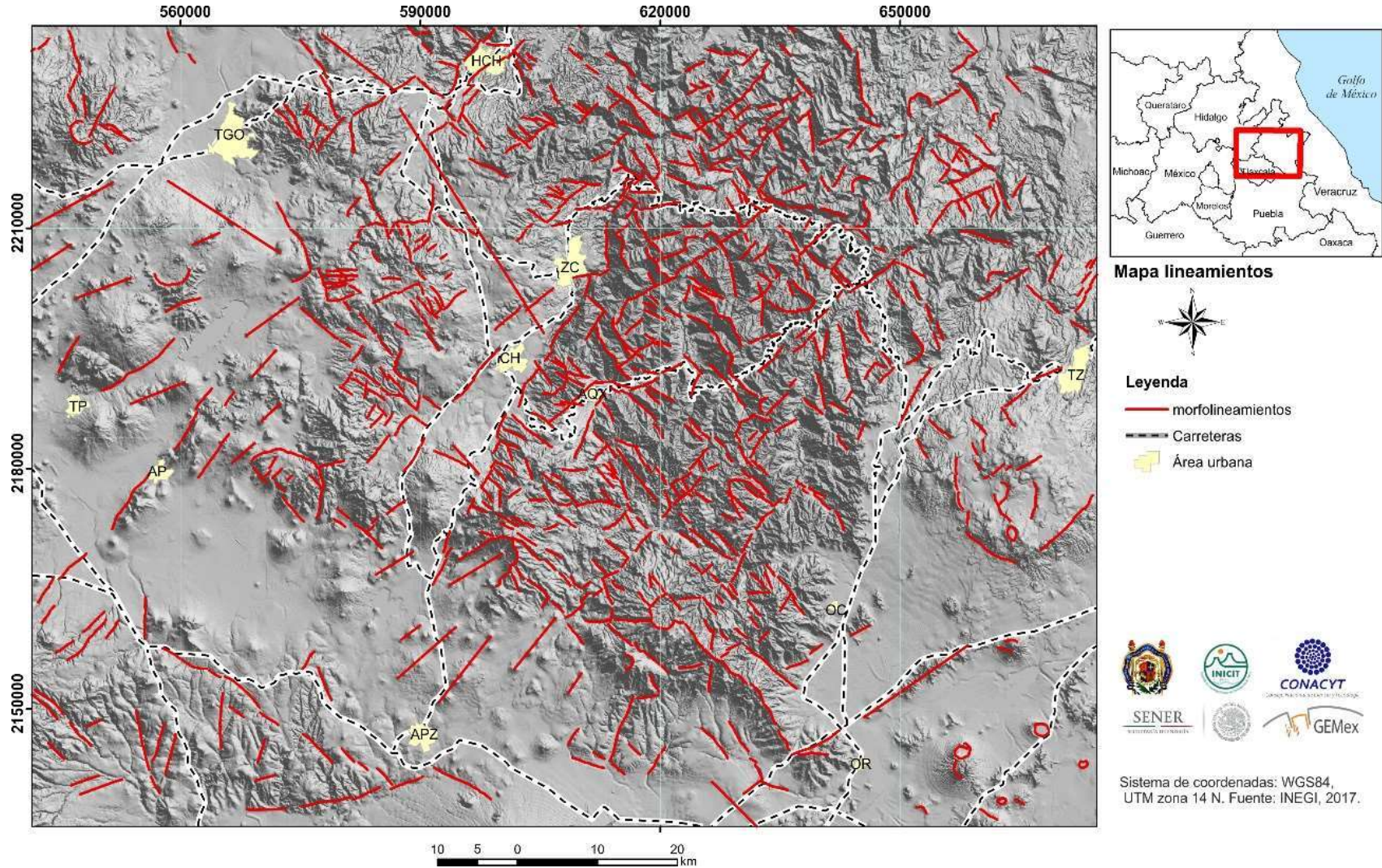
**Figura 16.-** Diagrama de rosa en el cual se incluyen los 10,242 morfolineamientos trazados a partir de los mapas y modelos: hipsométrico, pendiente, disección vertical y redes de drenaje.

Dentro de los lineamientos observados, los relacionados con el lineamiento de conos en campos volcánicos monogenéticos ha sido muy importante, debido a que estos representan una expresión de estructuras tectónicas que controlan el desarrollo de campos volcánicos (Nakamura, 1977). La ocurrencia y distribución espacial de estructuras eruptivas monogenéticas dentro de un área volcánica están ligadas a sistemas de fracturas, las cuales son un reflejo del campo de esfuerzos (Takada, 1994). Más aún, parámetros morfométricos de conos monogenéticos, como elongación de cono, dirección de ruptura y alineamientos de conos, son indicadores de la dirección de fracturas que actúan como vías de ascenso de magmas (Tibaldi, 1995). De acuerdo con Corazzato y Tibaldi (2006), el lugar de ruptura coincide con la zona de debilidad de los conos o con la dirección de máximo estrés aplicada en los flancos por la propagación de fractura o carga de magma. Tales rupturas son paralelas a la geometría de la fractura alimentadora de magma, a menos que el cono este emplazado sobre un substrato que este manteniendo ( $>10^\circ$ ).

Los campos monogenéticos han sido tema de análisis por distintos autores, sin embargo, en esta sección hemos hecho énfasis en los aparatos volcánicos al interior del área del estudio y no en el total, aludiendo únicamente a los lineamientos a los cuales han dado lugar respetando los parámetros antes mencionados.

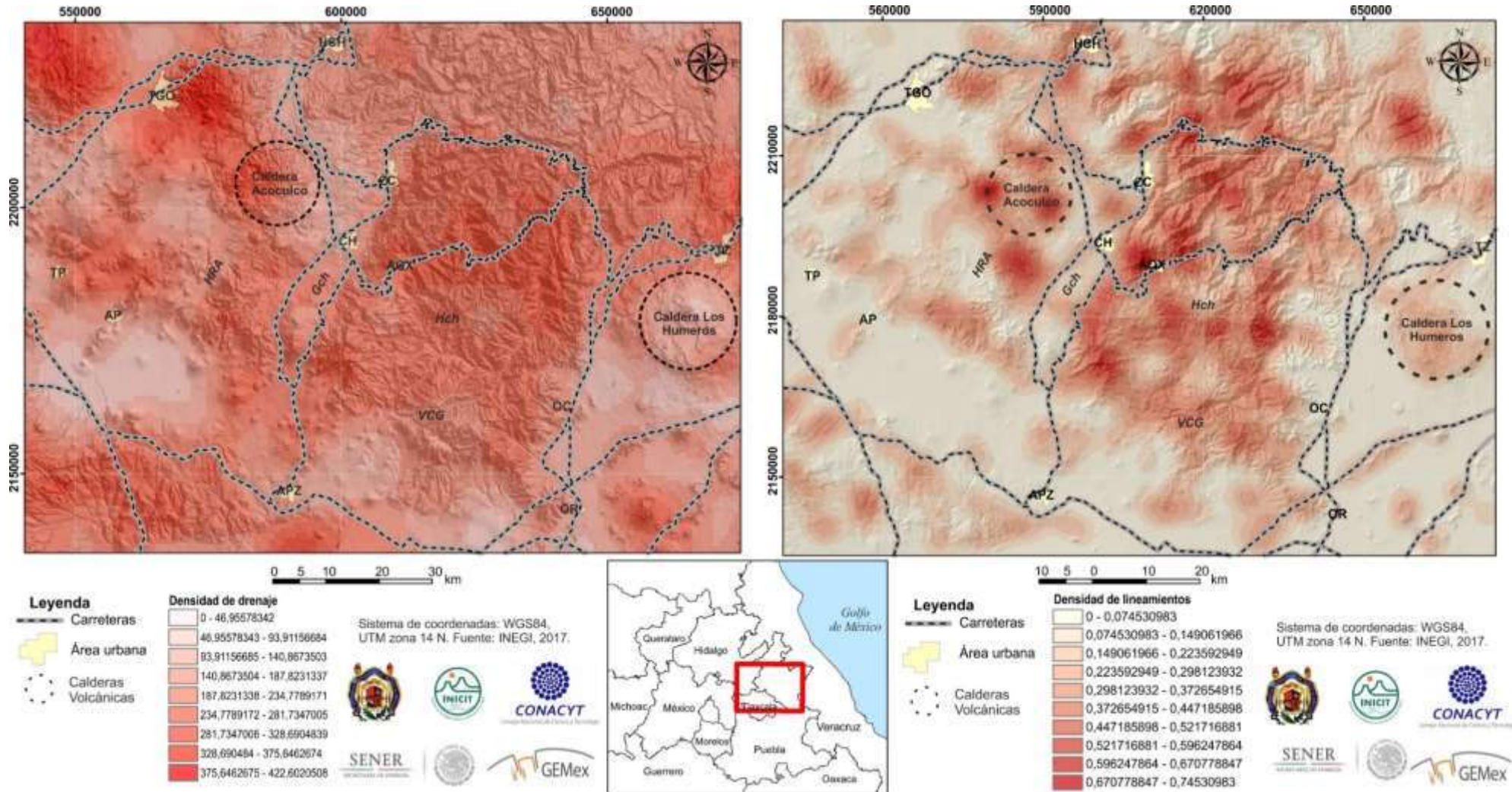


*Análisis cinemático de las zonas geotérmicas Acoculco y Los Humeros*



**Figura 17.-** Mapa de morfolineamientos (líneas en color rojo) en el área de estudio, presentan tendencias NW-SE y NE-SW principalmente, se incluyen las principales vías de comunicación y áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocoatepec (OC), Teziutlán (TZ).

Análisis cinemático de las zonas geotérmicas Aocolulco y Los Humeros



**Figura 18.-** Mapa comparativo entre la densidad de drenaje a) y densidad de lineamientos b), al interior de la zona de estudio en ambos casos los sectores donde el color es rojo más intenso, representan zonas con mayores densidades, siendo muy similares para el sector centro del Horst Chignahuapan y oeste de la caldera Aocolulco. Donde se incluyen las principales vías de comunicación y áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (Or), Ocoteppec (OC), Teziutlán (TZ).

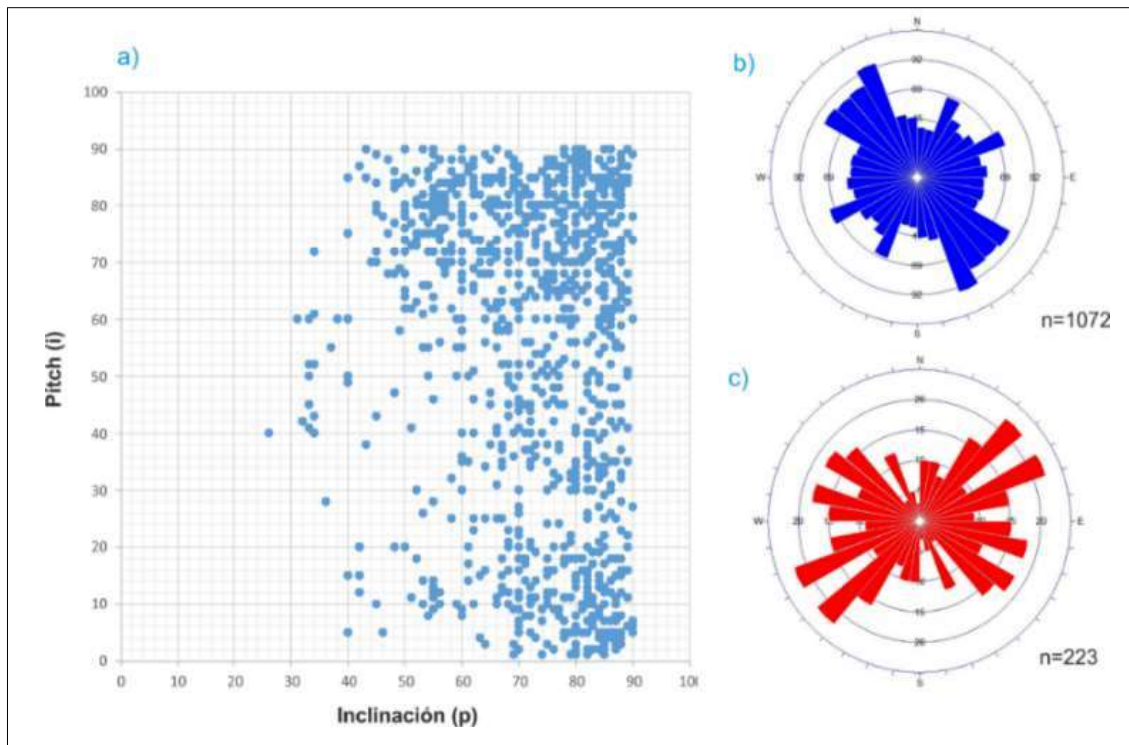
## **V.2.- Análisis cinemático**

Dentro del análisis cinemático se contempló la caracterización de la geometría y distribución de los sistemas de fallamiento, así como la descripción minuciosa de las principales estructuras que los componen, el cual comenzó durante el análisis morfoestructural, complementándose con los datos de campo y el análisis de los mismos, los cuales se presentan en el anexo 2, el cual contiene la totalidad de las estaciones estructurales, donde para cada una de ellas se separaron los datos de planos de falla en tres etapas de deformación, compatibles de acuerdo a la geometría y cinemática de las estructuras. En este anexo se incluye la clave de las estaciones, así como una descripción litológica y las características cinemáticas del fallamiento. Los diagramas que se incluyen, muestran valores para los tres esfuerzos principales, los cuales son muy importantes en la agrupación de fases de deformación.

En el apartado anterior se ha definido que los trenes estructurales que dominan el área de estudio presentan orientación preferencial NW-SE y NE-SW, lo cual es congruente con los datos de campo empleados en la construcción de diagramas rosas para evaluar la dirección preferencial de los sistemas de fallamiento. Previamente, los datos de campo, fueron clasificados y separados en: i) datos relacionados con la deformación compresiva NE-SW de la Orogenia Laramide, los cuales serán analizados en el apartado V.2.1; ii) datos de fallas y fracturas al interior de la CAC, fueron analizados de forma separada (Fig.19c, apartado V.2.5); iii) el resto de los datos estructurales, que contemplan los sistemas de fallas regionales.

Los datos de campo empleados en la construcción de diagramas de rosas se muestran en las figuras 19b y 19c. Para el primero se observaron dos tendencias principales de fallamiento de dirección NW-SE y NE-SW, mientras que en la figura 19c, correspondiente a los datos colectados al interior de la CAC, se representan las dos tendencias principales, aunque sin existir un predominio de uno sobre el otro, además de la existencia de estructuras ~E-W y en menor proporción N-S. Los planos de falla se caracterizan por presentar altos ángulos, mientras que las relaciones Pitch (i) / inclinación (p) contemplan tres subgrupos: movimiento vertical con planos de subvertical a vertical, movimiento lateral, y estructuras con movimiento oblicuo (estrías entre 30° a 60°).





**Figura 19.** - Características geométricas y datos cinemáticos de campo: a) gráfica pitch/inclinación de datos extracaldéra; b) diagrama de rosas, para el cual se excluyen estaciones all interior de la Caldera Aocolco y relacionados a la Orogenia Laramide; c) datos al interior de la Caldera Aocolco.

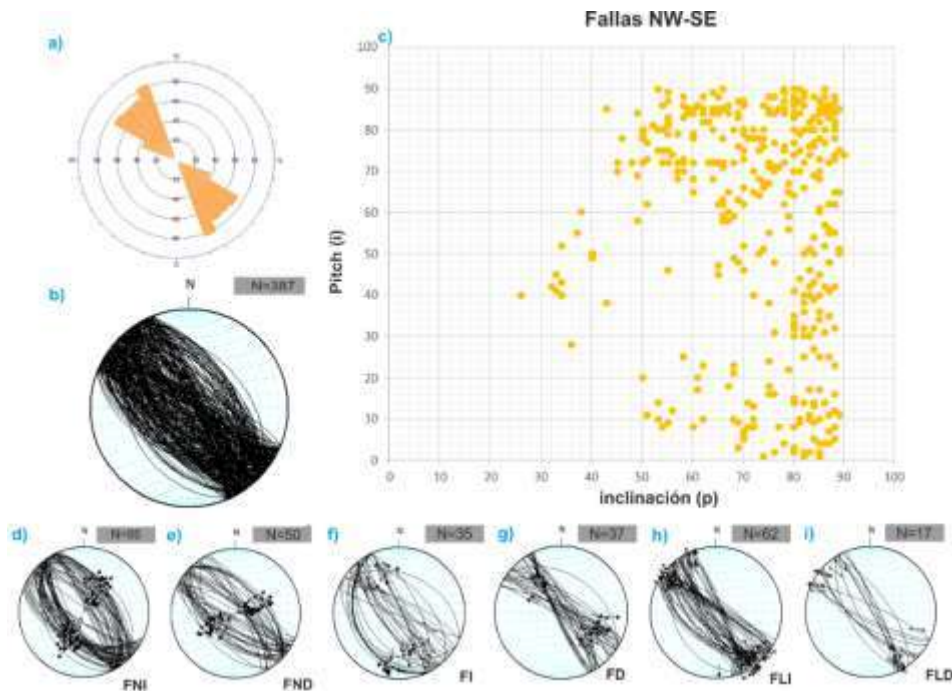
### Sistema de fallas NW-SE

Las estructuras de dirección NW-SE, con orientaciones preferenciales entre N300° a N340°, han afectado a la mayoría de las unidades que afloran en la zona mostrando al menos dos etapas de deformación. Al interior del HCh cortaron las unidades sedimentarias mesozoicas y volcánicas del Mioceno con desplazamientos verticales normales. Estas fallas fueron reactivadas como fallas de movimiento a rumbo afectando a las unidades volcánicas Plio-Cuaternarias, las cuales están presentes en toda el área de estudio (Fig.20).

El sistema de fallas NW-SE está representado por cuatro fallas principales, las cuales presentan expresión morfológica y se cuenta con evidencia en campo, aunado a ello se observaron una serie de fallas de menor longitud, las cuales presentan las mismas características de dirección e inclinación, compatibles con la cinemática de las estructuras principales. La mayoría de los datos colectados en campo implican movimiento vertical de fallas normales.

En la figura 20 se representa un resumen de las características geométricas y cinemáticas de este sistema de fallas, El cual ha experimentado fallamiento normal con componente lateral izquierda y derecha (Fig. 20 d y e), representando el 49% de los

datos de campo, compatibles con una fase de extensión NE-SW, así como la presencia de fallas con estrías oblicuas con componente lateral izquierda y derecha, además de fallamiento lateral.



**Figura 20.-** Características de estructuras NW-SE: a) diagrama de rosas (N290°-340°); b) estereograma de datos de falla; c) diagrama pitch/inclinación con predominio de fallas con desplazamiento vertical (normal, de acuerdo con los datos de campo), fallas con desplazamiento a rumbo y un tercer grupo con estrías oblicuas; d, e, f, g, h, i) estereogramas separados por cinemática de fallas: d) falla normal con componente lateral izquierda, e) falla normal con componente lateral derecha, f) y g) corresponden a fallas con estrías oblicuas entre 31° y 59° con componente izquierdo y derecho respectivamente, h) fallas laterales izquierdas y i) fallas laterales derechas.

### Fallas N-S

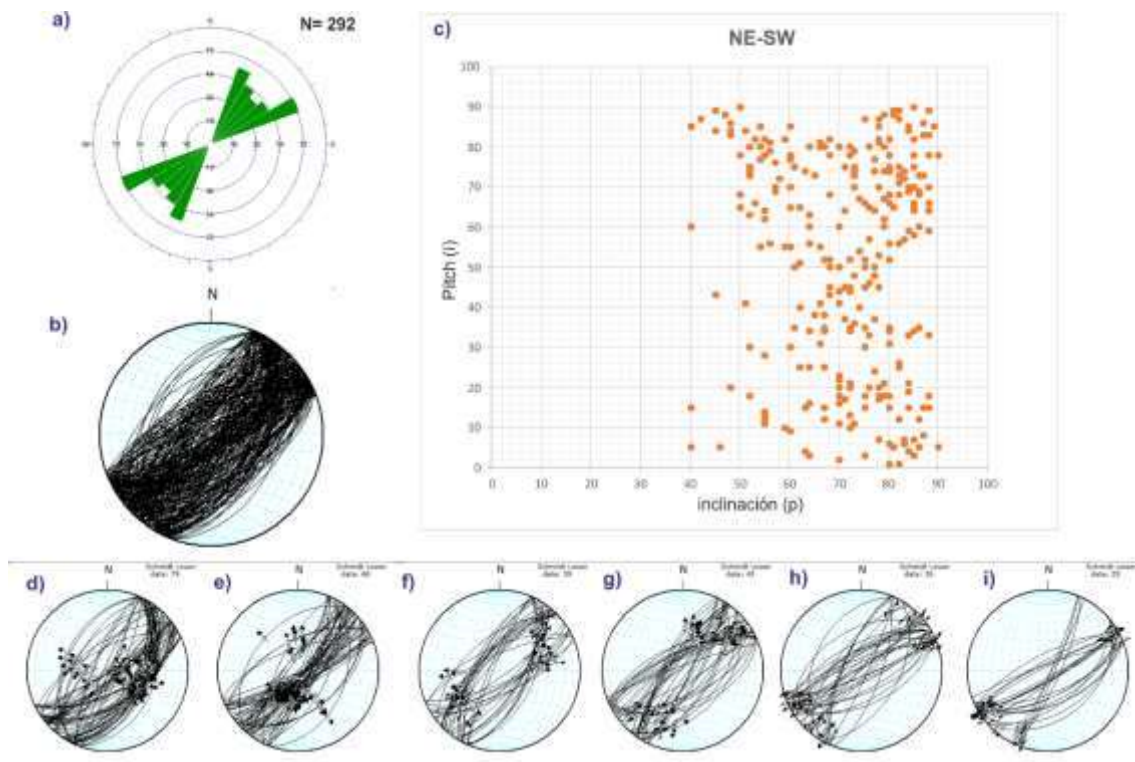
Asociadas al tren principal de fallas NW-SE se encuentran estructuras menores N-S, las cuales presentan las mismas características cinemáticas. Representan el 16 % de los datos de campo, y su expresión morfológica sólo es evidente en la bifurcación de algunas estructuras NW-SE.

### Sistema de fallas NE-SW

Las estructuras con orientación preferencial NE-SW representan las evidencias morfológicas más claras y evidentes del área de estudio, ya que los escarpes generados por las mismas muestran desniveles importantes (mayores a 100 m) observables tanto en el mapa de pendientes como en el modelo hipsométrico. De acuerdo con los datos obtenidos en campo (Fig. 21), se observaron dos tendencias que sobresalen de las

estructuras de dirección NE-SW: la primera entre 020° y 040° correspondiente con el sistema de fallas regional Apan-Tlaloc, y la segunda entre 060° y 080° que corresponde con una serie de fallas que se localizan principalmente al interior del HCh sobre las secuencias sedimentarias mesozoicas.

En el área de estudio, el Sistema de Fallas Apan-Tlaloc se encuentra integrado por una franja de fallas normales de dirección NE-SW (N 20° a 45°) aquí representado por cuatro fallas principales: F. Texcoco, F. Apan, F. Chignahuapan y la F. Axaxalpa, las cuales han dado lugar al Horst Rosario Acoculco (HRA), Graben Chignahuapan (GCh) y el Horts Chignahuapan (HCh), en cuyo interior se pueden observar otras estructuras de la misma dirección y características. Se recabaron 292 datos de planos de falla con esta dirección, cuya cinemática puede ser agrupada en seis tipos principales, la mayoría presentan desplazamiento normal con componente lateral izquierda y en menor medida derecha; fallas con estrías oblicuas y componente lateral izquierda y derecha; y en menor medida fallas laterales. El segundo grupo de fallas muestra una menor evidencia morfológica, principalmente porque se encuentra al interior del HCh donde las pendientes en general van de muy inclinadas a abruptas.



**Figura 21.-** a): Diagrama de rosas de fallas NE-SW donde sobresalen dos tendencias N20°-N30° y N60°-70°; b): estereograma con planos de dirección NE-SW; c): grafica de relación pitch/ inclinación, la presencia de fallas con movimiento en la vertical, movimiento oblicuo y movimientos horizontal, en la parte inferior se presentan planos de fallas y estrías relacionados con fallas; d): normal con componente izquierda; e): falla

normal con componente derecha; f) y g): planos de falla con estrías oblicuas izquierda y derecha h) e i): fallas con desplazamiento lateral izquierdo y derecho, respectivamente.

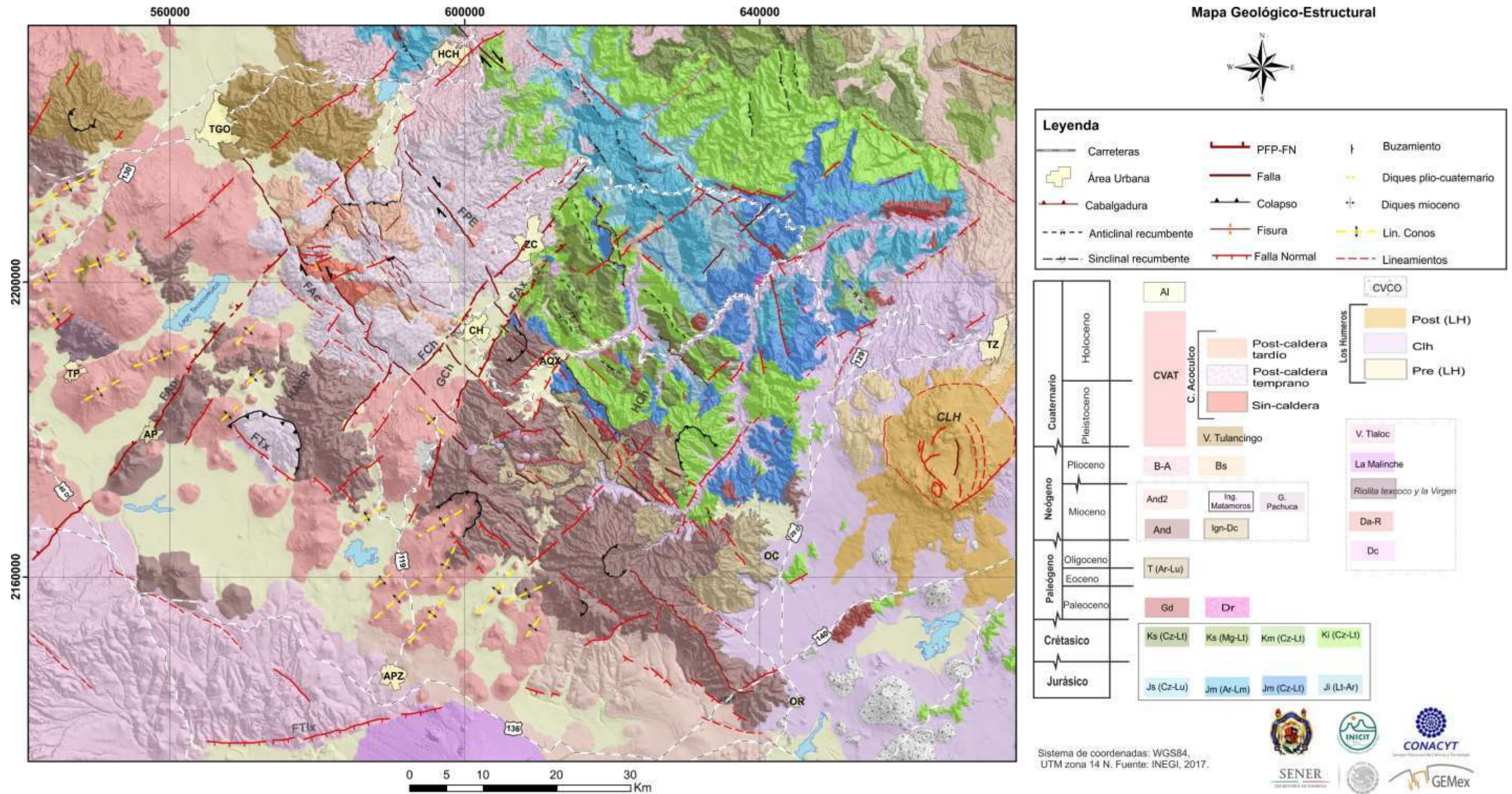
### Fallas E-W

Constituyen el 20% de los datos de campo, se distribuyen en toda el área de estudio, al igual que los planos de falla N-S, representan estructuras secundarias con la misma cinemática que el sistema de fallas NE-SW.

En la figura 22, se encuentra el mapa geológico estructural del área de estudio, el cual en forma de resumen contiene las principales estructuras de deformación, las cuales serán analizadas con mayor detalle más adelante, así como la distribución de las unidades estratigráficas de esta zona, la ubicación de los yacimientos geotérmicos de interés, mientras que en la leyenda se contempla la evolución temporal de las unidades, descritas en el capítulo III.1.

El área de estudio se encuentra controlada por tres fases de deformación con tensores de esfuerzos característicos, las cuales dieron lugar a estructuras regionales que pueden ser observadas en toda la zona. Para lo cual la primera consideración a tomar en cuenta para la separación de las fases de deformación, es la existencia de una separación temporal entre las etapas de fallamiento, ya que las unidades del Pleistoceno-Holoceno sólo han sido afectadas por una fase de deformación, mientras que las unidades sedimentarias mesozoicas fueron las únicas plegadas durante la Orogenia Laramide, y por tanto muestran patrones de fracturamiento relacionados al plegamiento.





**Figura 22.-** Mapa geológico-estructural, en el cual se han considerado la presencia de 4 unidades del Jurásico (inferior, medio y superior en colores azul); 4 del Cretácico (inferior, medio, superior polígonos de color verde); vulcanismo del Mioceno, sedimentos del terciario (al NE del área), vulcanismo del Mioceno y el relacionado con las calderas de Acozulco y Los Humeros. Se incluyen las principales estructuras principales como: Falla Apan (Fap), Falla Chignahuapan (FCh), Falla Axaxalpa (Fax), Falla Acozulco (FAC), Falla Tlaxco (FTx) y la Falla Tlaxcala (FTlx), sí como el Horst Rosario Acozulco (HRA), Horst Chignahuapan (HCh), Graben Chignahuapan (GCh). Donde las fallas normales (color rojo obscuro), lineamientos volcánicos del Campo Volcánico Apan-Tezontepec (líneas punteadas en color amarillo). Las principales vías de comunicación y áreas urbanas: Tulancingo (TGO), Chignahuapan (CH), Zacatlán (ZC), Huachinango (HCH), Apan (AP), Tepeapulco (TP), Aquixtla (AQX), Apizaco (APZ), Oriental (OR), Ocotepéc (OC), Teziutlán (TZ).



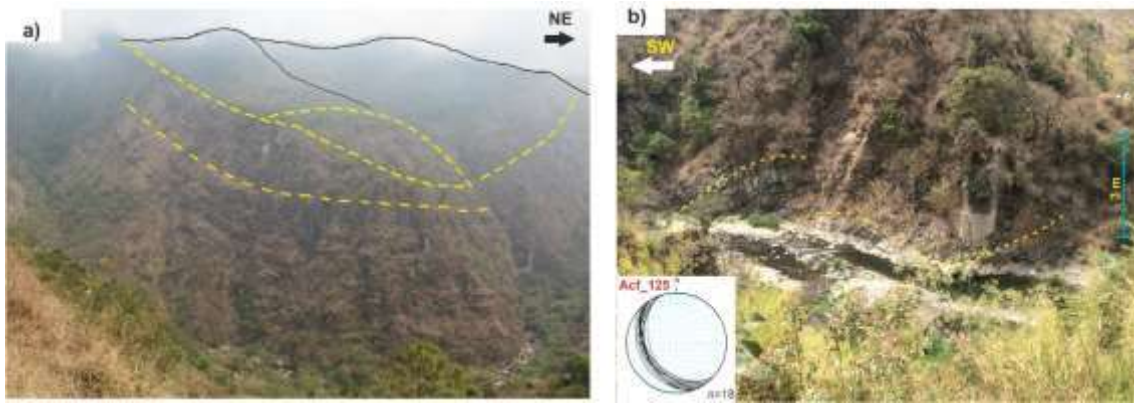
### 5.2.1.- Fase 1: Compresión NE-SW (Cretácico superior-Paleógeno)

Las secuencias sedimentarias, mesozoicas representan el basamento local de los campos geotérmicos de Acozulco (López-Hernández et al., 2009; Lorenzo-Pulido et al., 2011) y Los Humeros, por lo cual se levantaron 21 estaciones estructurales en campo (fig. 26). La deformación en las unidades sedimentarias mesozoicas, muestra evidencias de deformación dúctil en el caso del plegamiento de estas secuencias. El sistema de pliegues mostró variaciones de acuerdo con las características reológicas de las unidades, pero en términos generales los ejes de pliegue presentaron dirección preferencial NW-SE, en donde la mayoría de las capas plegadas muestran planos de estratificación ( $S_0$ ) con buzamiento al SW (Fig. 23).



**Figura 23.-** Plegamiento característico, en las secuencias calcáreas del cretácico, a), c) y d) pliegues chevrón y b) pliegue apretado acostado.

La geometría del plegamiento, así como la escala en el HCh presenta dos variantes espaciales, en la zona Chignahuapan-Zacatlán tanto en las rocas del Jurásico como del Cretácico se observaron pliegues tipo chevron recumbentes al NE, con orden de metros a decenas de metros. Mientras que en la porción NE del Horst en las unidades clásticas del jurásico, se presentan pliegues de escalas métricas y kilométricas, con una geometría de pliegues abiertos de acuerdo con la clasificación de Fleuty (1964). En la vista panorámica de la estación Acf\_190, se observan capas curvadas, relacionadas con un pliegue abierto; mientras que en las estaciones Acf\_125 y Acf\_172, se observa un perfil de pliegues abiertos de escala métrica en unidades clásticas (fig. 24 a, b).



**Figura 24.-** Plegamiento característico en unidades sedimentarias jurásicas, a) capas deformadas en vista panorámica de la estación Acf\_190; b) fotografías pliegues de escala métrica en estación Acf\_125.

Los datos considerados para el cálculo de esfuerzos fueron fallas inversas, corrimientos capa a capa, fracturas de tensión AB, y ejes de pliegue (Fig. 25). La mayoría de las estaciones se encuentran sobre la traza del Río Axaxalpa, y al interior de HCh, donde afloran las secuencias terrígenas jurásicas y carbonatos del Cretácico. Con todos estos datos se ha calculado el paleotensor de esfuerzos imperante durante este periodo, obteniéndose un valor mínimo de N13° (Acf\_07) y máximo N67° (Acf\_46), siendo el promedio de  $\sigma_1 = N 41^\circ \pm 13^\circ$ . Esta deformación es compatible con el evento orogénico del Cretácico-Paleógeno, que dio lugar a la SMOr.



**Figura 25.-** Estructuras de deformación característica de la orogenia Laramide (Acf\_70), a): falla inversa y b): pliegues tipo chevron.

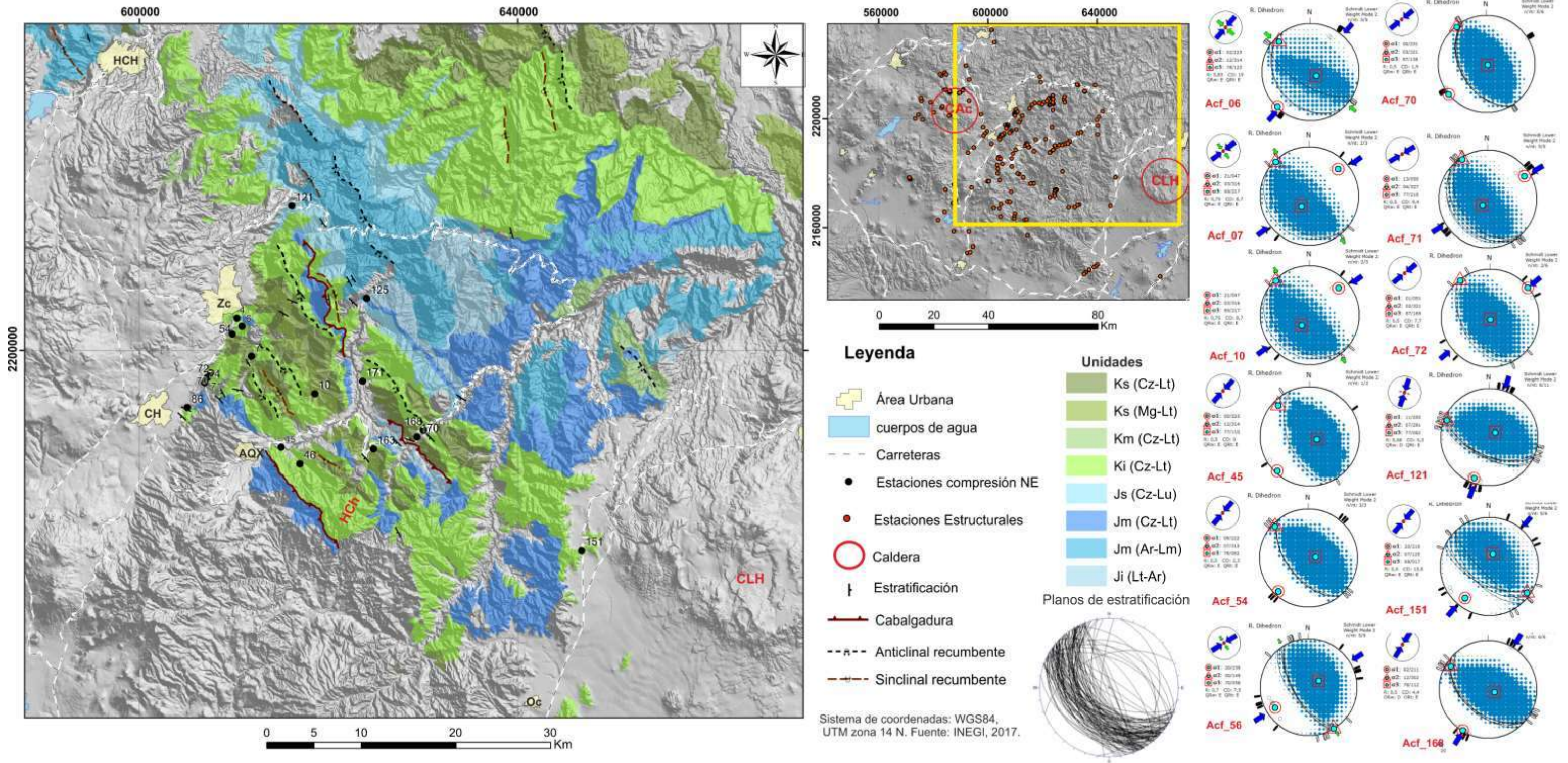
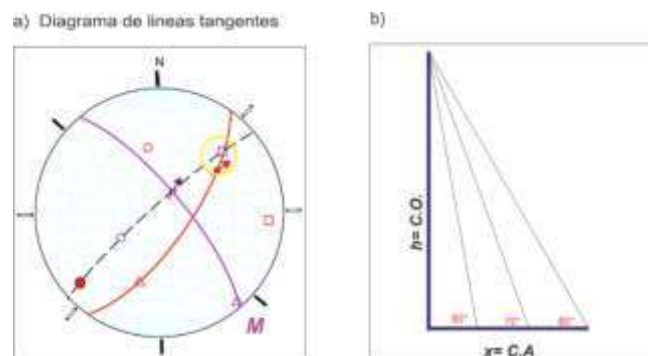


Figura 26.- Mapa estructural, con la localización de las estaciones en las cuales se calcularon los tensores de esfuerzo característicos de la orogenia laramide, así como los estereogramas de este cálculo, en los cuales se ha observado una etapa compresiva NE-SW característica, se han incluido las principales áreas urbanas: Huachinango (HCH), Zacatlán (Zc), Chignahuapan (CH), Aquixtla (AQX) y Ocotepc (OC), unidades estratigráficas las vías de comunicación, de lado derecho se encuentran diagramas con solución de esfuerzos para esta fase, y en la esquina superior izquierda los valores de los planos de estratificación medidos en campo. Se incluyeron las unidades sedimentarias mesozoicas (leyenda: azul para unidades del jurásico y verde para las del cretácico).

### 5.2.2.- Fase 2: Extensión NE-SW (Mioceno Superior)

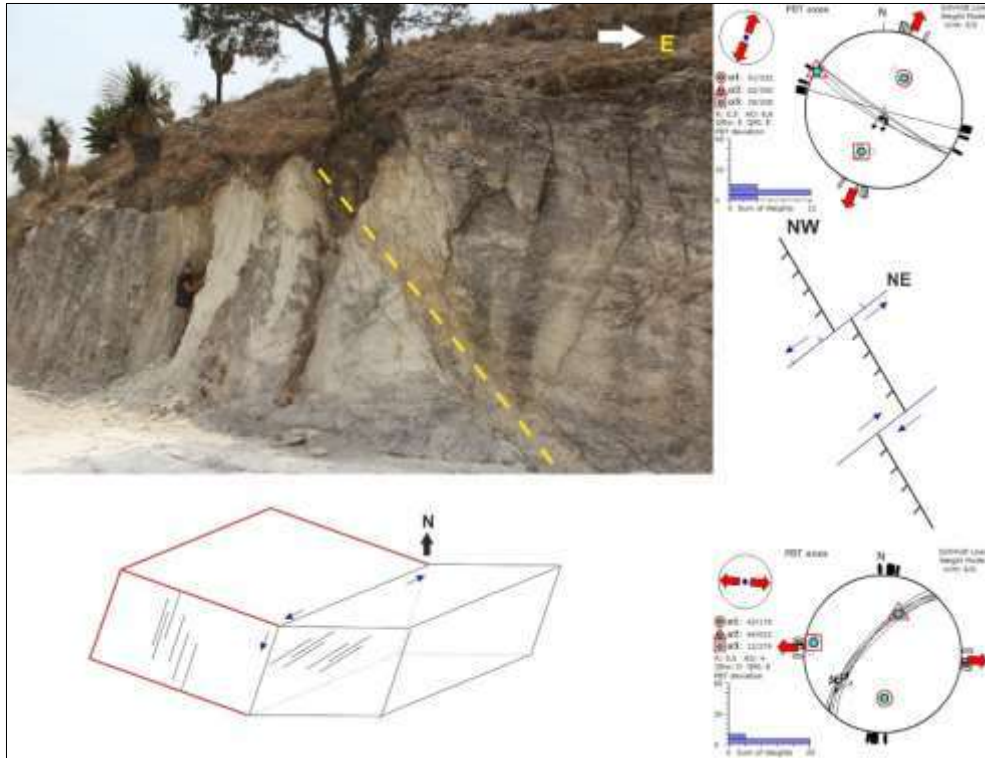
Durante el Mioceno, las fallas NW-SE, modelaron la morfología y la construcción de bloques hundidos y levantados creando un sistema de semigraben con fallas normales de dirección NW-SE, cuyos planos principales buzcan al SW, lo cual es observable en la porción sureste del HCh debido principalmente a que, en el resto del área de estudio, estas estructuras fueron cubiertas o parcialmente rellenadas por unidades volcánicas, vulcanosedimentarias y sedimentarias más jóvenes. Las principales estructuras de esta etapa son: la Falla Tlaxco, la fisura eruptiva al SE del VCG y el Sistema de Fallas Nocayoco, como tren estructural principal de orientación NW-SE, acompañado por un sistema de fallas secundarias de orientación NE-SW, las cuales actuaron como fallas de transferencia, acomodando la deformación producida por el tren principal.

En términos generales los desplazamientos en la vertical, para este periodo son mínimo de 250 a 300 m, con planos de falla entre  $75^\circ$  y  $85^\circ$  de inclinación, y en consecuencia los desplazamientos en la horizontal (extensión) presentaron valores entre 27 y 9 m por cada 100 m de desplazamiento en la vertical (Fig. 27), el cual es acomodado por pequeños planos de falla NE-SW con movimiento normal y componente lateral, caracterizadas por planos de  $60^\circ$  a  $70^\circ$  y estrías de oblicuas a laterales que fueron observadas durante las campañas de campo, principalmente en la secuencia Nocayoco, donde mejor se observa esta relación (Fig. 28). Además, a partir del cálculo de líneas tangentes en el estereograma, fueron calculadas valores de estrías para las fallas NE-SW relacionadas, obteniendo un valor entre  $30^\circ$  y  $50^\circ$ , partiendo de fallas normales NW-SE, su línea tangente y de graficar el plano de falla NE-SW, sin embargo, este valor no contempla fallas con geometría lítrica, lo cual implica que las fallas que acomodan la deformación tengan una mayor componente lateral.



**Figura 27.-** Diagrama de líneas tangentes para fallas normales de orientación NW-SE (línea en color morado: M), su polo (círculo relleno en rojo) el plano tangente ( $\sigma_3$ ) (la línea punteada en color negro) y el plano de falla NE-SW secundario (línea color rojo); b): triángulo rectángulo, en el cual se simula la relación directa existente entre la inclinación del plano de falla (hipotenusa) y el desplazamiento existente en la horizontal ( $x=C.A.$ ).

La extensión NE-SW se caracterizó por valores un  $\sigma_3$  entre N21° (Acf\_135) y N58° (Acf\_197), con un valor promedio de N43°  $\pm$  10°, calculado con datos de 22 estaciones estructurales, lo cual es evidenciado en las principales estructuras de orientación NW-SE.



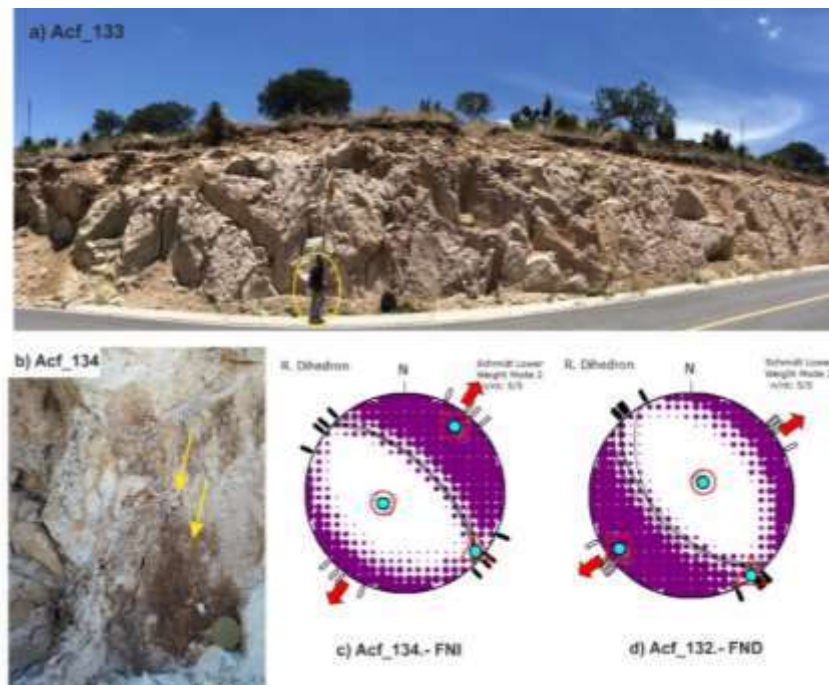
**Figura 28.-** Fallas NE-SW y NW-SE cortando depósitos sedimentarios secuencia Nocoyoco, del lado derecho estereograma de datos de campo estación Acf\_201, modelo 2D y 3D de los planos de falla NW-SE y NE-SW contemporáneos.

Para la extensión NE-SW con fallas NW-SE principales y NE-SW asociadas con el acomodo de la deformación horizontal, los datos de campo indican la presencia de pequeños planos de falla N-S y E-W con desplazamientos laterales izquierdas y derechas respectivamente las cuales representan el 30 % de los datos de campo.

La deformación producto de la extensión NE-SW, fue documentada en el área de estudio (Fig. 32), cortando las secuencias sedimentarias mesozoicas al interior del HCh y unidades volcánicas del Mioceno.

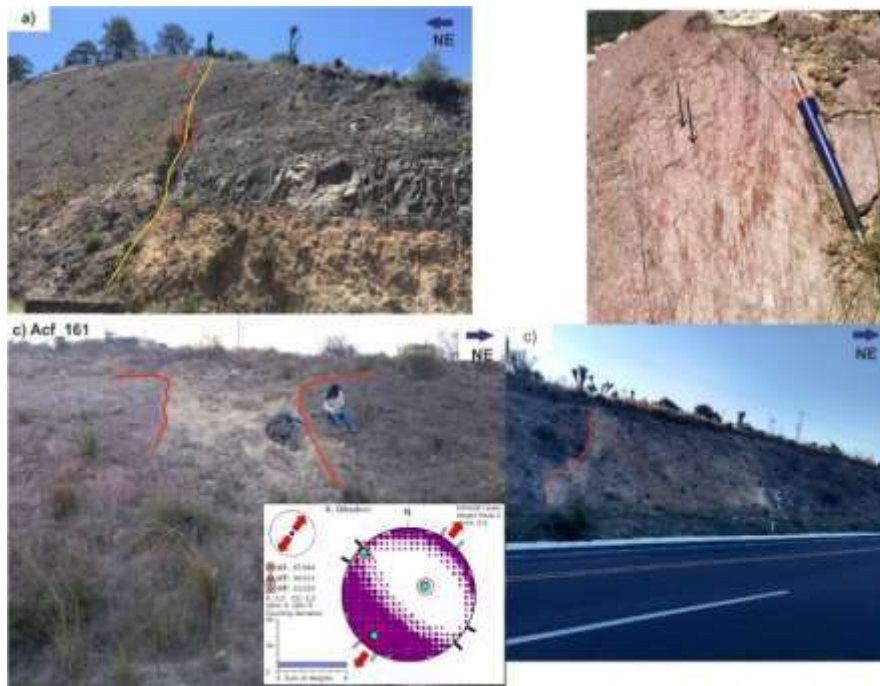
### Falla Tlaxco (FTx)

La falla FTx es una estructura de tendencia NW-SE situada en la porción oeste del área de estudio, la cual presenta una longitud de ~ 70 km, desde la localidad de Apan hasta el norte de la Cuenca Libres Oriental. Morfológicamente se observaron una serie de segmentos de falla con la misma dirección, los cuales corresponden a la misma estructura y representan el límite noroeste de la cuenca Apizaco-Tlaxco (Fig. 29). Al sureste de la localidad de Apan en las estaciones Acf\_132, 133, 134, se identificaron fallas normales posteriormente reactivadas como fallas laterales afectando la Ignimbrita Matamoros. En este segmento la falla presenta un desnivel aparente de 400 m, representando el límite de una estructura semicircular a la cual da lugar este depósito piroclástico. Más al sur, al interior del HCh (estaciones Acf\_126, 127, 129), la FTx corta unidades volcánicas de composición andesítica del Mioceno y muestra un dominio de fallamiento lateral, mientras que al sur del VCG dicha estructura sería paralela a la fisura eruptiva que se encuentra al sureste del mismo, sobre la cual se levantaron cinco estaciones estructurales (Acf\_157, 158, 159, 160, 161, 162). Los planos en esta estructura se caracterizan por ser subverticales, con ángulo de buzamiento de 60° en la Ignimbrita Matamoros y de 70° a 80° en las rocas andesíticas, los cuales buzanan al suroeste, con movimiento preferentemente normal (Fig. 29).



**Figura 29.-** a): Afloramiento de la estación Acf\_133 localizada sobre la Ignimbrita Matamoros (el ovalo de color amarillo indica la escala); b): estrías verticales de movimiento normal característicos de los planos de falla; c) y d): soluciones de campo de esfuerzos para fallas normal con componente lateral izquierda y derecha respectivamente.

El tercer grupo de estaciones fueron ubicados al sureste del VCG, en una sección NE-SW sobre la autopista 140D, la cual corta la fisura eruptiva NNW-SSE emplazada sobre una falla de la misma dirección. En este sitio las fallas se caracterizan por planos subverticales, con inclinación de 60° a 90°, en los cuales se emplazaron diques piroclásticos (en fallas de N 325/85) como el de la figura 30 relacionados con la evolución del VCG. Estas fallas presentan evidencia de desplazamiento vertical, como primera etapa de deformación, y una reactivación como fallas de rumbo.



**Figura 30.-** Fallas NW-SE en las estaciones 159, 160 y 161; a) plano de falla; b) estrías características de fallas NW-SE; c) y d): dique piroclástico emplazado en una falla normal NW-SE situada al sur del Volcán Cerro Grande.

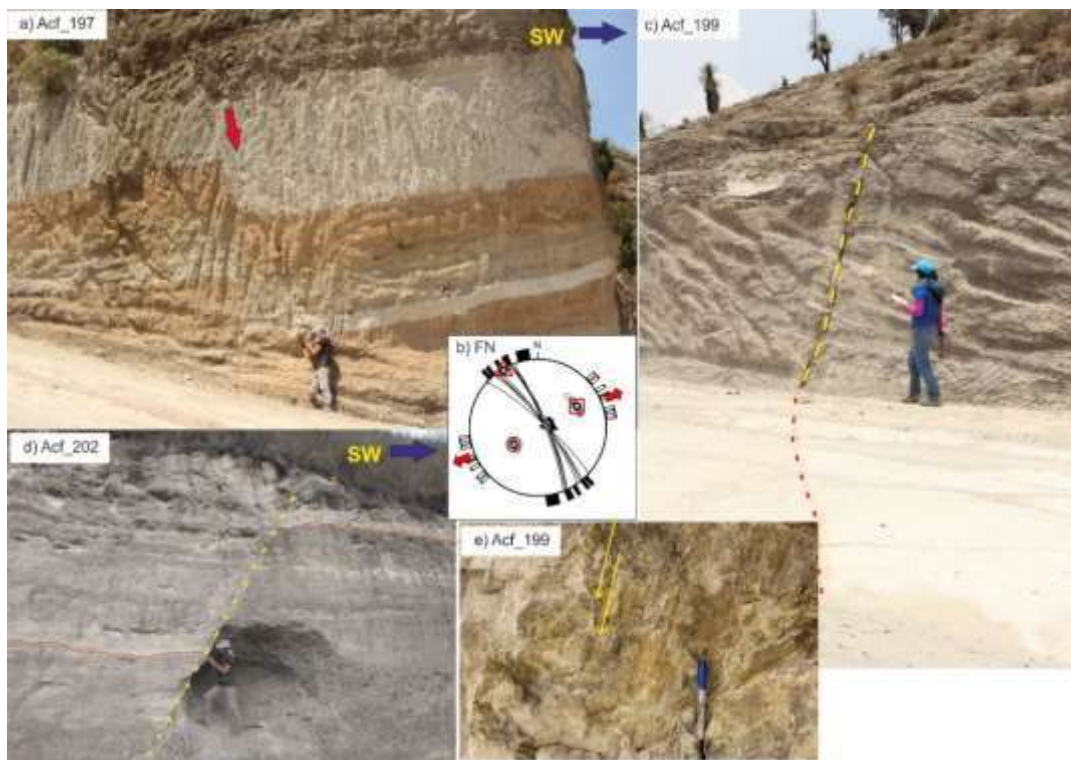
### **Sistema de Fallas Nocayoco**

Fueron observadas en la porción centro del HCh en el límite de las secuencias sedimentarias mesozoicas y volcánicas del Mioceno, al NE del VCG en donde se observó una franja de ~4 km de ancho compuesta por fallas normales de orientación preferencial N330° con buzamiento al suroeste de la falla principal, además de otras pequeñas fallas paralelas que buzaban tanto al suroeste (sintéticas) como al noreste (antitéticas) (Fig. 31). Estas fallas afectan una serie de depósitos vulcanosedimentarios denominados por [Gómez-Tuena et al. \(2000\)](#) como secuencia sedimentaria Nocayoco, los cuales se encuentran basculados entre 3° a 25° al NE, sobre la cual se levantaron las estaciones estructurales Acf\_197, 198, 199, 200 y 201. Aunado a ello en el extremo norte del HCh se observan esta serie de fallas en las proximidades de la localidad de

Aquixtla en la estación Acf\_60; las fallas NW-SE cortan andesitas con las mismas características.

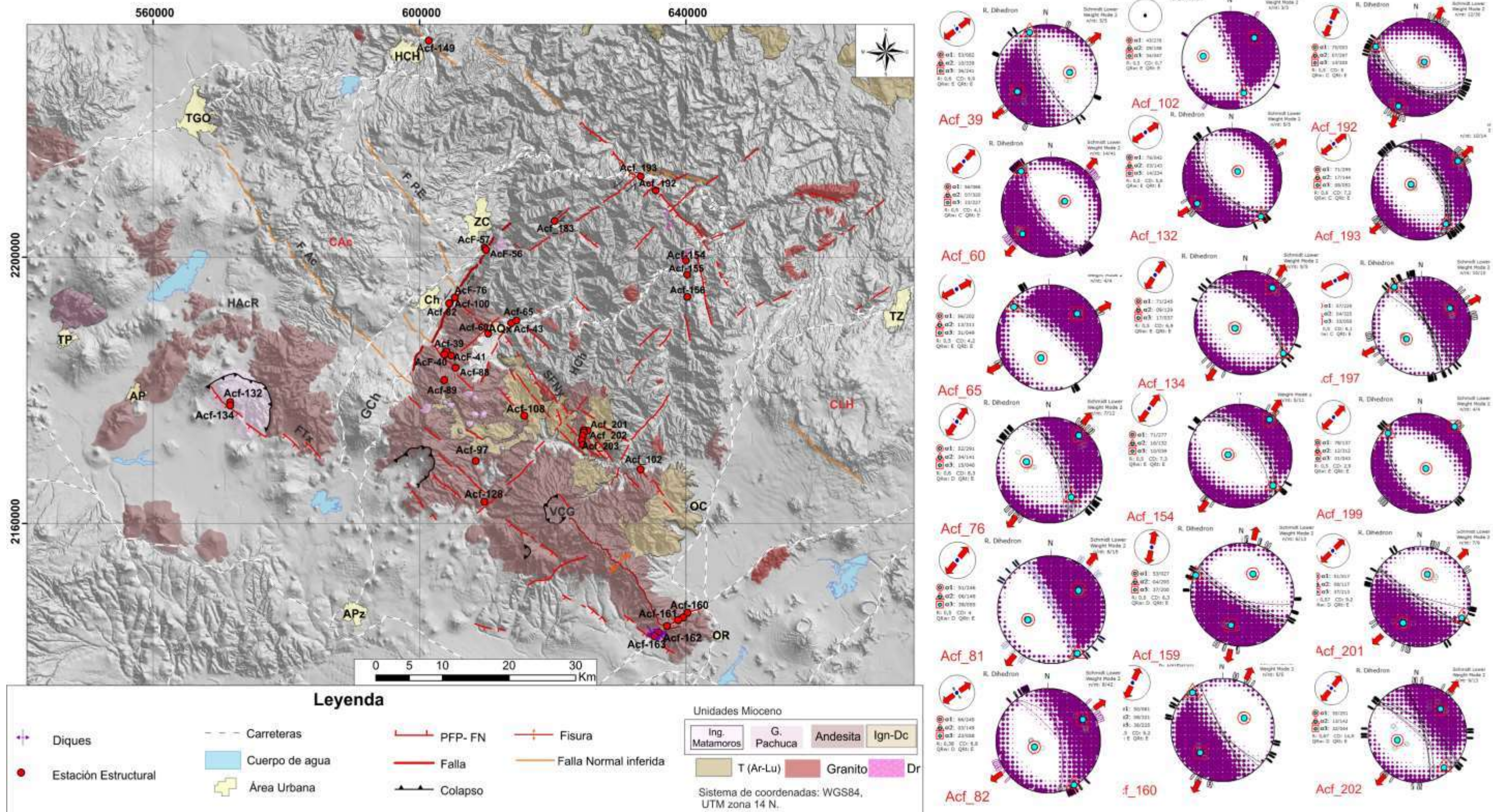
Los planos de falla presentan variaciones en distintos segmentos, siendo en algunos casos subverticales ( $>80^\circ$ ), o bien presentan valores próximos a un plano de falla clásico de acuerdo con el modelo de Anderson ( $60^\circ$ ). La zona de daño también varía entre los distintos planos: mientras que en algunos casos se trata únicamente de la zona de ruptura, en otros el desplazamiento ha sido de hasta 60 cm, con desplazamientos verticales mayores a 20 m, para un solo segmento de falla. Sobre estos mismos planos de falla se observó desplazamiento lateral en planos con estrías de  $3^\circ$  a  $20^\circ$ , por lo cual se trata de un evento de deformación posterior, que reactivó el sistema de fallamiento.

Dado el basculamiento de los estratos, se infiere que la estructura principal es una falla de orientación NW-SE de geometría lístrica, la cual se encuentra buzando al SW, mientras los estratos buzando al NE, dando lugar a un semigraben de dirección NW-SE, el cual fue cubierto por depósitos de la secuencia sedimentaria Nocayoco y cuya morfología no es apreciable actualmente, debido a que las secuencias volcánicas como la Ignimbrita Zaragoza proveniente de la Caldera Los Humeros (CLH) ha rellenado zonas deprimidas



**Figura 31.-** Fallas normales de orientación NW-SE, afectando la secuencia sedimentaria Nocayoco.



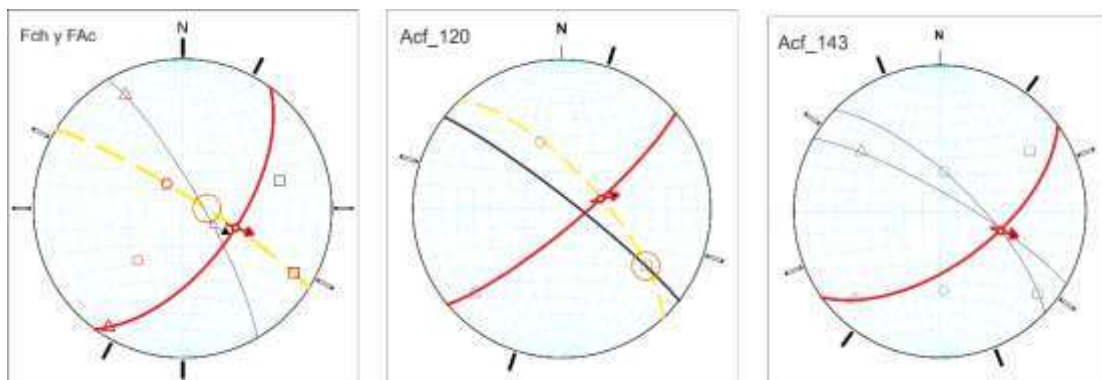


**Figura 32.-** Mapa estructural de la extensión NE-SW del Mioceno, se incluyen las estaciones para esta fase de deformación , así como estereogramas con paleotensor de esfuerzo calculado, además se incluyen las principales vías de comunicación y área urbanas: Chignahuapan (Ch), Zacatlán (Zc), Apizaco (Apz), Apan (Ap), Oriental (OR), Ocotepéc (OC), Teziatlán (Tz), Huachinango (HCH), Aquixtla (Aqx), Tepeapulco (Tp), Tulancingo (TGO); principales estructuras: Caldera Acoculco (CAc), Caldera Los Humeros (CLH), Horst Rosario Acoculco (HRAc), Graben Chignahuapan (GCh), Horst Chignahuapan (HCh). Las estructuras relacionadas entre las que se encuentran fallas normales (en color rojo) NW-SE: Falla Tlaxco (FTx), y el Sistema de Fallas Nocayoco (SFNy); colapsos (en negro); Dique (Color morado); fallas laterales (líneas en rojo), en color naranja se encuentran la Falla Acoculco (FAc) y Falla Piedras Encimadas (FPE), aunado a ello se presentan las unidades de este periodo (leyenda)

### 5.2.3.- Fase 3: Extensión NW-SE

Durante el Plioceno-Holoceno, las fallas NE-SW han dominado la morfología y geometría de las cuencas, siendo la extensión  $N 310^\circ \pm 18^\circ$  (Fig. 40) la que ha caracterizado el estilo de la deformación, sin embargo, una buena parte de esta ha sido acomodada por estructuras NW-SE, como la Falla Acoculco, de cinemática oblicua con componente lateral derecha, así como otras estructuras paralelas a la misma. De forma similar a lo que ocurrió durante el Mioceno, la deformación ha sido acomodada por fallas normales NE-SW, las cuales presentan desplazamientos normales con componente lateral izquierda y han dado lugar a depresiones tectónicas como Tecocomulco y Chignahuapan, sin embargo, de forma similar a la deformación del Mioceno y dado que el arreglo estructural había sido preestablecido, estas fallas han sido limitadas por estructuras reactivadas de dirección NW-SE cuya cinemática dependerá de la geometría y posición respecto a la falla NE-SW asociada. La principal evidencia de esta deformación es el arreglo geométrico, que presentan los sistemas de fallas; debido principalmente a la escala del análisis realizado, los desplazamientos en la horizontal son imperceptibles dado que el valor de este ha sido menor a 200 m.

En la figura 33 se presentan algunos de los diagramas de líneas tangentes elaborados de datos de los sistemas de fallamiento característicos de la extensión NW-SE. En cada uno de ellos se pueden observar las implicaciones del valor de la estría en el plano de falla principal, el plano de falla relacionado con las fallas de orientación NE-SW, en el diagrama que corresponde a las fallas Chignahuapan y Acoculco, así como el de la Acf\_143, la estría de la falla NE-SW es muy próxima a  $90^\circ$ , y la componente normal en la falla NW-SE se espera que sea dominante, mientras que en la estación Acf\_120 se esperan estrías oblicuas, lo cual es consistente con los datos de campo, con excepción de la Acf\_143.

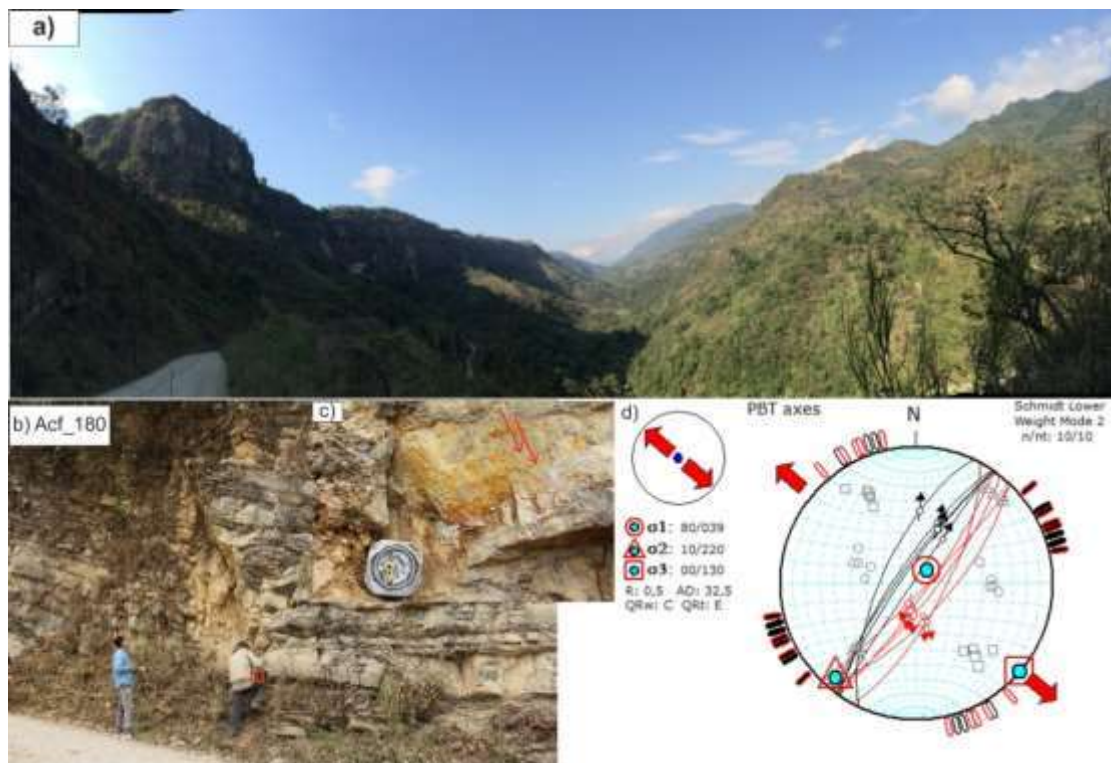


**Figura 33.-** Diagramas de líneas tangentes. En rojo planos de falla principal (Fallas normal con componente lateral izquierda); en amarillo plano tangente que contiene la estría y el polo del plano de falla; y en negro plano de falla NW-SE.

A continuación, se describen las principales fallas de los sistemas NE-SW y NW-SE que mostraron evidencias de desplazamiento en esta fase de deformación, entre las que se encuentran las fallas: Falla Tecuantepec, F. Axaxalpa, F. Chignahuapan, F. Apan del sistema NE-SW y Falla Acoculco (FAC) y Falla Piedras encimadas del sistema NW-SE.

### **Falla Tecuantepec**

La Falla Tecuantepec es una estructura paralela al río del mismo nombre que muestra la mayor dimensión dentro de este grupo de fallas. Su traza se observa al sur de Zacatlán en la porción NE del HCh, la cual presenta una longitud de ~ 20 km. Las estaciones Acf\_180, 181 y 183 se encuentran sobre una estructura sintética a la falla principal cortando a los sedimentos mesozoicos. En estas estaciones se observó un plano subvertical ( $60^{\circ}$ - $89^{\circ}$ ) con dos etapas de movimiento, la primera como fallamiento normal con componente lateral derecha y la segunda con desplazamiento lateral derecha con componente normal, que es evidenciado por relación de corte entre las estrías. La traza de esta falla coincide con la orientación de una meseta basáltica de dirección N  $60^{\circ}$  (Fig. 34), la cual no se encuentra asociada a un aparato volcánico.



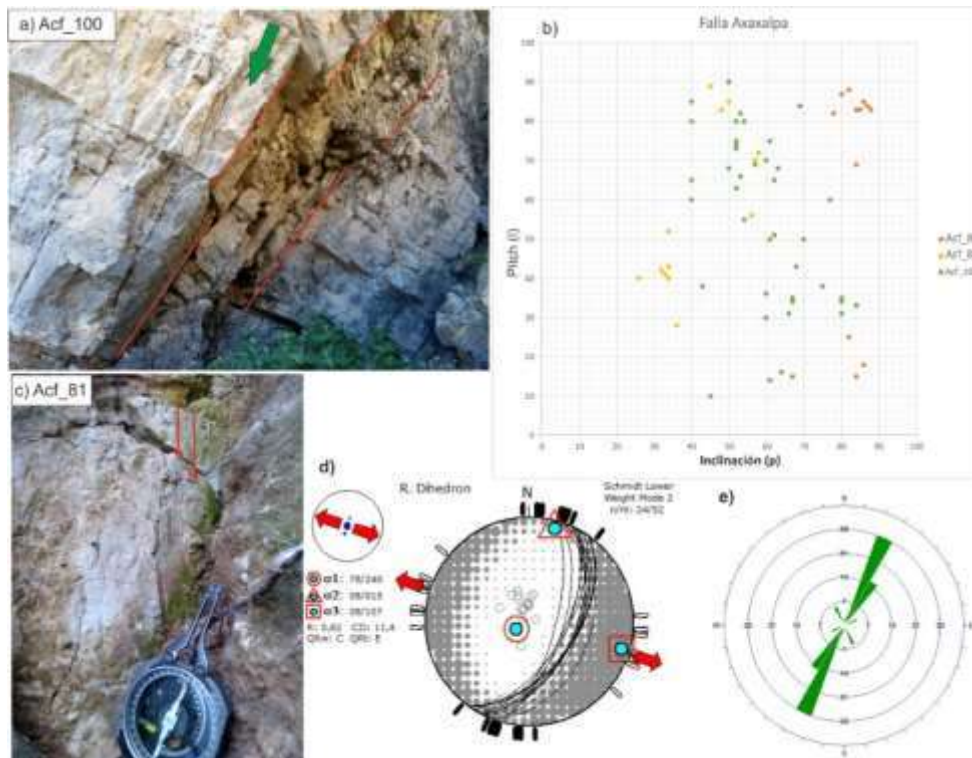
**Figura 34.-** a): vista panorámica de la mesa de basaltos, paralela a la falla N  $60^{\circ}$ ; b): estación Acf\_181 de falla NE-SW cortando calizas cretácicas; c): acercamiento de plano de falla con estrías; d): estereograma de datos de falla con dos etapas de movimiento (en rojo movimiento normal y negro desplazamiento lateral).

### **Falla Axaxalpa (FAX)**



Estructura localizada en la porción centro del área de estudio que tiende paralela al Río Axaxalpa presentando una longitud de ~35 km, dirección preferencial de N30° y buzamiento al noroeste. Los planos medidos en campo muestran inclinaciones de 60°-75° con dos etapas de movimiento. Las estaciones estructurales con las que se cuenta sobre la traza de esta estructura son Acf\_81, Acf\_83 y Acf\_100, sitios donde esta estructura corta unidades sedimentarias del Mesozoico como vulcanismo del Mioceno y del CVAT. La mayor disección del relieve se presenta en la región en la cual afloran las unidades sedimentarias siguiendo el cauce del Río Axaxalpa, en donde el desplazamiento vertical mínimo es de 500 m, mientras que en la porción suroeste de la estructura la diferencia de elevación es de escasos 100 m y al interior de la cuenca Apizaco-Tlaxco se observan lineamientos de drenaje y cuerpos volcánicos con la misma tendencia.

En las estaciones levantadas sobre la traza del Río Axaxalpa (Fig. 35) en las proximidades de la Cd. de Chignahuapan, esta falla muestra una orientación preferencial de N 20° a N 35°, los ángulos de buzamiento varían en cada una de las estaciones, siendo para la Acf\_81 casi verticales (88°-90°), y con mayor inclinación en los sitios Acf\_100 (50°-70°) y Acf\_83 (50°-60°).



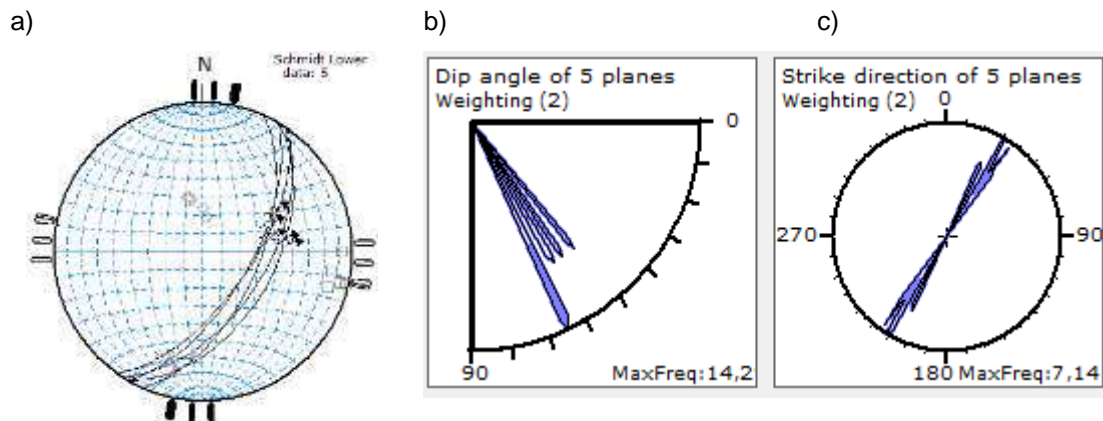
**Figura 35.-** a) Plano de falla Axaxalpa en la estación Acf\_100; b) diagramas con las características de los planos de falla medidos en campo sobre la traza de Falla Axaxalpa en el cual se han graficado la relación pítch vs inclinación, el cual muestra que las mayoría de los datos representan un movimiento vertical se da

en planos con ángulos mayores a  $55^\circ$ ; c) estrías características de la Falla Axaxalpa .en la estación Acf\_81; d): estereograma con planos de falla con los datos de la estación acf\_100.

En la estación Acf\_81 se midió una falla antitética al plano de falla principal que está cortando flujos piroclásticos, mientras que la estación Acf\_83 se trata de un plano sintético a la FAX; ambas estaciones se evidencia un desplazamiento normal. La estación Acf\_100 corta calizas cretácicas, donde el plano principal identificado en campo muestra dos movimientos: el primero como falla de movimiento a rumbo y el segundo con desplazamiento vertical normal.

### Falla Chignahuapan (FCh)

Localizada al sur de la CAC se encuentra limitando el extremo sureste del Horst Rosario Acoculco (HRA) y representa el límite noroeste del GCh. La FCh está conformada por varios segmentos de dirección preferencial de  $N 40^\circ$  que suman una longitud de  $\sim 20$  km con planos de inclinación de  $55^\circ$ - $65^\circ$  buzando al sureste. Sobre la traza de esta estructura se cuenta con 4 estaciones estructurales (Acf\_28, 30, 31, 32): sobre el plano de falla se observa un desnivel de 100 m. Las estaciones Acf\_28 y 30 (Fig. 36) están cortando conos de escoria del CVAT, en la segunda además se observó un dique de dirección  $N 32$  con una inclinación de  $70^\circ$  al SW, paralelo al plano de falla, mientras que las otras dos estaciones se encuentran cortando lavas de la CAC.



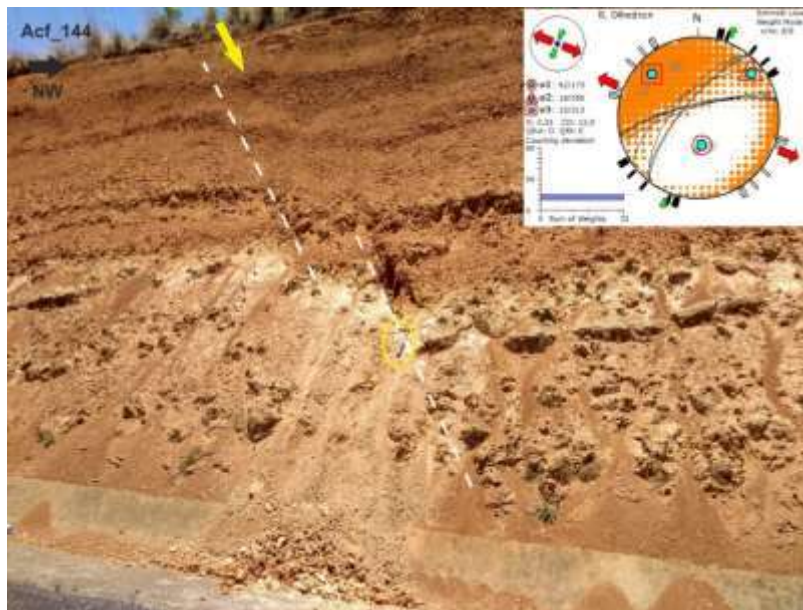
**Figura 36.-** Datos de la estación Acf\_30, los cuales son representativos de la Falla Chignahuapan. a): estereograma de una falla normal con componente lateral izquierda que se encuentran buzando al sureste en la estación Acf\_30; b): diagrama de rosas para el buzamiento de los planos que es entre  $50^\circ$  a  $65^\circ$ , característicos de una falla normal; c): diagrama de rosas de dirección del plano de fallas ( $30^\circ$ - $40^\circ$ ).

### Falla Apan (FAp)



Esta estructura presenta ~70 km de longitud y dirección preferencial de N40°, conformada por varios segmentos menores, localizada al oeste de la zona de estudio, en su extremo sureste se encuentra cortando depósitos del volcán Tlaloc, dando lugar a un escarpe pronunciado al NE de la localidad de Apan donde está afectando lavas andesíticas del Mioceno; mientras que al norte de la CAC, la traza de esta falla se vuelve poco evidente, sin embargo, al noreste de la misma, esta estructura se vuelve clara morfológicamente, y es visible en el modelo digital de elevación (DEM) y mapa de pendientes. En campo se cuenta con dos estaciones en la porción NE de la falla (Acf\_144 y 146), donde se observa que presenta desplazamiento normal, con una ligera componente lateral izquierda; además, representa el límite noroeste del Horst Rosario Acoculco (HRA).

En la estación Acf\_144 (fig. 37) afecta flujos piroclásticos de la secuencia volcánica Acoculco, mientras que en el sitio Acf\_146 cortan lavas basálticas. Los planos de falla se caracterizan por presentar inclinaciones entre 60° y 80°, con estrías de normales a oblicuas.



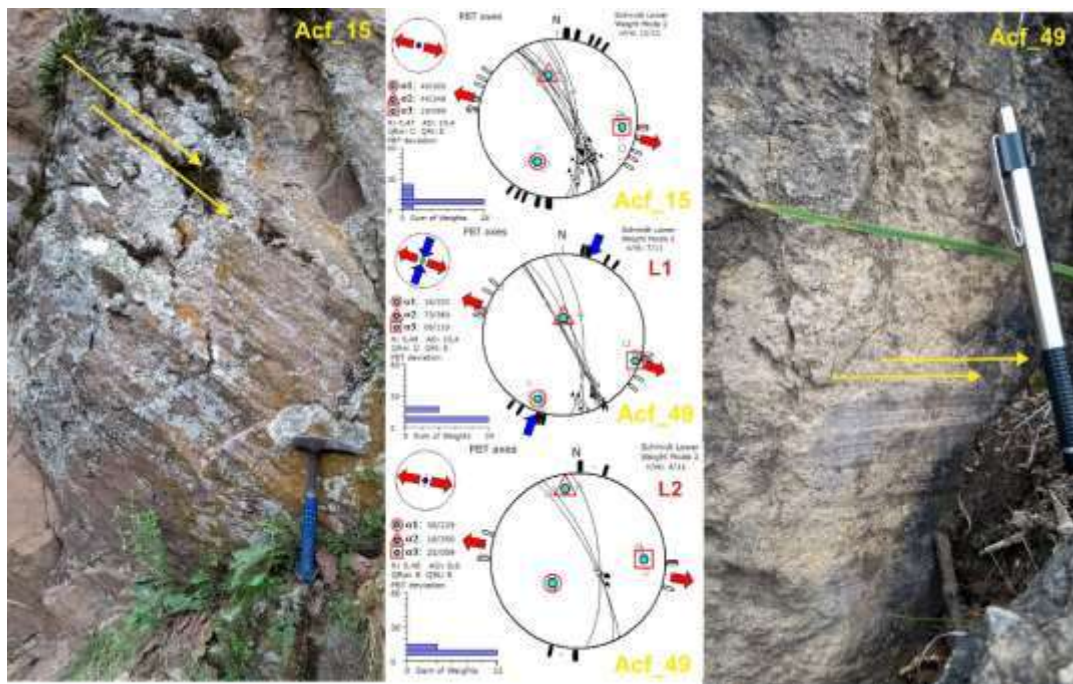
**Figura 37.-** Afloramiento sobre depósitos piroclásticos relacionados a la actividad de la Caldera Acoculco, que fueron cortados por planos de fallas normales NE-SW con buzamiento al NW, en la estación Acf\_144, en la esquina superior derecha se muestra estereograma con planos de falla medidos en campo y solución de esfuerzos calculados con un  $\sigma_3$  NW-SE.

### Falla Acoculco (FAc)



La FAc presenta su mayor expresión al suroeste de la caldera del mismo nombre. Al norte de esta región los patrones de drenaje son paralelos a la misma, suponiendo una posible continuación de la estructura, mientras al sur se adentra al interior del HCh. Sobre la traza de esta falla se levantaron cuatro estaciones estructurales (Acf\_14, 15, 16, 49) al oeste de la CAc. En general presenta geometría en échelon, con dirección preferencial N330° y longitud aproximada de 45 km; la inclinación de los planos medidos en campo presenta un promedio de 75° con buzamiento al noreste.

La geometría de esta falla es la característica de una estructura con componente lateral izquierda, aunque en las estaciones de campo se documentó que el movimiento de la misma ha sido derecho; por estas características podemos decir que se trata de una estructura reactivada que presenta varias fases de deformación. Al interior del HCh, las estructuras de esta orientación muestran desplazamiento normal con componente izquierda, mientras que al oeste de la CAc esta falla presenta estrías oblicuas y laterales derechas (<40°), las cuales son cortadas por estrías subverticales (70°-55°) en el mismo plano de falla (Fig. 38).

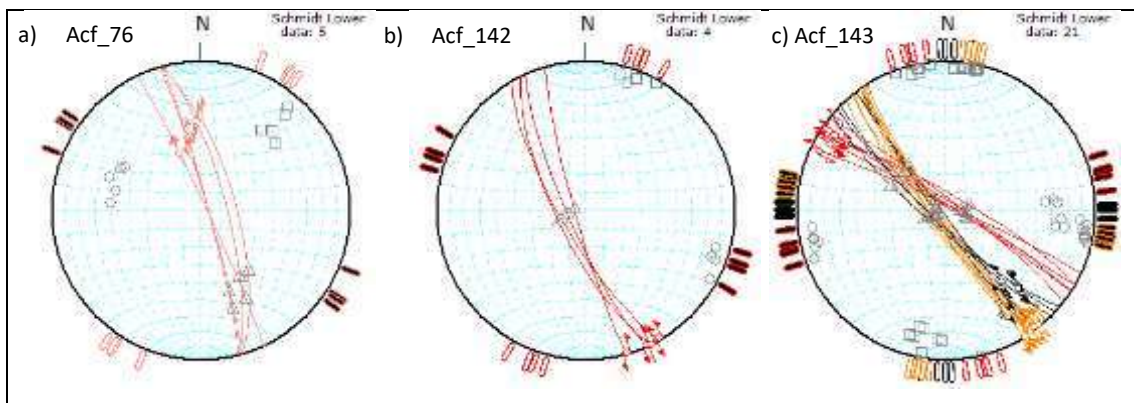


**Figura 38.-** Estrías en plano de fallas Acoculco, Acf\_15 estrías oblicuas y Acf\_49 en donde se presentan tanto estrías oblicuas como horizontales, y diagramas elaborados en wín-tensor con el módulo PBT que permite la visualización de los planos y las estrías para la caracterización de los mismos.

### Falla Piedras Encimadas

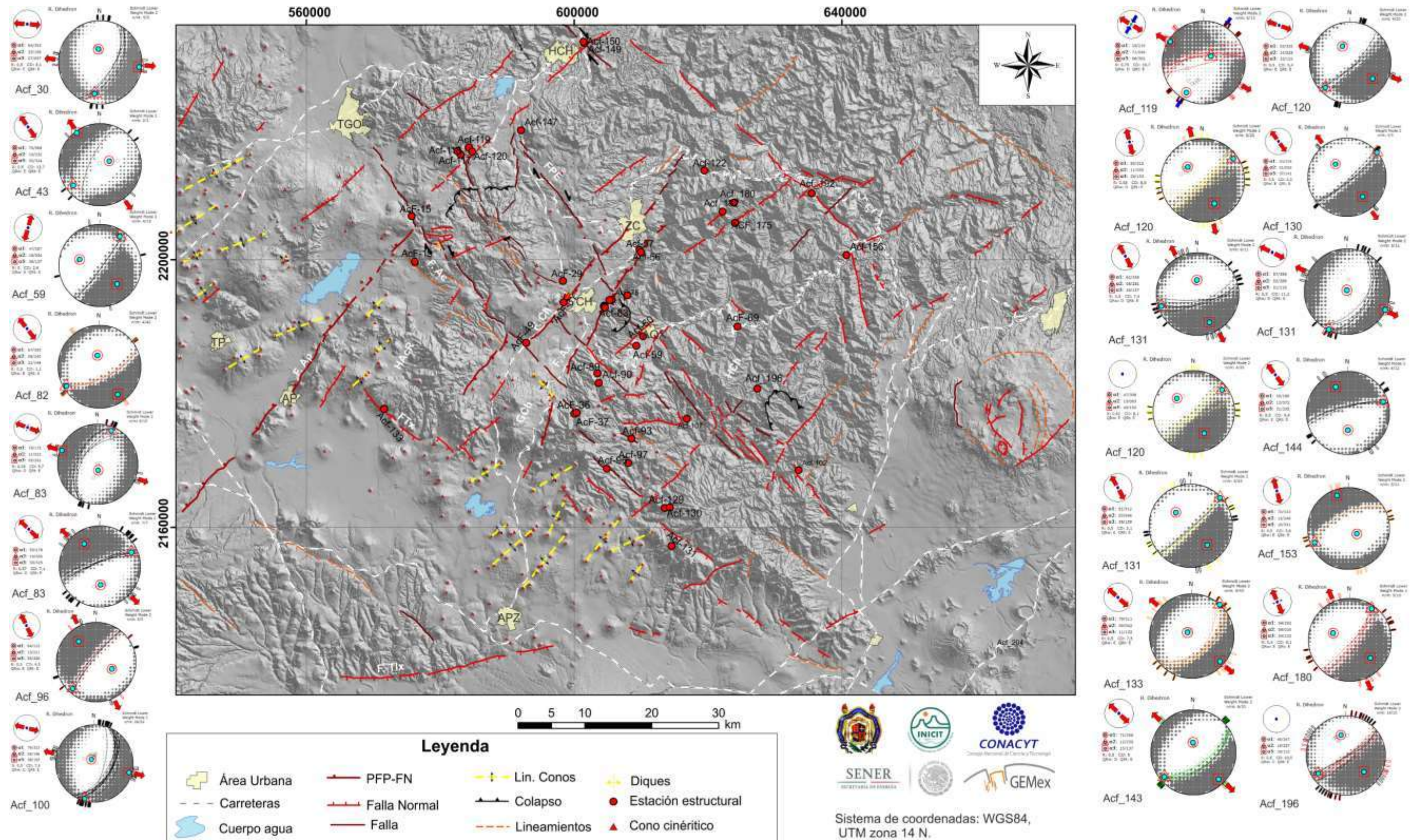


Lineamiento estructural localizado al oriente de la CAc. Esta falla corta una ignimbrita del mismo nombre para la que se reporta una edad de  $1.3 \pm 0.2$  Ma (López-Hernández, 2009). En campo se levantaron dos estaciones estructurales donde se identificaron planos de fallas con dirección variable entre  $N320^\circ$  a  $330^\circ$ , echados subverticales ( $80^\circ$ ) y estrías horizontales (L1:  $1^\circ$ - $10^\circ$  y L2:  $25^\circ$ - $40^\circ$ ), representados en los estereogramas de la figura 39. Su expresión morfológica en las secuencias volcánicas de Acoculco es mínima en términos generales, sin embargo, el sistema de drenaje parece encontrarse desplazado por esta estructura, con valores de  $\sim 190$  m en algunos segmentos, además de que representa un fuerte lineamiento en el modelo de disección vertical (Fig. 12).



**Figura 39.-** Estereogramas de fallas laterales izquierdas, en las estaciones Acf\_76, 142 y 143, a) las líneas en rojo y naranja corresponden a fallas con cinemática lateral izquierda, mientras que las de color negro muestran una componente normal mayor.





**Figura 40.-** Mapa estructural al centro de la imagen, que incluye estructuras de deformación entre las que se encuentran fallas NE-SW: Falla Apan (FAp), Falla Chignahuapan (FCh), Falla Axaxalpa (Fax); y NW-SE: Falla Acozulco (FAc) y Falla Tlaxco (FTx), estaciones estructurales (puntos en color rojo); lineamiento volcánicos (líneas punteadas en color amarillo), dique (amarillo) y colapsos (en color negro), los yacimientos geotérmicos: Caldera Acozulco (CAc) y Caldera Los Humeros; las principales vías de comunicación y áreas urbanas: Chignahuapan (Ch), Zacatlán (Zc), Apizaco (Apz), Apan (Ap), Tepeapulco (Tp), Oriental (OR), Ocoatepec (OC), Teziutlán (Tz), Tulancingo (TGO), Huachinango (HCH), Aquixtla (Aqx)

#### 5.2.4.- Análisis y caracterización de fracturamiento

El área de estudio es un sector fuertemente fallado y fracturado, por lo cual en este apartado se analizaron los sistemas de fracturamiento con el análisis a detalle de las fracturas contenidas en las unidades sedimentarias con el objetivo de caracterizar el fracturamiento, tanto geométrica como temporalmente de acuerdo a su génesis, además de separar aquel producto de la deformación plicativa de las fracturas neoformadas ya que son las de interés en geotermia, para lo cual se levantaron seis estaciones estructurales (Acf\_163, 167, 168, 171, 175, 181) en donde se obtuvieron 179 datos de fracturas rellenas por calcita y 176 de fracturas abiertas. Las fracturas cerradas presentaron direcciones preferenciales NE-SW; NNW-SSE y NNE-SSW, mientras que las fracturas abiertas se caracterizaron por una orientación preferencial NE-SW y en menor proporción fracturas NW-SE. Además, de estos datos de fracturamiento se analizó el fracturamiento en los conos cineríticos, debido a que representan la deformación más reciente, con la finalidad de compararlas con las fracturas abiertas.

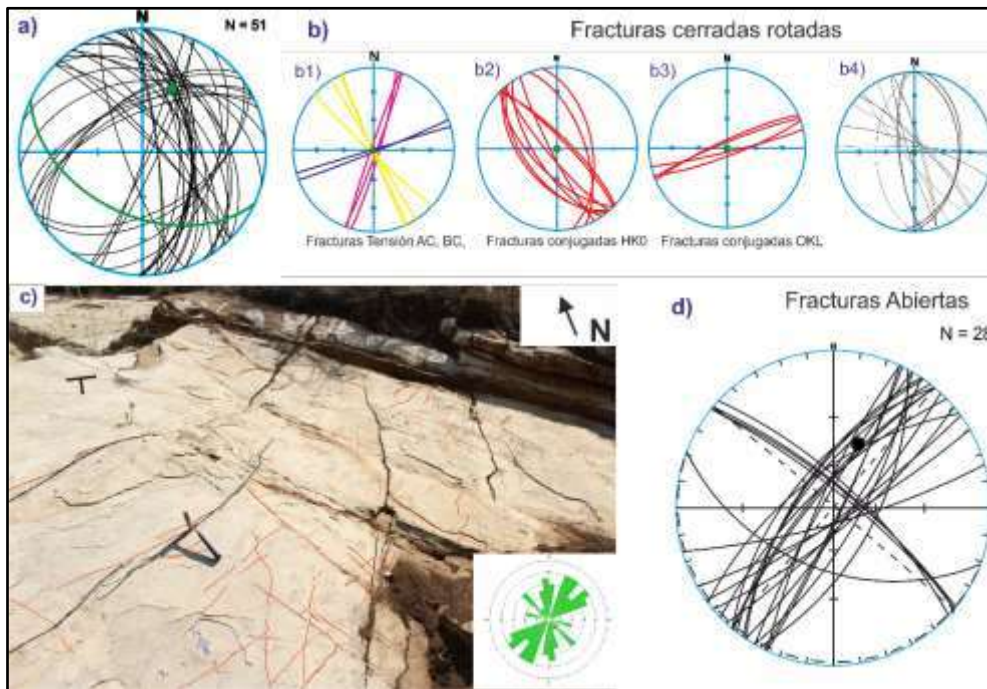
Para la clasificación de las fracturas en relación al sistema plegado se consideró el modelo de Hancock (1985), en el cual se contempla un sistema de ejes a, b, c, siendo "a" paralelo a la dirección de la capa, "b" paralelo al buzamiento de la capa y "c" perpendicular a los anteriores (Fig. 9 y 10).

En la estación Acf\_163, las fracturas fueron tomadas sobre plano  $S_0 = N 111/47$  (regla de la mano derecha), en donde se observaron tres direcciones de fracturas NE-SW (con dos subgrupos  $N20^{\circ}-40^{\circ}$  y  $N50^{\circ}-70^{\circ}$ ), NNW, y en menor proporción NW-SE. En esta estación se observaron fracturas de tensión AC paralelas al valor  $\sigma_1 = 24^{\circ}$ , así como fracturas BC, además de un set de fracturas conjugadas HKO respecto al eje "a", así como OKL, las cuales fueron generadas durante la deformación compresiva. Las fracturas abiertas de direcciones NE-SW y en menor proporción NW-SE fueron caracterizadas por planos subverticales con buzamiento al SE y NW (Fig. 41), además de ser estructuras ortogonales al eje "a" que cortan y desplazan (de mm a varios cm) las fracturas mineralizadas.

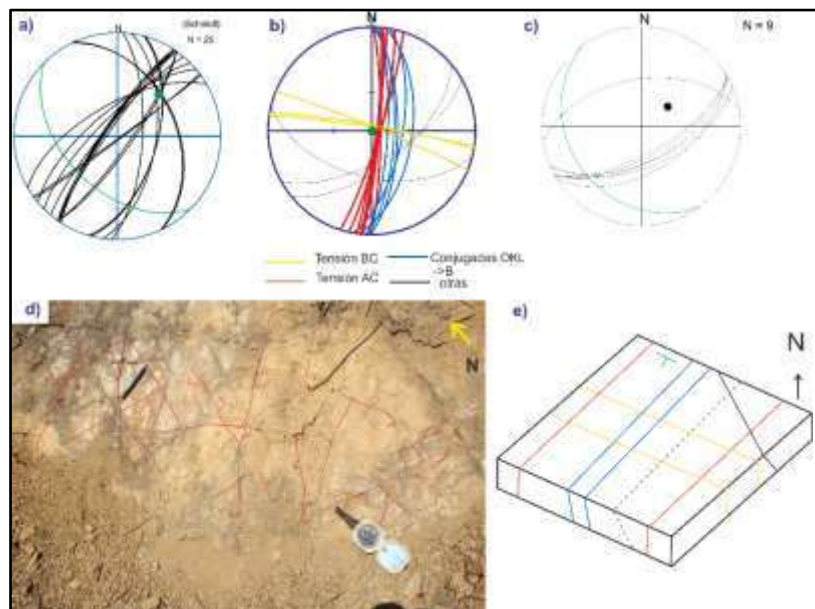
En la estación Acf\_167 (plano  $S_0 = N134-30$ ) realizada sobre una secuencia de Areniscas-Lutitas de tonos verdes, el plano se caracterizó por muy pocas intersecciones de las fracturas, en donde se midieron 18 fracturas cerradas con aperturas de 1 a 2 mm, y 7 fracturas abiertas  $\sim N 60$  con apertura promedio de 2 mm las fracturas cerradas se clasificaron como de tipo AC, de dirección NE-SW con un ángulo de  $90^{\circ}$  respecto al buzamiento de las capas, y BC paralelas a la dirección de la capa y perpendicular a su



buzamiento, además, se identificó un set de fracturas conjugadas HKO respecto al ángulo “c” con un ángulo menor a 60° entre ellas, todo ello expuesto en la figura 42.



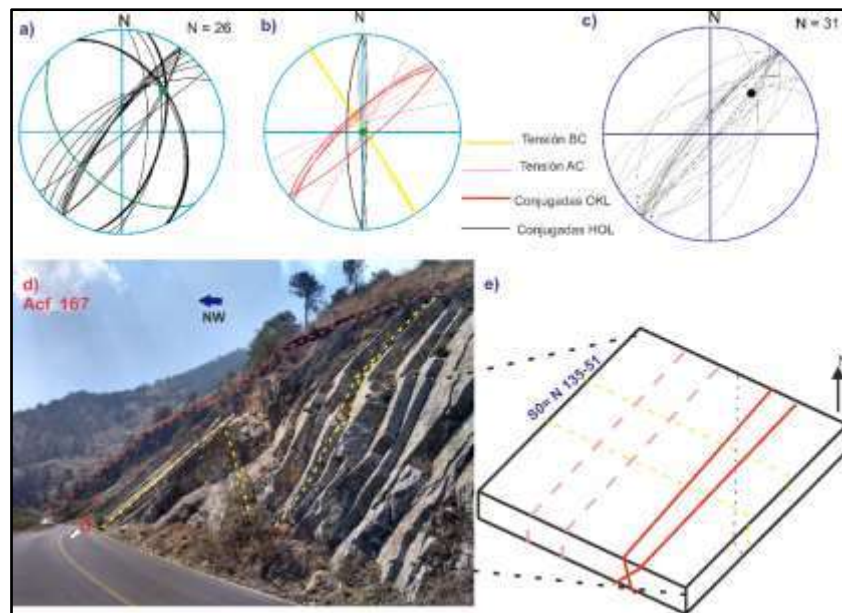
**Figura 41.-** Datos de fracturas en la estación Acf\_163; a): estereograma de fracturas cerradas; b1) a b4) fracturas cerradas rotadas (plano S0 en la horizontal) y clasificación de fracturas: b1) rosa mexicano fracturas de tensión AC, amarillo fracturas de tensión BC las cuales son paralelas a la dirección del pavimento; b2) fracturas conjugadas HKO respecto al ángulo “b”.



**Figura 42.-** a): fracturas cerradas NNE y NE-SW (líneas color negro) y relación con plano S<sub>0</sub> (línea color verde); b): fracturas cerradas después de ser rotadas, fracturas de tensión BC (líneas color amarillo), fracturas tensión AC (líneas de color rojo), set de fracturas conjugadas OKL respecto al ángulo C (líneas

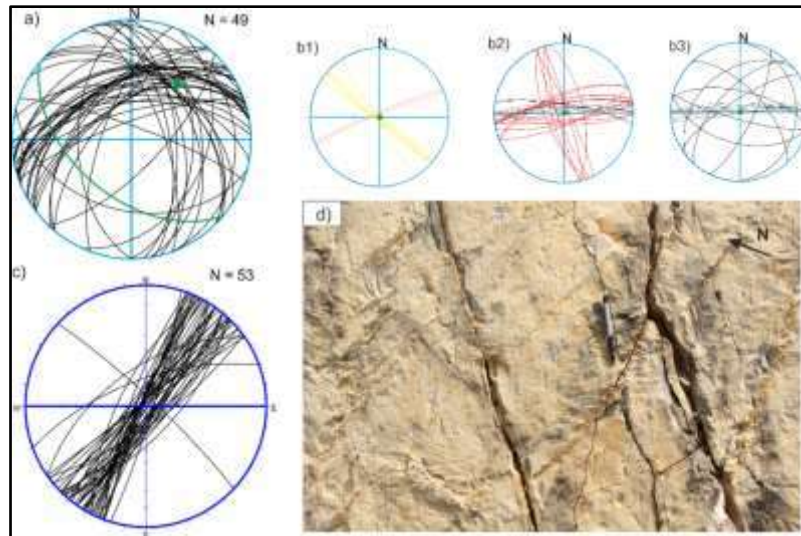
color de color azul), y fracturas que no muestran relación con el sistema de plegamiento (líneas color negro); c): fracturas abiertas de dirección preferencial NE-SW medidas en el afloramiento; d): fotografía de afloramiento, la flecha en amarillo indica el norte, y en rojo se han remarcado las fracturas; e): bloque idealizado de los sets de fracturas cerradas de tensión BC (líneas amarillas), fracturas AC (líneas color rojo), fracturas OKL -> C (líneas color azul), y.

La estación Acf\_168 se realizó sobre un plano de estratificación medido sobre calizas cretácicas (Fm. Tamaulipas) donde se recabaron datos de corrimientos capa-capa, ejes de pliegue y charnelas para los que se obtuvo un valor de  $\sigma_1 = N 31^\circ$ , el cual resultó ser paralelo a las fracturas de tensión BC y sistema de fracturas conjugadas OKL en el ángulo "c"; ortogonalmente se observaron fracturas de tensión BC y fracturas OKL. Adicionalmente se midieron datos de fracturas abiertas de orientación NE-SW (Fig. 43), con aperturas de 0.1, 0.2, 0.3 hasta 0.5 cm y distintos ángulos de buzamiento, algunos de los cuales retoman los planos de fracturas OKL.



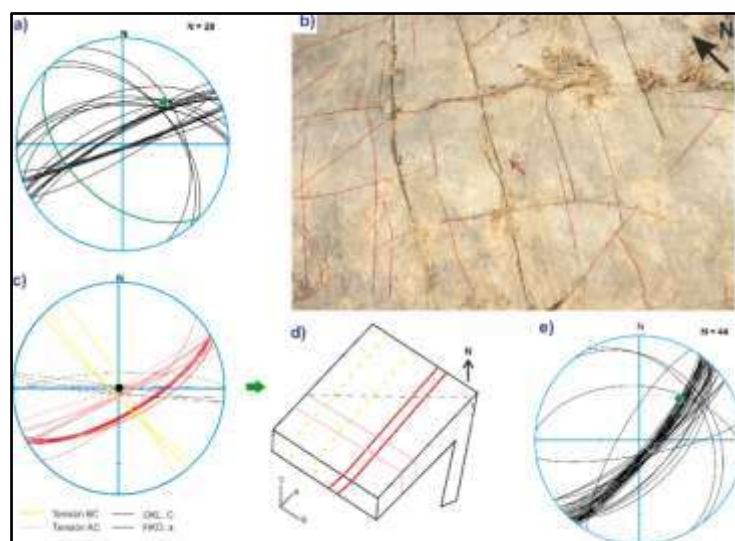
**Figura 43.-** a): Estereograma con fracturas cerradas de dirección NE-SW, NNE y NNW; plano  $S_0$  (líneas color verde) y su polo respectivo (circulo verde); b): fracturas de tensión AC (líneas color rosa) y fracturas de tensión BC (líneas color amarillo), sistema de fracturas conjugada OKL respecto a "c" en color rojo y en negro fracturas HKL; c): fracturas abiertas de dirección NE-SW y cálculo de esfuerzos para esta estación; d): afloramiento y localización de plano de estratificación sobre el cual se tomaron datos de fracturas e): vista ideal de sistemas de fracturas con la misma leyenda de colores de inciso b).

En la estación Acf\_171 se realizó sobre un plano de estratificación ( $S_0$ )  $N 130^\circ/50^\circ$ , se calculó el valor de  $\sigma_1 = N41^\circ$  observándose fracturas de tensión AC paralelas a este valor, mientras que la fracturas BC son paralelas a la dirección del eje de pliegue, cizalla OKL respecto a "c" y HOL respecto a "c" (Fig. 44).



**Figura 44.-** fracturamiento en estación Acf\_171, a) fracturas cerradas; b1, b2 y b3: fracturas cerradas tras ser rotadas, clasificadas de acuerdo con el modelo de Hancock, (1985); fracturas de tensión BC (en color amarillo), fracturas tensión AC (líneas de color rosa); b2) fracturas de cizalla OKL “c” (color rojo de orientación ENE), HOL “c” (rojo NNW-SSE) y b3) otras no clasificadas; c) fracturas abiertas; d) fotografía con fracturas NE-SW abiertas, características de la estación.

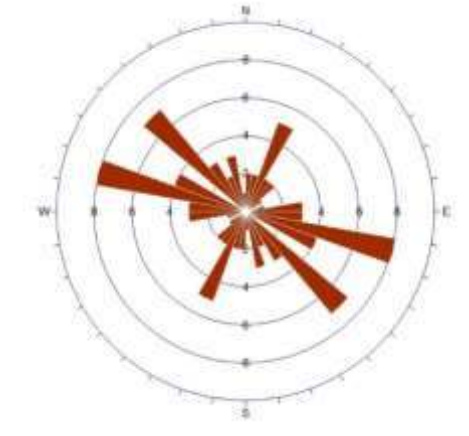
La estación Acf\_175 se observaron fracturas de tensión AC y BC, además de sistema de fracturas conjugado OKL respecto al eje c (Fig. 45b), mientras en la figura 45d, se muestran un modelo 3D de los sistemas de fracturas cerradas empleando la leyenda de colores de la figura 45 b, mientras que en la figura 45c muestra una fotografía en la cual se pueden observar los distintos sets de fracturamiento. Además, las fracturas abiertas presentan dirección preferencial NE-SW, con planos subverticales, y en menor medida fracturas NW-SE subhorizontales (Fig. 45 e).



**Figura 45.-** Características de fracturamiento en Acf\_175, a) estereograma de fracturas cerradas, la línea y el punto verde representan los valores S0; b) imagen de pavimento fracturado en rojo fracturas cerradas

y en negro fracturas abiertas c) fracturas cerradas después de ser rotadas, en color amarillo fracturas de tensión BC, en rosa fracturas de tensión AC, en rojo fracturas OKL respecto al ángulo  $c$ ; d) modelo de fracturas (misma leyenda que en c); e) fracturas abiertas de la estación.

Fracturas en conos cineríticos (Fig. 46), presentan orientaciones preferenciales NW-SE y menor proporción NE-SW, se contemplaron 49 datos de fallas y fracturas relacionadas con los sistemas de fallas regionales obtenidas en afloramientos sobre conos cineríticos.



**Figura 46.-** Diagrama de rosas de fracturas en conos cineríticos del Campo monogenético Apan-Tezontepec.

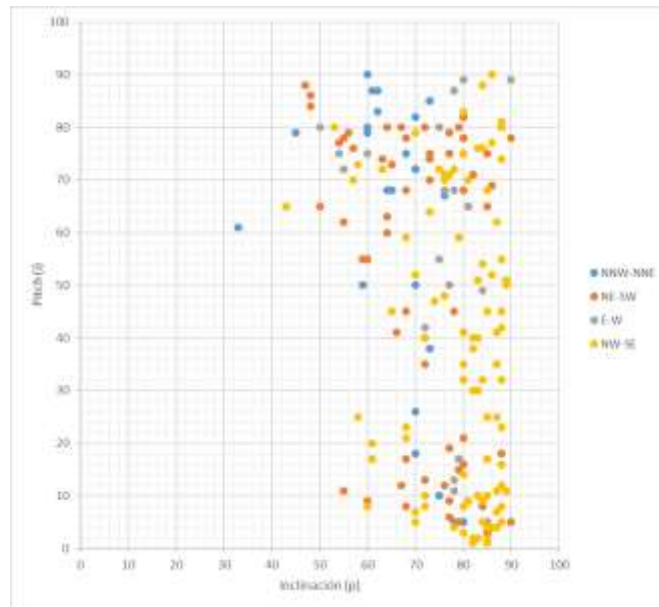
Las fracturas relacionadas con la deformación plicativa en las secuencias sedimentarias Mesozoicas, muestran evidencias de reapertura, siendo la orientación preferencial NE-SW (la misma que las fallas normales del sistema regional Apan-Tlaloc) y en menor proporción NW-SE (como las fallas de transferencia).

#### 5.2.5.- Deformación Caldera Acoculco

Al interior de la caldera Acoculco (CAc) se presentan al menos dos tipos distintos de estructuras, relacionadas a génesis diferente: fallas y fracturas relacionadas con la deformación syn caldera como el colapso caldérico, cuya mayor evidencia se localiza en la porción norte en forma de colapsos con geometría semicircular, así como fallas ~E-W y los procesos volcánicos de resurgencia, además se encuentran presentes las trazas de fallas regionales de los sistemas NE-SW y NW-SE, las cuales presentan las mismas características que fuera de dicha estructura.

Se levantaron 18 estaciones al interior de la CAc, que incluyen 228 datos de falla, entre las que se encuentran: falla NW-SE y NE-SW y en menor proporción planos N-S y E-W (Fig. 50 a). En la figura 47 se observan la relación de inclinación/Píth para los distintos grupos de fallas al interior de la CAc: las fallas NW-SE presentan planos subverticales a verticales, así como estrías con tres tipos de movimientos laterales, oblicuas y de

movimiento normal; además las fallas NE-SW, se caracterizan por planos subverticales y estrías que describen desplazamiento lateral y normal como segundo evento (Relación de corte de estrías).



**Figura 47.-** Características de planos de falla al interior de la caldera Acozulco; a) relación pitch/inclinación.

### **Deformación Pre-caldera**

De acuerdo con lo establecido en el apartado V.2 y dado que la actividad inicial de la Caldera Acozulco fue establecida en 2,6 Ma, por [Avellán et al. \(2018; 2019\)](#); antes de la misma estaban presentes en la zona de estudio fallas NW-SE y NE-SW, y los pliegues producto de la orogenia Laramide, sin embargo, las mismas fueron cubiertas por depósitos volcánicos y sedimentarios recientes, por lo cual su cinemática únicamente ha sido documentada fuera de la Caldera (expuesto en el apartado V.2.1 y V.2.2).

### **Deformación Syn-caldera**

En este periodo tuvieron lugar los colapsos caldericos al norte de la CAc, influenciados por fallas NE-SW (Falla Apan), y cortado por fallas normales subverticales de orientación NW-SE a NNW-SSE, ejemplo de ello la estación Acf\_114 (Fig. 50 c). Además, [Avellán et al. \(2018, 2019\)](#) señalaron la presencia de depósitos de syn-caldera sobre la traza de la FAC. en este mismo sentido se observaron fallas ~E-W, con una longitud de alrededor de 2 km, y planos con un buzamiento de 60° al interior de la CAc (Fig. 48).



Figura 48.- planos de falla característicos; a) Acf\_137, fallas normales E-W, al interior de la caldera Ac; b) falla NNE-SSW en estación Acf\_135.

### Deformación post-Caldera

Al interior de la Caldera Acoculco (CAC), las fallas regionales de orientación NE-SW y NW-SE presentan el mismo patrón de comportamiento que fuera de la CAC. En la porción centro (en las proximidades de los pozos geotérmicos) de esta estructura es disectada por fallas de los dos sistemas regionales: una estructura de tendencia ~E-W ( $N 70^\circ$ ), normal cuya expresión morfológica y datos de campo indica que buza hacia el norte, así como la presencia de una falla de dirección preferencial ENE-WSW la cual se ubica entre los dos pozos geotérmicos perforados por CFE, cuyo plano es subvertical y buza al noroeste.

Estas estructuras presentan movimientos recientes, lo cual es evidenciado en los sedimentos lacustres ubicados en la vecindad del pozo EAc\_01, que muestran evidencias de deformación (Fig. 49), con la formación de sismitas, entre las que destacan diques de arena y otras fracturas.

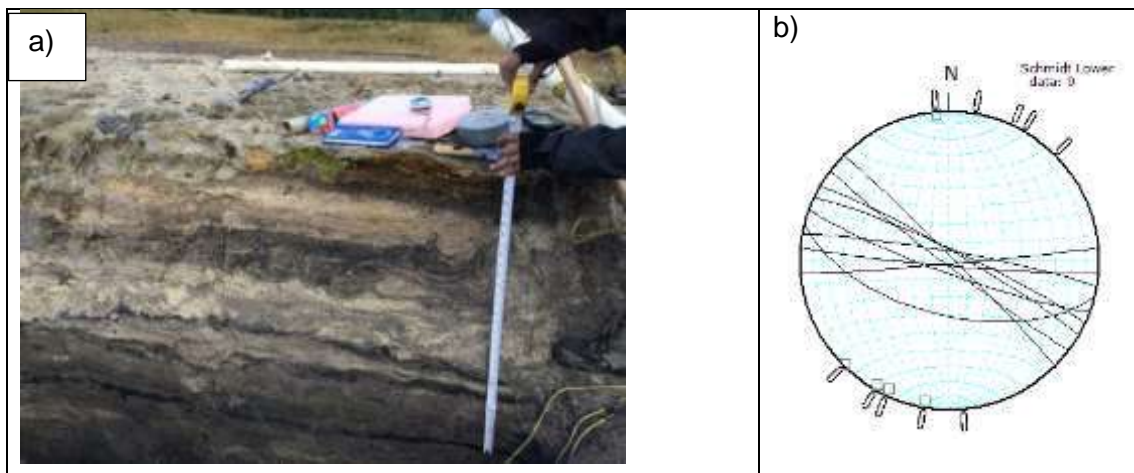
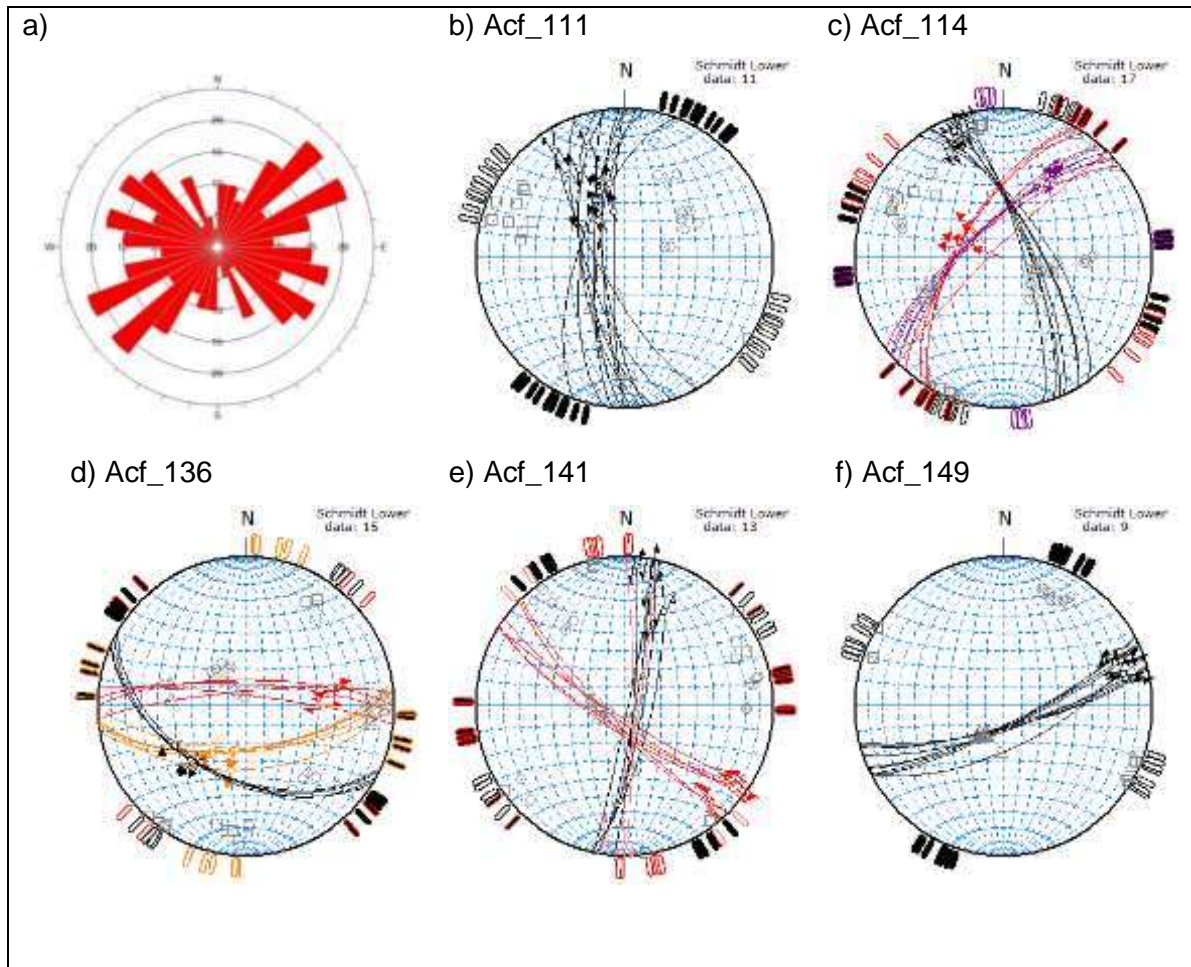


Figura 49.- a) Sedimentos del plioceno deformados en las proximidades del pozo EAc\_01, al interior de la Caldera Acoculco; b) estereograma de fracturas en los sedimentos.





**Figura 50.-** Diagramas de datos estructurales recabados al interior de la caldera Acoculco; a): diagrama de rosas de fallas al interior de la caldera, las figuras b, c, d, e y representan estaciones estructurales donde se puede ver los distintos planos de falla y su cinemática.

## CAPÍTULO VI. - DISCUSIÓN

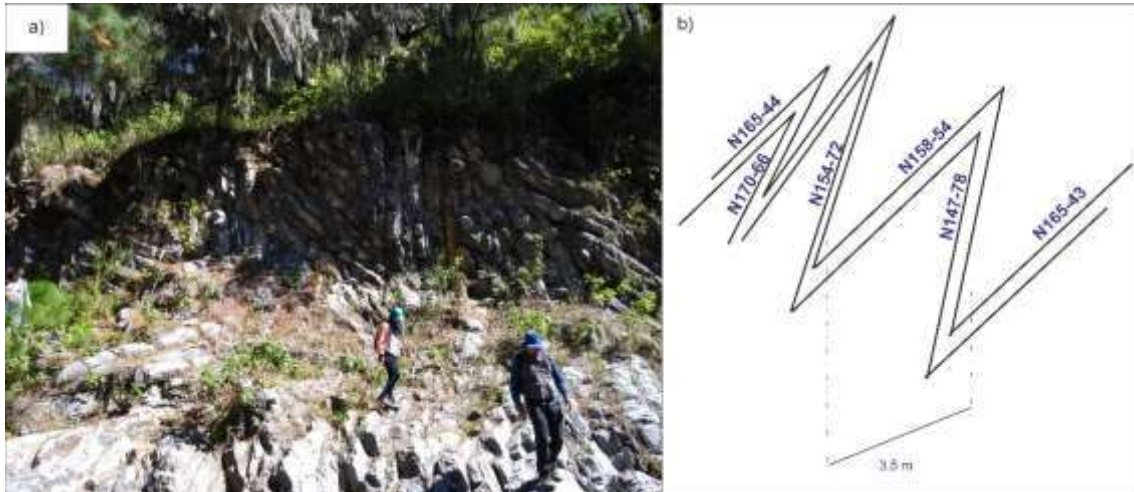
### VI.1.- Evolución del campo de esfuerzos

El área de estudio se caracteriza por la presencia de múltiples estructuras producto de la deformación, las cuales afectan las diferentes unidades. Se han podido identificar al menos tres tensores de esfuerzos, las cuales han dado lugar a las distintas estructuras, como lo son fallas NW-SE, NE-SW y en menor proporción N-S y E-W. En la figura 53 se incluye una columna estratigráfica, relacionada con las tres etapas de deformación descritas, así como las estructuras principales a las cuales da lugar.

#### i) Compresión NE-SW

El basamento sedimentario se encuentra plegado y fracturado por el evento orogénico Laramide (Cretácico superior-Paleógeno) caracterizado por un  $\sigma_1 = N41^\circ \pm 13$ , que dio lugar a pliegues de orientación NW-SE a NNW-SSE, los cuales en la porción entre

Chignahuapan y Zacatlán son de escala de metros a centenares de metros tipo chevron acostados con vergencia al SW, con un acortamiento >50% (acf\_169 del 50% y Acf\_178 del 61%) similar a lo reportado por los trabajos de [Fitz-Díaz et al. \(2012; 2014\)](#) que indican la presencia de un acortamiento de entre un 55 y 65% (Fig. 51) en las rocas de la SMOr depositadas al norte y noroeste del HCh y lo estimado para pliegues de geometría chevron por [Twiss y Moores \(1973\)](#); mientras que al NE del HCh los pliegues son abiertos y de escala kilométrica con acortamiento menor hacia el NE.



**Figura 51.-** a) Pliegues chevron característicos de la deformación Laramide (Acf\_70); b) cálculo de acortamiento en la estación Acf\_178.

La deformación plicativa, además de dar lugar al plegamiento de las unidades mesozoicas, dio lugar a distintos grupos de fracturas relacionadas con la misma (Fig. 52), entre las que se encuentran fracturas de tensión AB paralelas al vector  $\sigma_1$ , fracturas de tensión BC paralelas a los ejes de pliegue, así como fracturas de cizalla OKL, las cuales en su mayoría presentan mineralización.



**Figura 52.-** Fracturas (en color naranja) características producto de deformación plicativa en unidades sedimentarias Mesozoicas.

## ii) Extensión NE-SW

Durante el Mioceno medio-superior, el tensor de esfuerzos se caracterizó por un  $\sigma_3$  de  $N43^\circ \pm 10^\circ$ , calculado a partir de los datos de campo en las estaciones estructurales donde los planos de falla cortan unidades Miocénicas y Mesozoicas, lo cual se considera como la respuesta a que durante el Mioceno medio la dirección del movimiento de la placa de Cocos cambió hacia el noroeste, dando lugar a que gran parte del norte y centro de México se viera sometido a extensión este-noroeste (Henry y Aranda, 1992) así como a un sistema compresivo y a la deformación de la Cuenca de Veracruz (Jacobo et al., 1992; Prost y Aranda, 2001), la cual estuvo caracterizada por pliegues de crecimiento y pliegues de empuje con geometría en échelon (Aranda-García, 1999).

Las estructuras a las cuales dio lugar esta etapa de extensión NE-SW son fallas normales, fisuras eruptivas y diques de orientación NW-SE, las cuales están cortando a las secuencias sedimentarias mesozoicas y al vulcanismo del Mioceno, como en el Volcan Cerro Grande (VCG), donde Gómez-Tuena et al. (2000) habían mencionado la presencia de fallas NNW-SSE en las inmediaciones del VCG, mientras que Gómez-Alvarez (2019) señaló la presencia de esta fase de extensión, dado que estas estructuras sirvieron para el emplazamiento de estratovolcanes alineados NW-SE (Fig. 32). Además de las fallas normales principales, de orientación NW-SE, en la porción oeste del Horst Chignahuapan y sobre las unidades volcánicas del Mioceno, contemporáneamente se presentaron fallas NE-SW con desplazamiento normal y componente lateral (derecho e izquierdo). Las estructuras NE-SW acomodaron la deformación en la vertical generada por las fallas principales NW-SE, dando lugar a un sistema de fallas de transferencia, cuyo desplazamiento en la horizontal no supera los 200 m, que solo ha sido posible caracterizar al interior del HCh. El sistema de Fallas Nocayoco, de dirección NW-SE, representa un claro ejemplo de la cinemática de este tren estructural, así como la relación con planos NE-SW durante el Mioceno. Localizado en la porción centro del HCh, las cuales presentan geometría lítrica y que dieron lugar al basculamiento de las unidades miocénicas, en las secuencias sedimentarias Nocoyoco, a 2600 m.s.n.m. los planos presentan buzamientos de  $\sim 85^\circ$  en la estación Acf\_197 mientras que a 2350 m.s.n.m. son de  $60^\circ$  a  $65^\circ$  en la estación Acf\_202.

## iii) Extensión NW-SE

La deformación Plioceno-Pleistoceno ha sido tema de diversas investigaciones. El área de estudio se ha caracterizado por una extensión  $N310^\circ \pm 18^\circ$ , valor que coincide con el reportado por García-Palomo et al. (2018), lo cual ha dado lugar a que las fallas normales de orientación NE-SW sean las que acomoden la mayor parte de la



deformación, entre las que se encuentran las FAX, FCh, FAp y F. Texcoco, descritas por [García-Palomo et al. \(2002, 2018\)](#) como un tren estructural de orientación entre N20° y N40°, que al interior del HCh presentan orientación preferencial N60°. Mientras que en el sector de la caldera Los Humeros esta fase también ha sido caracterizada por [Norini et al. \(2015, 2019\)](#) y diversos trabajos de geólogos de la CFE, la cual ha controlado la distribución del vulcanismo monogenético al interior de la caldera de forma similar a lo que sucede en el CVAT.

El arreglo geométrico preexistente y el tensor de esfuerzos actual han dado lugar a la reactivación de fallas NW-SE, las cuales funcionan como fallas de transferencia acomodando la extensión de las fallas NE-SW. Estas muestran dos etapas de actividad para este periodo: laterales y normales, ejemplo de ello es la FAc de cinemática lateral derecha y más recientemente como falla normal con componente lateral derecha (Fig. 38). Mientras que las estructuras NE-SW presentan componente lateral izquierda; aunado a ello se presentan fallas menores de orientación N-S y E-W asociadas con los trenes principales, las cuales conservan la cinemática expuesta por las fallas maestras. Además de los distintos grupos de fallas de orientación NW-SE y NE-SW, el tensor  $\sigma_3$  NW-SE, ha producido la reapertura de los sistemas de fracturas producto de la deformación plicativa como se ha mencionado en el capítulo V.2.4, donde se observó que las fracturas abiertas en las unidades sedimentarias mesozoicas presentan orientación preferencial NE-SW, y que estas han retomado los planos de las fracturas producto de la deformación plicativa.



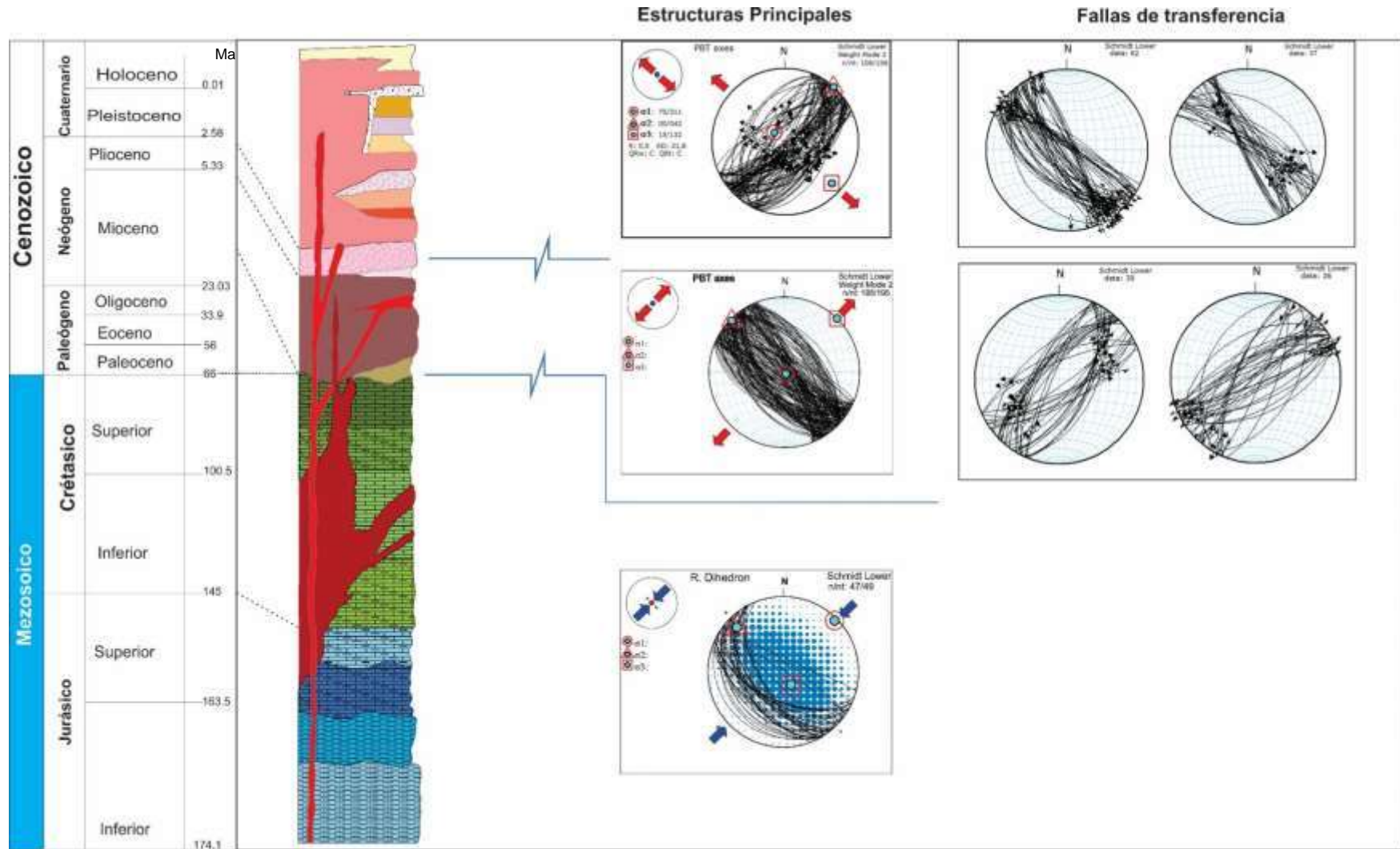


Figura 53. Columna estratigráfica compuesta del área de estudio, del lado derecho se encuentran las tres fases de deformación con las estructuras principales asociadas y fallas de transferencia para la extensión NE-SW y NW-SE.

## **VI.2.- Relación del campo de esfuerzos con la circulación de fluidos hidrotermales. Implicación estructural en los yacimientos geotérmicos.**

Las estructuras producto de la deformación, mencionadas en el apartado anterior han respondido de distinta forma a cada uno de los tensores de esfuerzo, siendo de mayor interés en este apartado el tensor imperante actualmente y la respuesta de las estructuras antiguas al mismo. Dado que los yacimientos geotérmicos de Acoculco y Los Humeros comparten un basamento común, así como una historia de deformación, la definición y caracterización de todos los sistemas de fracturamiento regionales, el presente estudio es de utilidad para ambos sectores. Sin embargo, las relaciones geométricas y cinemáticas de los sistemas de fallas identificadas muestran características distintas en cada uno de los yacimientos geotérmicos, principalmente porque mientras que en la CLH se cuenta con las condiciones necesarias para la explotación del reservorio geotérmico tanto de fluidos como de permeabilidad, en la CAc no se cuenta con las condiciones necesarias para la explotación geotérmica debido a su nula permeabilidad reportada en los pozos perforados.

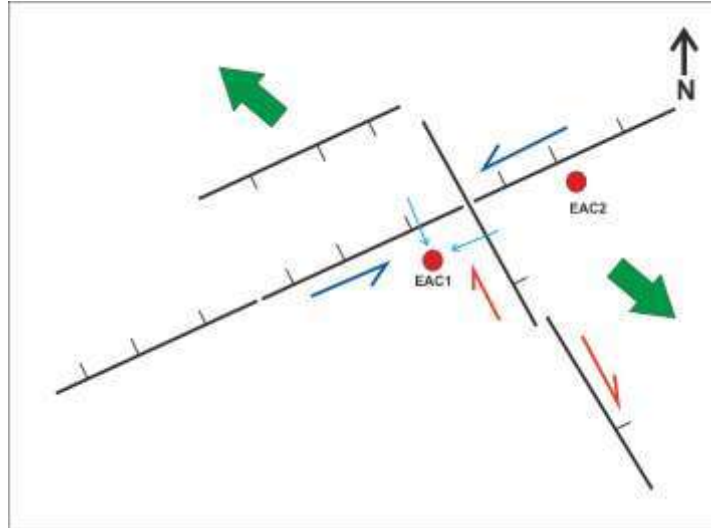
Dentro de las condiciones a considerar se encuentra el régimen sismo tectónico o el tensor de esfuerzos actual que controla el movimiento de las estructuras, así como la interacción de los fluidos geotérmicos y la circulación de los mismos. Para esta región los datos de campo mostraron un valor de  $\sigma_3$  igual a  $N310^\circ \pm 18$ , compatible con el reportado por [García-Palomo et al., \(2018\)](#) para la región Apan-Acoculco, y los datos preliminares reportados por [García-Hernández \(2018\)](#) como parte de los trabajos del proyecto GEMex pt. 4.2. Mientras que [Norini et al. \(2019\)](#), señalan para el sector los Humeros la interacción del tensor regional con un campo de estrés local producto de la cámara magmática del sistema (campos de esfuerzos radiales). Las fallas regionales NW-SE y NE-SW presentan una relación casi ortogonal, dando lugar en varios sectores a intersecciones de fallas, los cuales [Faulds \(2010\)](#) y otros han considerado como un escenario estructural favorable para la circulación de fluidos. Este hecho había sido previsto por los geólogos de CFE, razón por la cual se perforan dos pozos geotérmicos profundos (Eac\_01 y Eac\_02) al interior de la CAc en la intersección de fallas de orientación NW-SE y ~E-W, sin embargo no se obtuvieron los resultados deseados, ya que ninguno de los dos pozos presentó las condiciones necesarias para ser explotados de forma convencional, debido a la nula permeabilidad y por lo tanto a la ausencia de fluidos ([Lorenzo-Pulido et al., 2011](#); [López-Hernández et al., 2009](#)), catalogando al sistema como HDR, por las altas temperaturas  $>300$  °C a 2000 m de profundidad.

Para el yacimiento de la CAc, estudios posteriores sugieren que la fuente de calor se encuentra asociada con la presencia de diques ([Sosa-Ceballos et al., 2018](#); [Avellán et al., 2019](#)) y actualmente se pretende desarrollar el yacimiento como un Sistema Geotérmico Mejorado, a partir de procesos similares al fracking o estimulación hidráulica, cuya caracterización y estudio forma parte del proyecto GEMex.

Las relaciones geométricas y cinemáticas en el sector de los pozos geotérmicos EAC\_01 y EAC\_02, en donde se presentan interacciones de fallas normales NE-SW, las cuales caen al N y S dando lugar a pequeñas estructuras tipo graben en donde se han depositado sedimentos lacustres del Plioceno y Holoceno



con evidencias de deformación reciente (Fig. 54), desplazadas por fallas NW-SE, caracterizadas por planos subverticales con desplazamiento normal y componente lateral derecho (estrías oblicuas), previstas por el modelo de zonas de transferencia ([Reporte final Etapa 5 PT. 4.2 GEMex; 2019](#)), lo cual responde a la tectónica regional. Desde una perspectiva geométrica, el pozo EAC\_01, corresponde a un sector compresivo local, lo cual justifica la nula permeabilidad reportada para el mismo (Fig. 54).



**Figura 54.**- Modelo estructural local, en el cual se muestran la distribución de los pozos geotérmicos EAC\_01 y EAC\_02 (puntos en rojo), geometría de los trenes de fallas, su cinemática, el vector  $\sigma_3$  regional (flechas en color verde) y local (flechas en color azul) para el área de los pozos geotérmicos.

De acuerdo con el trabajo de campo y análisis de los datos, las fallas NW-SE y NE-SW, así como los sistemas de fracturas asociados, se encuentran orientados favorablemente con el tensor de esfuerzos, lo cual da lugar a que exista un fracturamiento activo en la zona, que es de suma importancia dentro del yacimiento para la circulación de fluidos. Es el caso de las fallas regionales NW-SE que se encuentran asociadas a circulación vertical profunda, mientras que los planos NE-SW e intersecciones de fallas y fracturas de los dos sistemas favorecen la circulación lateral de los fluidos (Fig. 55). De acuerdo con los datos de los pozos ([Lorenzo-Pulido et al., 2011](#)), la mayor parte de los planos NE-SW estarían cortando las secuencias sedimentarias mesozoicas, que de acuerdo con los datos de campo se encuentran intensamente deformadas por fracturamiento producto de la deformación plicativa, las cuales responden al tensor de esfuerzos actual, ya que las fracturas de tensión AB y cizalla OKL de orientación NE-SW al interior del HCh han sido reabiertas, además de que estos planos presentan la misma dirección del fallamiento normal NE-SW y en menor proporción fracturas de orientación NW-SE. Además, este sistema de fracturamiento controla el emplazamiento de los conos cineríticos del CVAT, congruente con los sistemas de fallas regionales, lo cual da lugar a múltiples intersecciones de fracturas, siendo estas de bajo ángulo, con circulación de fluidos asociada a flujos laterales.

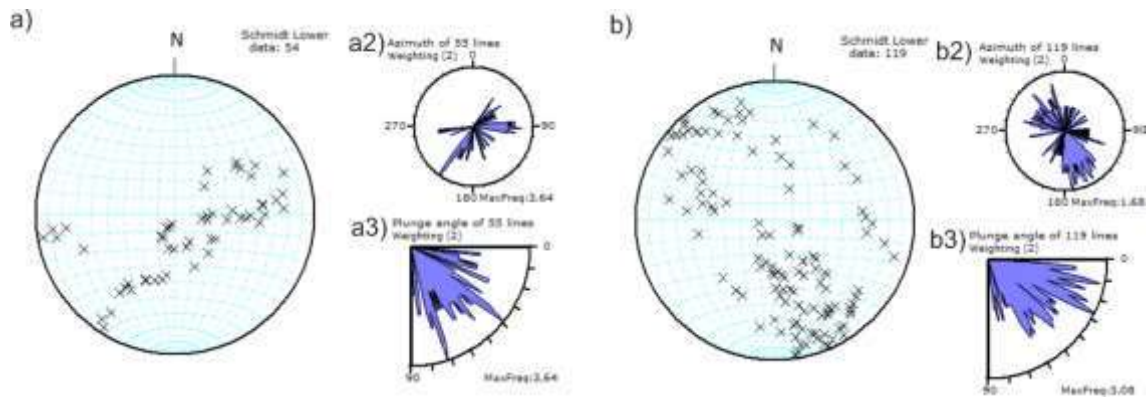


Figura 55.- líneas de intersección de fracturas en la vecindad de pozos geotérmicos: a) fracturas NE-SW y b) fracturas NW-SE.

### VI. 3.- Conclusiones

- 1) Los patrones lineales observados en los mapas hipsométrico, de pendientes, disección vertical, así como las redes de drenaje se encuentran fuertemente influenciados por estructuras de deformación de orientación NW-SE y NE-SW.
- 2) Las formas de las subcuencas se encuentran influenciadas por estructuras tectónicas (Graben y Horst), por lo que son alargadas con valores de  $Re \approx 0.5$  (R. Laxaxalpa)
- 3) Existe la presencia de tres fases de deformación en el área de estudio:
  - i) fase 1: compresión NE-SW; la cual se caracteriza por el plegamiento de las unidades sedimentarias Mesozoicas, así como fallas inversas de bajo ángulo y el intenso fracturamiento de las capas, como respuesta a la deformación plicativa.
  - ii) fase 2: extensión NE-SW; representada por fallas normales NW-SE, diques piroclásticos y alineación de volcanismo de dirección NW-SE, así como fallas de transferencia NE-SW.
  - iii) fase 3: extensión NW-SE; caracterizada por fallas normales NE-SW y la reactivación de fallas NW-SE, las cuales han acomodado la deformación como zonas de transferencia, por lo cual la cinemática de las mismas es variable.
- 3) Las fracturas en las unidades sedimentarias mesozoicas presentan distintas fases de deformación y se encuentran selladas por mineralización y reaperturas a través del tiempo, pero al ser fracturas sistemáticas penetrativas representan gran importancia para la circulación de fluidos geotérmicos y la explotación de los yacimientos hidrotermales.
- 4) Las fracturas abiertas presentan dirección preferencial NE-SW en las unidades sedimentarias mesozoicas, paralelas a las fracturas AC y OKL, retomando en varias ocasiones estos planos de fracturamiento. Las cuales muestran diferentes aperturas (<1 mm a 8 cm); sin embargo, en algunos casos se observaron fracturas que han sido mineralizadas en varias ocasiones y que el tensor de esfuerzos las ha reabierto, con varias bandas de mineralización. Mientras que en el emplazamiento de los conos cineríticos del CVAT, el fracturamiento preferencial observado es NW-SE.



5) El sector de mayor interés en la CAC para la explotación del EGS se localiza en las inmediaciones del pozo Eac\_01, aunque las fallas individualmente representan sectores de fracturamiento mejorado, sin embargo, en conjunto representan una zona compresiva (Fig.56), por lo cual el fracturamiento dentro del sistema contempla innumerables inconvenientes entre los que es de destacar un continuo autosellamiento de las redes de fracturas.

**Recomendaciones:**

El análisis detallado de un sistema geotérmico es de suma importancia, ya que cada sistema es único y presenta características que lo han de diferenciar de otros, incluso ubicados en la misma región, con un mismo régimen sismo-tectónico.

Aunque dentro de nuestro análisis se ha contemplado el análisis del fracturamiento en las unidades sedimentarias mesozoicas, sería de gran utilidad llevar a cabo un análisis detallado del fracturamiento en unidades sedimentarias mesozoicas, contemplando las distintas unidades estratigráficas.

Es deseable la caracterización estructural apoyada por dataciones absolutas de las etapas de deformación, tanto de la extensión NE-SW como etapas de extensión NW-SE a partir del análisis de minerales neoformados.

De acuerdo con las características regionales de fallamiento y fracturamiento de las distintas unidades estratigráficas y el control estructural de los sistemas de fallamiento en la distribución de los aparatos volcánicos en esta región, sería razonable considerar otros sectores para la explotación de energía geotérmica, relacionados con las zonas volcánicas más jóvenes, tanto al NW como al SE de la actual zona de interés dentro de la CAC.

Dado que México es un país rico en recursos geotérmicos, deberían de considerarse otros sectores para su explotación, en los cuales las técnicas convencionales sean viables. Además, no solo es conveniente enfocarse en yacimientos de alta entalpia sino también comenzar a aprovechar aquellos de mediana y baja entalpia para otros usos directos y no únicamente con fines de balneología.



## **Bibliografía:**

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., 2005. El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Sociedad Geológica Mexicana*, 1, 65-82.

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Orozco-Esquivel, M. T., Vasallo-Morales, L. F., Xu, S. S., 2002, El sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende: implicaciones en la deformación post- Eocénica del centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 12-29.

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Ferrari, L., 1998. Effect of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican Volcanic Belt. *Geology*, 26, 7, 591-594.

Allan, J.F., 1986, Geology of the northern Colima and Zacoalco grabens in the southwest México: late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, 97, 473-485.

Andreani, L., Le Pichon, X., Rangin, C., Martínez-Reyes, J., 2008. The southern Mexico block: main boundaries and new estimation for its Quaternary motion. *Societe Geologique de France*, 179, 2, 209-223.

Arellano V. M., Izquierdo, G., Aragón A., Barragán, R.M., García, A., 2001. Distribución de presión inicial en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XVI, núm. 3, 75-84.

Arellano, V.M., García, A., Barragán, R.M., Izquierdo, G., Aragón, A., Nieva, D., Portugal, E. y Torres, I., 1998. Desarrollo de un modelo básico actualizado del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue. Informe IIE/11/11459/I01/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas Comisión Federal de Electricidad, Cuernavaca, 450.

Arellano V. M., García A., Barragán, R.M., Izquierdo, G., Aragón A., Pizano A., 2000. Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. *Boletín iie*. 169-177

Avellán, D.R., Macías, J.L., Layer, P.W., Cisceros, G., Sánchez-Núñez, J. M., Gómez-Vasconcelos, M. G., Pola, A., Sosa-Ceballos, G., García-Tenorio, F., Reyes-Agustín, G., Osorio-Ocampo, S., García-Sánchez, L., Mendiola, I. F., Martí, J., López-Loera, H., Benowitz, J., 2018. Geology of the late Pliocene-Pleistocene Acoculco caldera complex, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of Maps*, DOI: 10.1080/17445647.2018.1531075.

Aydin, Atilla., 2000. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Marine and Petroleum Geology*. 17. 797-814. 10.1016/S0264-8172(00)00020-9.

Backers, T., y Moeck, I., 2015. Fault Tips as Favorable Drilling Targets for Geothermal prospecting a fracture Mechanical Perspective. Melbourne, Australia.



- Bahat, D., Rabinovitch, A., Frid, V., 2005. Tensile Fracturing Rocks: Berlin, Springer, 579.
- Barragán, R.M., E. Santoyo, D. Nieva, E. Portugal y M.P. Verma, 1988. Caracterización de yacimientos geotérmicos por medio de la determinación de parámetros físico-químicos, informe IIE/11/2386/I 01/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, 225.
- Barton Collen A., Zoback Mark, Moos Daniel, 1995, Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock, *Geology*, p. 683-686.
- Bell, J.W., and Ramelli, A.R., 2007. Active faults and neotectonics at geothermal sites in the western Basin and Range: Preliminary results: *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 31, 375-378.
- Biddle, K. T., y Christie-Blick, N., 1985. (Eds.): Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation. *Soc. Econ. Paleont. Miner., Spec. Publ. 37*. Tulsa, Oklahoma.
- Bocco, Gerardo; Priego, Ángel; Cotler Helena, 2005. La geografía física y el ordenamiento ecológico del territorio: experiencias en México, *Gaceta ecológica*, 76: pp. 23-34, Instituto Nacional de Ecología México
- Bolton, A.J., Clennell, M.B., y Maltman, A.J., 1999. Nonlinear stress dependence of permeability: a mechanism for episodic fluid flow in accretionary wedges. *Geology*, 27, 239-242.
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Giuliani, G., Laumonier, B., and Blanco, O., 1999. Fluidized hydrothermal breccia in dilatant faults during thrusting: The Colombian emerald deposits, in McCaffrey, K., Lonergan, L., and Wilkinson, J., eds., *Fractures, fluid and mineralization: Geological Society [London] Special Publication 155*, p. 183-195.
- Burbank y Anderson; 2012. *Tectonic Geomorphology*, Editorial Offices, 2nd ed.
- Byerlee, J.D., 1978. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics* 116, 615e626.
- Caine Jonathan Saul, Evans James P., Forster Craig B., (1996): Fault zone architecture and permeability structure, *Geology*, p. 1025-1028.
- Calcagno, P., Evanno, G., Trumpy, E., Gutiérrez-Negrín, L. C., Macías, J. L., Carrasco-Núñez, G., Liotta, D., 2018. Preliminary 3-D geological models of Los Humeros and Acoculco geothermal fields (Mexico) – H2020 GEMex Project. *Advances in Geosciences*, 45, 321-333.
- Campa, M. F., Coney, P., 1982. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Journal Earth Sciences*, 20.
- Campos-Enríquez J. O., Alatraste-Vilchis D. R., Huizar-Álvarez R., Marines-Campos R. and Alatorre-Zamora M. A., 2003. Subsurface structure of the Tecocomulco sub-basin (northeastern Mexico basin), and its relationship to regional tectonics, *Geofísica Internacional*, Vol. 42, Num. 1, pp. 3-24.



Canet, C., Arana, L., González-Partida, E., Pi, T., Prol-Ledesma, M. R., Franco, S.I., Villanueva-Estrada, R. E., Camprubí, A., Ramírez-Silva, G., López-Hernández, A., 2010. A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Acoculco Caldera, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geochemical Exploration*. 105, 1-10.

Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R. E., Alfonso, P., González-Partida, E., Salinas, S., 2015. Combining ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of hydrothermal alteration for the Acoculco geothermal zone, Eastern Mexico. *Geothermics*. 53, 154-165.

Cantagrel, J. M., Robin, C., 1979. K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks: Relations between the andesitic and the alkaline provinces. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5, 1-2, 99-114: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(79\)90035-0](https://doi.org/10.1016/0377-0273(79)90035-0).

Carrasco-Núñez, G., Bernal, J. P., Dávila, P., Jicha, B., Giordano, G., Hernández, J., 2018. Reappraisal of Los Humeros Volcanic Complex by New U/Th Zircon and Ar40/Ar39 Dating: Implications for a Greater Geothermal Potential. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 132-149. <https://doi.org/10.1002/2017GC007044>.

Carrasco-Núñez, G., Dávila-Harris, P., Riggs, N.R., Ort, M.H., Zimmer, B.W., Willcox, C.P., Branney, M.J., 2012. Recent explosive volcanism at the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America*. 25, 83-113.

Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., Lozano V, L., 1997. Geologic Map of Cerro Grande Volcano and Surrounding Area, Central Mexico. *Geological Society of America*.

Cedillo, F., 1997. Geología del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., Informe HU/RE/03/97 Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia Los Humeros, Puebla, 30 p.

Cervený, K & Davies, R & Dudley, G & Fox, R & Kaufman, P & Knipe, R & Krantz, B. (2004). Reducing uncertainty with fault-seal analysis. *Oilfield Review*. 16. 38-51.

Chávez-Cabello, G., Torres-ramos, J. A., Porrás-Vázquez, N. D., Cossio-Torres, T., Aranda-Gómez, J. J., 2011. Evolución estructural del frente tectónico de la Sierra Madre Oriental en el Cañón Santa Rosa, Linares, Nuevo León. *Sociedad Geológica Mexicana*. 63, 2, 253-270.

Cosgrove J. & Jones M (eds) 1991. Neotectonics and Resources. Proceedings of the Second Sino-British Geological Conference, 'Economic Geology and Geotechnics of Active Tectonic Regions', London, April 1989. x + 409pp. London: Belhaven Press (Pinter Publishers). ISBN 1 85293 075 6.



Cuellar-Cárdenas, M. A., Nieto-Samaniego, A. F., Levresse, G., Alaniz-Álvarez, S. A., Solari, L., Ortega-Obregón, C., López-Martínez, M., 2012. Límites temporales de la deformación por acortamiento Laramide en el centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29, 1, 179-203.

Curewitz, D., Karson, J. A., 1997. Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 79, 149-168.

De La Cruz-Martínez, V., Castillo-Hernández, D., 1986. Geología de la zona geotérmica de la Caldera de Acoculco, Puebla. *Geotermia Revista Mexicana de Geoingeniería* 3, 245-254.

Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Geología, Revista, 2, 172-187.

Demant, A., 1981, Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano: Revista Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 5, 217-222.

Demant, A., Robin, C., 1975. Las Fases del Vulcanismo en México; una Síntesis en Relación con la Evolución Geodinámica desde el Cretácico. *Revista del Instituto de Geología U.N.A.M.* 1, 66-79.

DeMets, C., Traylen, S., 2000. Motion of the Rivera plate since 10 Ma relative to the Pacific and North American plates and the mantle. *Tectonophysics*, 318, 119-159.

Dorantes C., González Partida E., Camprubi A., Canet C., González Ruiz L.F., Rodríguez Galeotte J. E., Castro Mora J., 2016. Características petrológicas y geoquímicas de los intrusivos relacionados a la mineralización del yacimiento tipo IOCG en la Zona Minera de las Minas, Estado de Veracruz, *INAGEQ* 112-121.

Ego, F., Ansan, V., 2002. Why is the Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102°-99° W) in transtensive deformation?. *Tectonophysics*, 359, 189-208.

Eguíluz de Antañano, S., Aranda García, M., & Marrelt, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 1-26.

English, J. M., Johnston, S. T., 2004. The Laramide Orogeny: What Were the Driving Forces?. *International Geology Review*, 46, 833-838.

Fauld James E., Hinz Nicholas and Kreemer Corne, 2012. Structural and tectonic controls of geothermal activity in the basin and range province, western,USA., *New Zeland Gethermal workshop*.

Faulds James E. and Glenn Melosh; 2008. A preliminary Structural Model for the Blue Mountain Geothermal Fiel, Humboldt County, Nevada; *GRC Transactions*, vol. 32, 273-278 p.



- Faulds James E. and Hinz Nicholas H. 2015. Favorable Tectonic and Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin Region, Western USA: Proxies for Discovering Blind Geothermal Systems; Proceedings World Geothermal Congress 2015.
- Faulds, J. E., Coolbaugh, M., Bouchot, V., Moek, I., Oguz, K., 2010. Characterizing Structural Controls of Geothermal Reservoirs in the Great Basin, USA, and Western Turkey: Developing Successful Exploration Strategies in Extended Terranes. International Geothermal Association.
- Faulds, J. E., Hinz, N. H., Coolbaugh, M. F., Cashman, P. H., Kratt, C., Dering, G., Edwards, J., Mayhew, B., McLachlan, H., 2011. Assessment of Favorable Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin, Western USA. GRC Transactions, 35.
- Faulds, J. E., Hinz, N., Kreemer, C., 2012. Structural and Tectonic Controls of Geothermal Activity in the Basin and Range Province, Western USA. New Zealand Geothermal Workshop, 19-21 November.
- Faulds, J. E., Varga, R. J., 2015. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes. Geological Society of America, 323.
- Faulds, J.E., Coolbaugh, M.F., Vice, G.S., and Edwards, M.L., 2006. Characterizing Structural Controls of Geothermal Fields in the Northwestern Great Basin: A Progress Report: Geothermal Resources Council Transactions, v. 30, p. 69-76.
- Faulkner, D. R., Jackson, C. A. L., Lunn, R. J., Schlische, R. W., Shipton, Z. K., Wibberley, C. A. J., Withjack, M. O., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. Journal of Structural Geology. 32, 1557-1575.
- Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C. M., Manetti, P., 2000. Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt. Tectonophysics. 318, 161-185.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, M. T., Menea, V., Menea, M., 2011. The Dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. Tectonophysics.
- Ferrari, L., Pasquaré, G., Venegas-Salgado, S., Romero-Rios, F., 1999. Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco Block. Geology Society of America, 334.
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M. T., Petrone, C. M., Jacobo-Albarrán, J., López-Martínez, M., 2005. Geology, geochronology and tectonic setting of the late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revisited. Journal of volcanology and geothermal research, 146, 284-306.



Ferrari, Luca. 2000. Avances en el conocimiento de la faja volcánica transmexicana durante la última década. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. V. LIII. Instituto de Geología. UNAM. México, D. F. luca@geologia.unam.mx

Fitz-Díaz, E., Hudleston, P., Tolson, G., van der Pluijm, B., 2014. Progressive, episodic deformation in the Mexican Fold-Thrust Belt (central Mexico): evidence from isotopic dating of folds and faults. *International Geology Review*, 56, 6, 734–755, <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2014.896228>

Fitz-Díaz, E., Tolson, G., Hudleston, P., Bolaños-Rodríguez, D., Ortega-Flores, B., Vásquez-Serrano, A., 2012. The role of folding in the development of the Mexican fold-and-thrust belt. *Geosphere*, 8, 4, 931-949.

Fossen, H., 2010. *Structural geology*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, pp 457

Furrier, Max; Vargas Cuervo, German; Geomorfología y cartografía del sector central de Cartagena de indias–Colombia; *Revista Geográfica de América Central*, vol. 2, núm. 57, julio-diciembre, 2016, pp. 199-222, Universidad Nacional Heredia, Costa Rica

García-Palomo, A., Macías, J. L., Jiménez, A., Tolson, G., Mena, M., Sánchez-Núñez, J. M., Arce, J. L., Layer, P. L., Santoyo, M. A., Lermo-Santiago, J., 2017. NW-SE Pliocene-Quaternary extension in the Apan-Acoculco region, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

García-Palomo, A., Macías, J. L., Tolson, G., Valdez, G., Mora, J. C., 2002. Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geos. Int.* 41, 2, 133-150.

García-Tovar, G.P., Martínez-Serrano, R.G., Solé, J., Correa-Tello, J.C., Núñez-Castillo, E, Y., Guillon, H., Monroy-Rodríguez, E.M., 2105. Geología, geocronología y geoquímica del vulcanismo Plio-Cuaternario del Campo Volcánico Apan-Tecocomulco, Faja Volcánica TransMexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 32, 1, 100-122.

García-Valles, M., Pi, T., Alfonso, P., Canet, C., Martínez, S., Jiménez-Franco, A., Tarrago, M., Hernández-Cruz, B., 2015. Kaolin from Acoculco (Puebla, Mexico) as raw material: Mineralogical and thermal characterization. *Clay Minerals*. 50, 405-416.

Garduño-Monroy, V. H., Gutiérrez-Negrín, L. C. A., 1992. Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano. *Geofísica Internacional*. 31, 4, 417-429.

Gibbs, A. D., 1984. Structural evolution of extensional basin margins: *Geological Society of London Journal*, 141, 609-620.

Gill, R., 2015. *Chemical Fundamentals of Geology and Environmental Geoscience*. WILEY Blackwell, p. 153-176.



Gómez-Alvarez, F., 2019. Evolución Tectónica y Magmatismo en el Alto Estructural de Chignahuapan Localizado entre las Calderas Acoculco y Los Humeros, Puebla. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.

Gómez-Tuena, A., 1999. Evolución Geológica del Volcán Cerro Grande, Sector Oriental de la Faja Volcánica Transmexicana. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez-Tuena, A., Carrasco-Núñez, G., 2000. Cerro Grande volcano: the evolution of a Miocene stratocone in the early Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*. 318, 249-280.

Gómez-Tuena, A., LaGatta, A. B., Langmuir, C. H., Goldstein, S. L., Ortega-Gutiérrez, F., Carrasco-Núñez, G., 2003. Temporal control of subduction magmatism in the Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions, and crustal contamination. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 4,8.

Gómez-Tuena, A., Mori, L., Straub, S. M., 2016. Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt. *Earth-Science Reviews*.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., Ferrari, L., 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Sociedad Geológica Mexicana*. 3, 227-283.

Griffith, A.A., (1920): The phenomena of rupture and flow in solids: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 221, 163-198

Gudmundsson, A., 2006. How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes. *Earth Science Reviews*. 79, 1-31.

Gudmundsson, A., 2012. Magma chambers: Formation, local stresses, excess pressures, and compartments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 237-238, 19-41.

H. W., N. (2009). J. C. Jaeger & N. G. W. Cook 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 3rd edition. xix+593 pp., numerous figs. London: Chapman and Hall. ISBN 0 412 22010 5. *Geological Magazine*. 117. 401. 10.1017/S001675680003274X.

Hancock, P.L., 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, Vol. 7, 437-457.

Harding T. P. y Lowell J. D. (1979): Structural style, their plate-tectonic habitats and hydrocarbon traps in petroleum provinces *American Association Petroleum Geologists*, 63 (7): 1016-1056.

Hasenaka, T., 1994. Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacan-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 63, 13-31.

Hasenaka, T., Ban, M., Delgado-Granados, H., 1994. Contrasting volcanism in the Michoacan-Guanajuato Volcanic Field, central Mexico: Shield volcanoes vs. cinder cones. *Geofísica Internacional*. 33, 1, 125-138.





Hasenaka, T., Carmichael, I. S. E., 1985. The cinder cones of Michoacan -Guanajuato: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 25, 105-124.

Hernández Santana, José R., Pérez Damián, José L., Rosete Vergés, Fernando, Villalobos Delgado, Mariano, Méndez Linares, Ana P., y Navarro Salas, Elda, 2017. Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfográfica por densidad de curvas de nivel y la energía del relieve. *Investigaciones Geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM, DOI: [dx.doi.org/10.14350/rig.57019](https://doi.org/10.14350/rig.57019)

Hiriart, G., Luis, I., Negrín, C. A. G., José, F., Quijano, L., Armando, L., Celis, O., Espíndola, I. S., Hernández, I. I., 2011. Evaluación de la Energía Geotérmica en México.

Izquierdo, G.M., Arellano, V. y Aragón, A (2008). Características mineralógicas y microtermométricas del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue., México. *Geotermia*, 2-10.

Javier Lermo, Y. A. (2008). Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos. *Geotermia*, 25-41.

Jolley, S. J., Henderson, I. H. C., Barnicoat, A. C and Fox N. P. C., 1999. Thrust-fracture network and hydrothermal gold mineralization: Witwatersrand Basin, South Africa. *Geological Society, London, Special Publications*, 155, 153-165.

Kereszturi, G., Németh, K., 2013. Monogenetic basaltic volcanoes: Genetic Classification, Growth, Geomorphology and Degradation. Chapter 1, 4-53.

Lawn, B. (1993): *Fracture of Brittle Solids*, Second Edition. Cambridge University Press, New York.

López-Hernández, A., 2009. Evolución volcánica del Complejo Tulancingo-Acoculco y su sistema hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.

López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., Quijano-León, J., 2009. Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acoculco Caldera Complex, central Mexico: exploratori studies. *Geothermics* 38, 279-293.

Lorenzo-Pulido, C., Flores-Armenta, M., Ramírez-Silva, G., 2011. Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acoculco, Pue. *Geotermia*. 24, 1.

Lorenzo-Pulido, C.D. (2008). Borehole geophysics and geology of well H-43, Los Humeros geothermal field, Puebla, México. *Geothermal Training Programme Report*, 9, 23, Orkustofnun, Grensásvegur, Reykjavík, Iceland.

Lowell, J. D., 1985. *Structural Styles in Petroleum Exploration*. OGC Publications, Tulsa.

Martínez Catalán, José Ramón, 2002. *Geología estructural y dinámica global*, Salamanca.



Mat hieu, L., Wyk de Vries, B., Pilato, M., Troll, V. R., 2011. The interaction between volcanoes and strike-slip, transtensional and transpressional fault zones: Analogue models and natural examples. *Journal of Structural Geology*. 1-9.

Mercier J & Vergely P (1992): *Tectonique*. Dunod, Paris, pp. 1-214.

Morán-Zenteno, D. J., Cerca, M., Keppie, J. D., 2005. La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación. *Sociedad Geológica Mexicana*. 3, 319-341.

Nadai, A., (1950): *Theory of flow and fracture of solids*, 2nd ed., Vol. 2. New York: McGraw-Hill.

Nakamura, K., 1977. Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation- principle and proposal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2, 1-16.

Negendank, J., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., Wehrle, D., 1985. Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt,

Nelson, S. A., Gonzalez-Caver, E., 1992. Geology and K-Ar dating of the Tuxtlas Volcanic Field, Veracruz, Mexico. *Volcanology*. 55, 85-96.

Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Alvarez, S.A., *Apuntes de geología estructural observations from SE Utah*. *Marine and Petroleum Geology* 27, 215e222

Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 19-42.

Pardo, M., Suárez, G., 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plate in the southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 100, 12357-12373.

Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991. Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico. *Geological Society of America*.

Pasquaré, G., Garduño, V., Tibaldi, A., Ferrari, M., 1988, Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, 146, 353-364.

Peiffer, L., Bernard-Romero, R., Mazot, A., Taran, Y. A., Guevara, M., Santoyo, E., 2014. Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>S) at a promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Acoculco caldera, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 284, 122-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.019>.

Pérez-Campos, X., Kim, Y., Husker, A., Davis, P. M., Clayton, R, W., Iglesias, A., Pacheco, J. F., Singh, S. K., Manea, V. C., Gurnis, M., 2008. Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico. *Geophysical Research Letters*. DOI: 10.1029/2008GL035127.



Pérez-López, R., Legrand, D., Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Pascua, M. A., Giner-Robles, J. L., 2010. Scaling laws of the size-distribution of monogenetic volcanoes within the Michoacan-Guanajuato Volcanic Field (Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 201, 65-72.

Peterson-Rodríguez, R.H., 2001. Análisis estructural en el anticlinorio de La Casita, Sierra de Parras, Coahuila, México [Tesis de Maestría]: Nuevo León, México, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo Leon, 173 p.

Pettit J. P., 1987. criteria for the sense of movement on fault surface in brittle rocks. *Journal of structural geology*, 9, 597-608.

Pichon, X., Peterson-Rodriguez, R., 2008. The Neogene Veracruz fault: evidences for left-lateral slip along the southern Mexico block. *Societe Géologique de France*, 179, 2, 195-208.

Pollard, D. D., and Aydin, A., 1988. Progress in understanding jointing over the past century: *Geological Society of America Bulletin*, v. 100, p. 1181-1204

Price, N. J. & Cosgrove, J. W., 1990. *Analysis of Geological Structures*. Cambridge University Press, Cambridge.

Priego Santander., et. al. (2010). Propuestas para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje. *Planeación Territorial*. Colecciones CIGA. Pp. 108.

Ramsay, J. G. y Huber, M. I. (1983) *The Techniques of Modern Structural Geology, Volume 1: Strain Analysis*. Academic Press, 307 p., London.

Robertson, Kim G.; Jaramillo, Omar; Castiblanco, Miguel A.; 2013; *Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000*; Bogotá

Rollinson, H. R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Pearson Prentice Hall, p. 48-170.

Rudnick, R. L., Gao, S., 2014. *Composition of the Continental Crust*. Elsevier, 3, 1-64.

Sceal, J.S.C., Weaver, S.D., 1971. Trace elements data bearing on the origin of salic rocks from the Quaternary volcano Paka, Gregory rift, Kenya. *Earth Planet. Sci. Lett.* 12, 327–331.

Sedlock, R. L., Ortega-Gutiérrez, F., Speed, R. C., 1993. *Tectonostratigraphic Terranes and Tectonic Evolution of Mexico*. Geological Society of America.

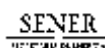
Servicio Geológico Mexicano, 1997. *Carta Geológico-Minera Zacatlán*, clave E14-B14, escala 1: 50 000.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. *Carta Geológico-Minera Ciudad de México*, clave E14-2, escala 1: 250 000.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. *Carta Geológico-Minera Veracruz*, clave E14-3, escala 1: 250 000.



- Servicio Geológico Mexicano, 2005. Carta Geológico-Minera Huachinango, clave F14-D83, escala 1: 50 000.
- Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológico-Minera Perote, clave E14-B26, escala 1: 50 000.
- Servicio Geológico Mexicano, 2011. Carta Geológico-Minera Teziutlán, clave E14-B15, escala 1: 50 000.
- Servicio Geológico Mexicano, 2011. Carta Geológico-Minera Xonacatlán, clave E14-B25, escala 1: 50 000.
- Servicio Geológico Mexicano, 2012. Carta Geológico-Minera Mexcaltepec, clave E14-B24, escala 1: 50 000.
- Servicio Geológico Mexicano, 2017. Carta Geológico-Minera Chignahuapan, clave E14-B13, escala 1: 50 000.
- Sibson, Richard y Scott, J., 1998. Stress/fault controls on the containment and release of overpressured fluids: Examples from gold-quartz vein systems in Juneau, Alaska; Victoria, Australia and Otago, New Zealand. *Ore Geology Reviews*. 13. 293-306. 10.1016/S0169-1368(97)00023-1.
- Sibson, R. H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology*. 18, 8, 1031-1042.
- Sibson, Richard., 1987. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. *Geology*. 15. 10.1130/0091-7613(1987)15<701:ERAAMA>2.0.CO;2.
- Sosa-Ceballos, G., Macías, J. L., Avellán, D. R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M. E., Pérez-Orozco, J. D., 2018. The Acoculco Caldera Complex magmas: Genesis, evolution and relation with the Acoculco geothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Stearns, D. W., (1968): Certain aspects of fractures in naturally deformed rocks in: rock mechanics seminar, Bedford (R. E. Riecker, Ed.) *Terrestrial Sci. Lab.*, 97-118.
- Suppe, J. & Medwedeff, D.A. (1984): Fault-propagation folding. *Geol. Soc. Amer. Abst. Prog.* 16,670.
- Suter, M., 1987. Structural traverse across de Sierra Madre Oriental fold-thrust belt in east-central Mexico. *Geological Society of America*, 98, 249-264.
- Suter, M., 1991. State of stress and active deformation in Mexico and western Central America, in Slemmons, D. B., Engdahl, E. R., Zoback, M. D., and Blackwell, D. D., eds., *Neotectonics of North America: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Decade Map Volume 1*.
- Suter, M., Contreras-Pérez, J., Ochoa-Camarillo, H., 1997. Structure of the Sierra Madre Oriental fold-thrust belt in east-central Mexico. *II Convención sobre la evolución geológica de México*.
- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., Carrillo-Martínez, M., 2001. Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt. *Geological Society of America*, 113, 6, 693-703.



- Takada, A., 1989. Magma transport and reservoir formation by a system of propagation cracks. *Volcanology*, 52, 118-126.
- Takada, A., 1994. The influence of regional stress and magmatic input on styles monogenetic and polygenetic volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 99, B7, 13563-13573.
- Tarbuck, E. J.; Lutgens, F. K.; y Tasa, D; ciencias de la tierra, Madrid, 2005, Paerson educación S.A.
- Tripp, G. I., y Vearncombe, J. R., 2004. Fault/fracture density and mineralization: a contouring method for targeting in gold exploration. *Journal of structural geology*, 1087-1108. DOI: 10.1016/j.jsg.2003.11.002
- Twiss, R. J. and Moores, E. M., 1992. *Structural Geology*. W. H. Freeman & Co., New York. (hardback; ISBN 0-7167-2252-6)
- Vásquez-Serrano, A., (2013): Análisis fractal de fracturas geológicas en un análogo expuesto de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados y su aplicación en modelos de flujo de fluidos: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, p 153.
- Verma, S. P., 2001. Geochemical Evidence for a Lithospheric Source for Magmas from Acoculco Caldera, Eastern Mexican Volcanic Belt. *International Geology, Review*, 43:1, 31–51.
- Verma, S. P., 2018. Absence of Cocos plate subduction-related basic volcanism in southern Mexico: A unique case on Earth?. *Geological Society of America*. 30, 12, 1095-1098.
- Viera-Décida, F., Ramírez-Fernández, J. A., Velásco-Tapia, F., Orozco-Esquivel, M. T., 2009. Relaciones petrogenéticas del magmatismo en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana. *Ciencia UANL*, 7, 1.
- Viggiano-Guerra, j. C., Flores-Armenta, M., Ramírez-Silva, G. R., 2011. Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, 24, 1.
- White, J.C., Espejel-García, V.V., Anthony, E.Y., Omenda, P., 2012. Open system evolution of peralkaline trachyte and phonolite from the Suswa volcano, Kenya rift. *Lithos* 152, 84–104.
- Wilcox, R E., Harding, T. P. y Seel Y, D. R (1973): Basic wrench tectonics, *American Association of Petroleum Geologist, Bulletin*, Vol. 57, pp. 74-96.
- Wiprut, D., & Zoback, M. (2001). Fault reactivation and fluid flow along a previously domant normal fault in the northerm North Sea. *Geology*, 595-598.
- Yarbu-Lugo, U. I., 2015. The interplay between deformation, erosion and sedimentation in the deep-water Mexican Ridges foldbelt, western Gulf of Mexico basin. Tesis doctoral, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.



## **Anexo 1.- Glosario**

CAC: Caldera Acoculco

CFE: Comisión Federal de Electricidad

CLH: Caldera Los Humeros

CVAT: Campo Volcánico Apan-Tezontepec

DEM: Modelo digital de elevaciones

FVTM: Faja Volcánica Transmexicana

FAP: Falla Apan

FAX: Falla Axaxalpa

FCH: Falla Chignahuapan

FTX: Falla Tlaxco

FTLX: Falla Tlaxcala

GCH: Graben Chignahuapan

GPGE: Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos

HCH: Horst Chignahuapan

HDR: Roca seca caliente (Hot dry rock)

HRA: Horst Rosario-Acoculco

IRENA: International Renewable Energy Agency

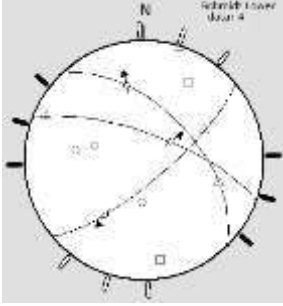
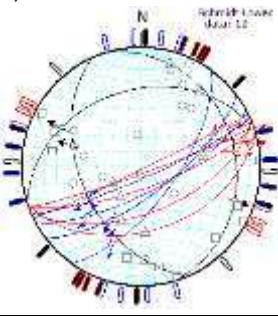
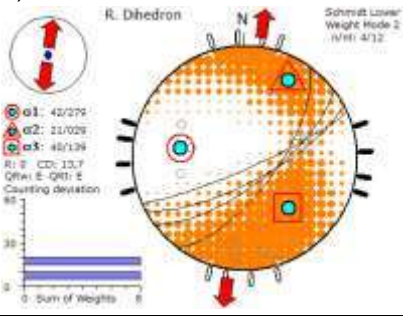
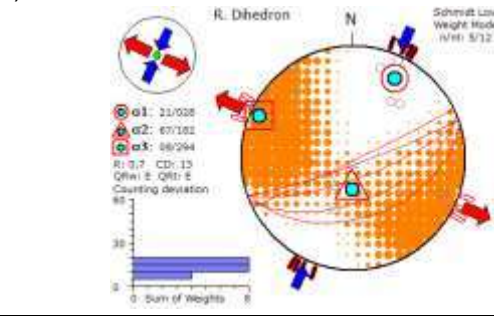
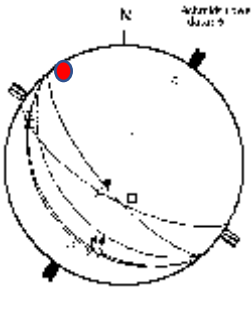
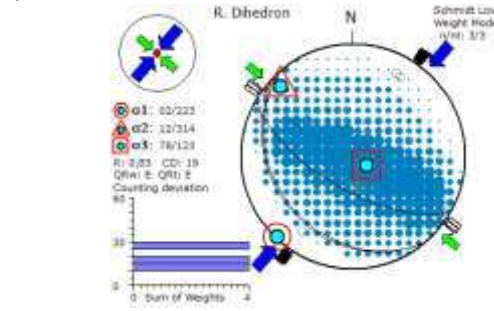
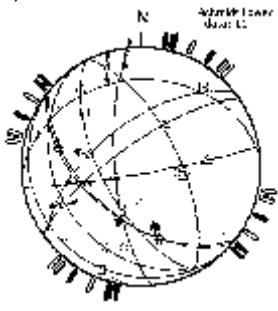
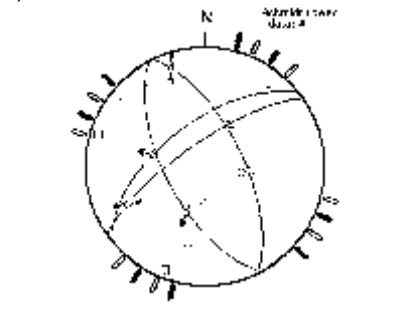
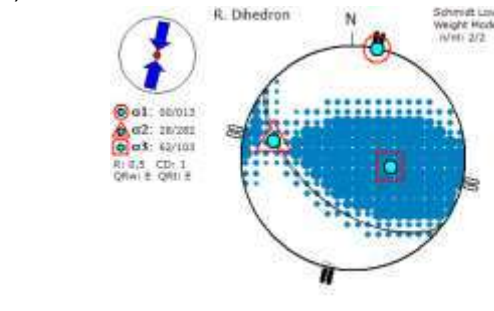
SGM: Servicio Geológico Mexicano

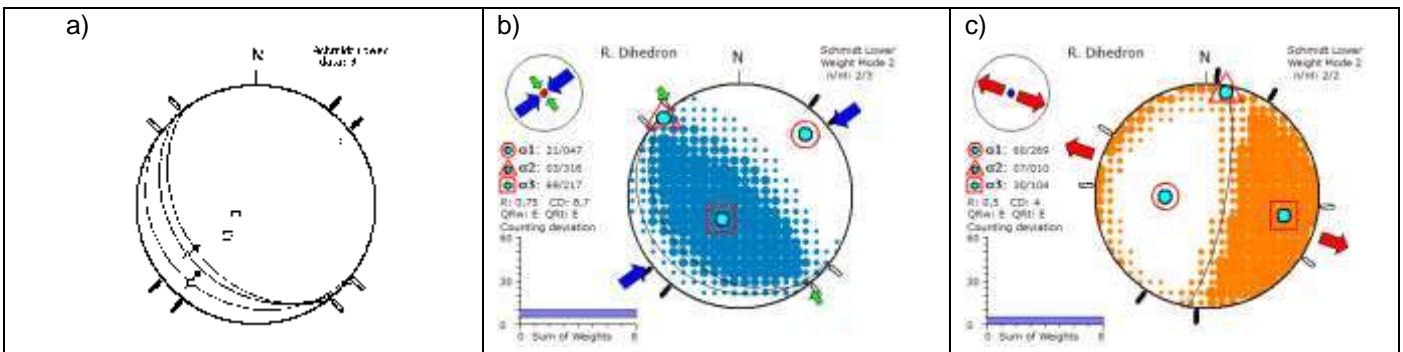
SMOR: Sierra Madre Oriental

VCG: Volcán Cerro Grande

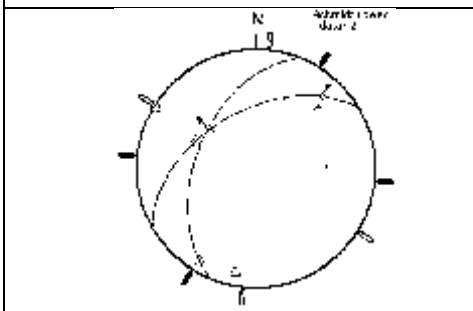


ANEXO 2.-

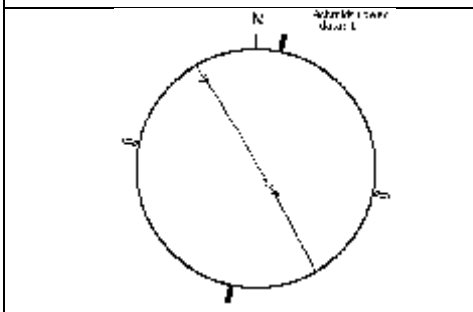
	<p><b>Acf_01.-</b> Estación estructural, en C. el Águila. Se presentan fallas de dirección NW-SE, con cinemática FND y FLD con componente normal y fallas de dirección NE con cinemática lateral izquierda con componente normal.</p>	
<p>a)</p> 	<p>b)</p>  <p>             e1: 42/275              e2: 21/026              e3: 48/134              R: 0 CD: 13.7              Q/W: E: Q/W: E              Counting deviation: 60         </p>	<p>c)</p>  <p>             e1: 21/026              e2: 67/182              e3: 88/294              R: 3.7 CD: 13              Q/W: E: Q/W: E              Counting deviation: 60         </p>
<p><b>Acf_02.-</b> Estación al interior de la caldera Acoculco, sobre lava de composición riolítica afectada por fallas NE-SW y en menor proporción planos NW-SE; b) planos de falla de dirección preferencial NE-SW con estrías oblicuas (FND); c) planos NE-SW con distintas inclinaciones de los planos con cinemática lateral derecha.</p>		
<p>a)</p> 	<p>b)</p>  <p>             e1: 62/223              e2: 12/114              e3: 78/128              R: 2.81 CD: 19              Q/W: E: Q/W: E              Counting deviation: 60         </p>	
<p><b>Acf_06.-</b> Afloramiento sobre calizas a) Corrimientos capa-capa, datos de <math>S_0</math> (en rojo eje de pliegue); b) tensores de esfuerzo calculados, compresión NE-SW.</p>		
<p>a)</p> 	<p>b)</p> 	<p>c)</p>  <p>             e1: 98/012              e2: 28/282              e3: 62/103              R: 0.5 CD: 1              Q/W: E: Q/W: E         </p>
<p><b>Acf_07.-</b> Estación en afloramiento donde se observa intercalación de calizas y lutitas-limolitas con <math>S_0 = N145^\circ/30^\circ</math>, las cuales se encuentran intensamente fracturas; a) datos, colectados en la estación sin hacer separación por fases de deformación; b) sistemas de fallas conjugadas, falla NW-SE con componente normal y falla NE-SW con cinemática lateral izquierda dan una extensión NE-SW; mientras fallas NE-SW con cinemática normal y componente lateral izquierda y falla NW Lateral izquierda como producto de la extensión NE-SW.</p>		



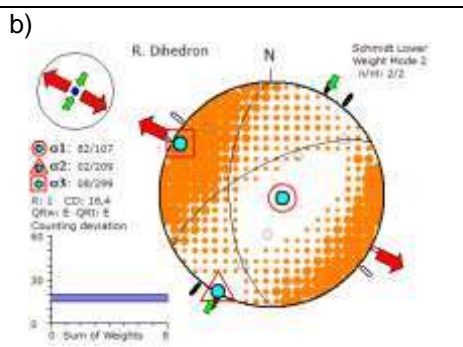
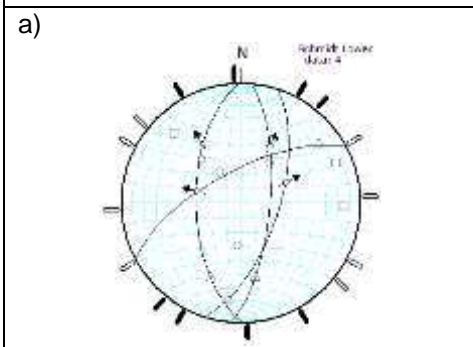
**Acf\_10.-** Estación sobre secuencias sedimentarias calcáreas; a) Datos de corrimientos capa-capa y S0, b) tensor calculado para los corrimientos capa-capa; c) fallas NNE cinemática normal con componente lateral compatible con la extensión NW-SE.



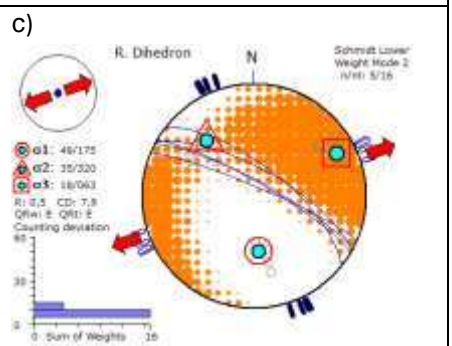
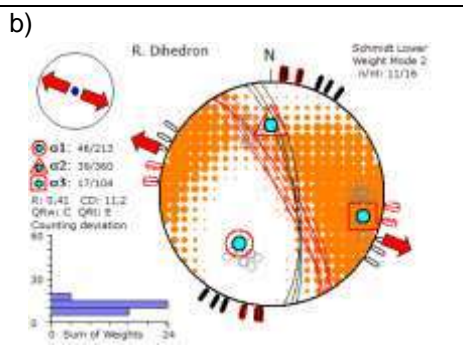
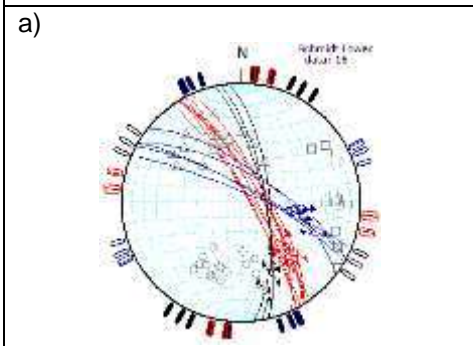
**Acf\_12.-** Afloramiento sobre andesita, en la cual se observaron planos de falla de orientación NE-SW, normal y lateral derecha con componente normal.



**Acf\_13.-** Falla producto de la extensión NE-SW, de dirección NW-SE, con movimiento normal y componente lateral derecho, cortando flujos piroclásticos y lahares.



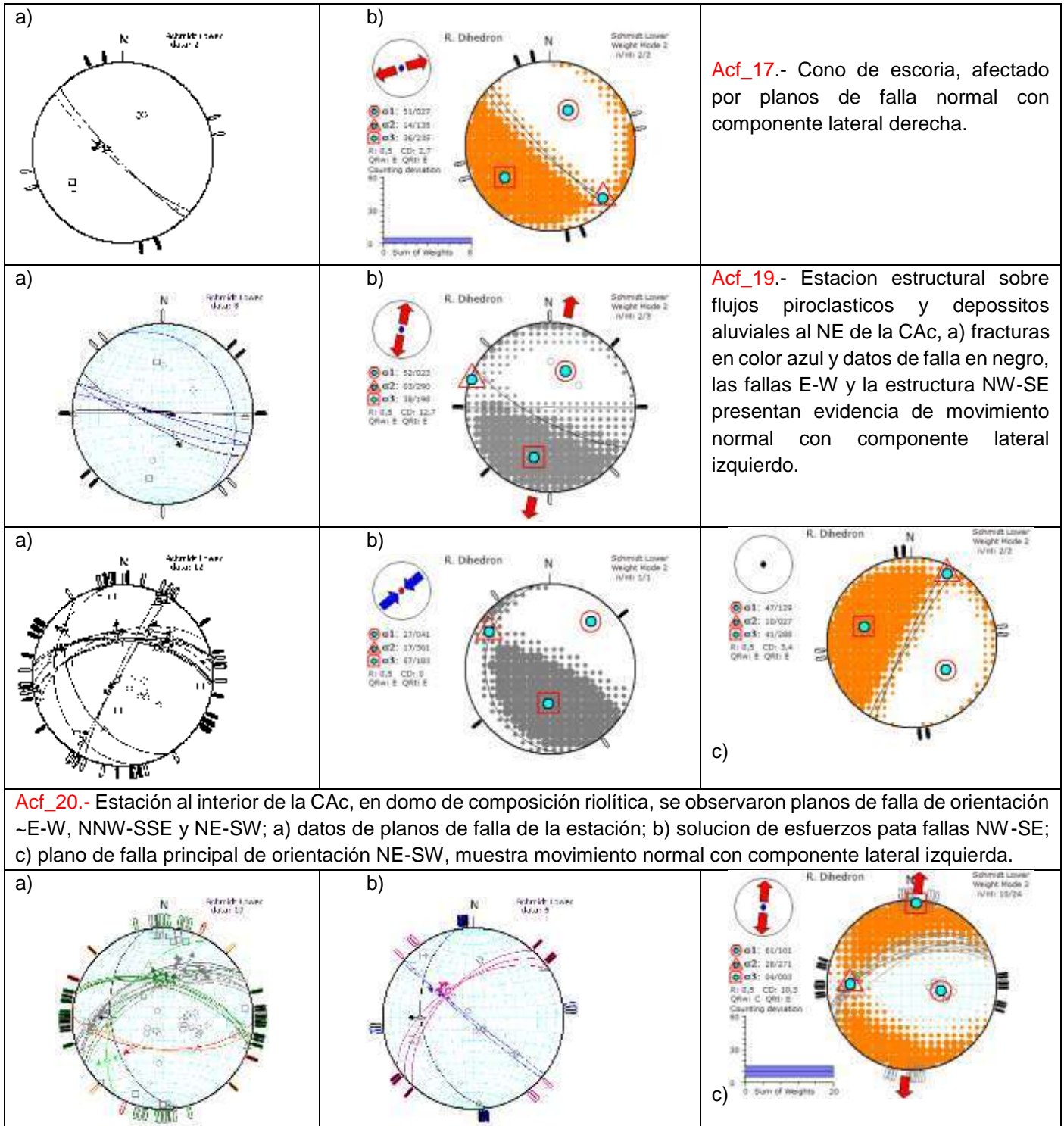
**Acf\_14.-** Estación sobre riolitas de la CAC cortadas por fallas NNE-SSW FNI (3) y FND (1); a) estereogramas con datos de campo; b) solución de esfuerzos calculados.

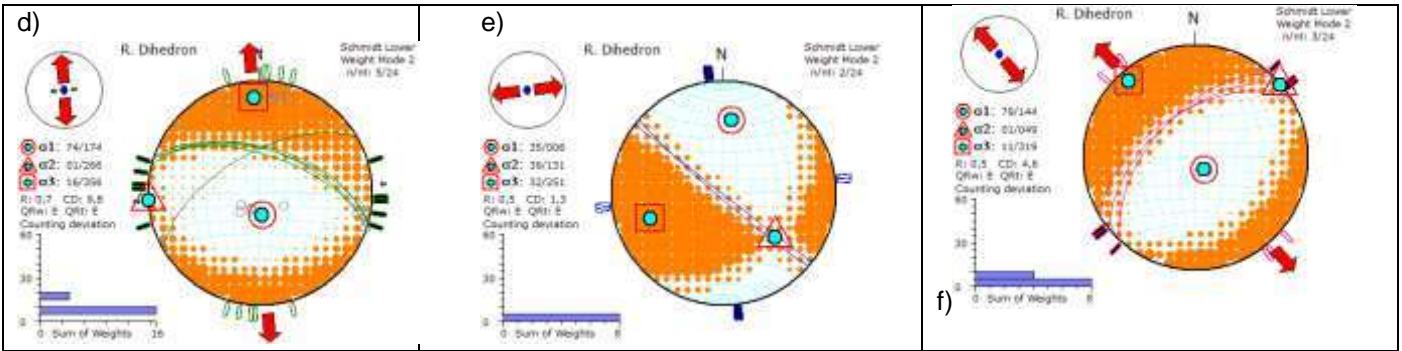


**Acf\_15.-** Estación estructural sobre riolitas, afectadas por intenso fallamiento de dirección NW-SE a NNW-SSE, con dos etapas de movimiento, separadas en tres grupos, rojo NW-SE FLD, negro NNW-SSE como FLD y azul FND; b)

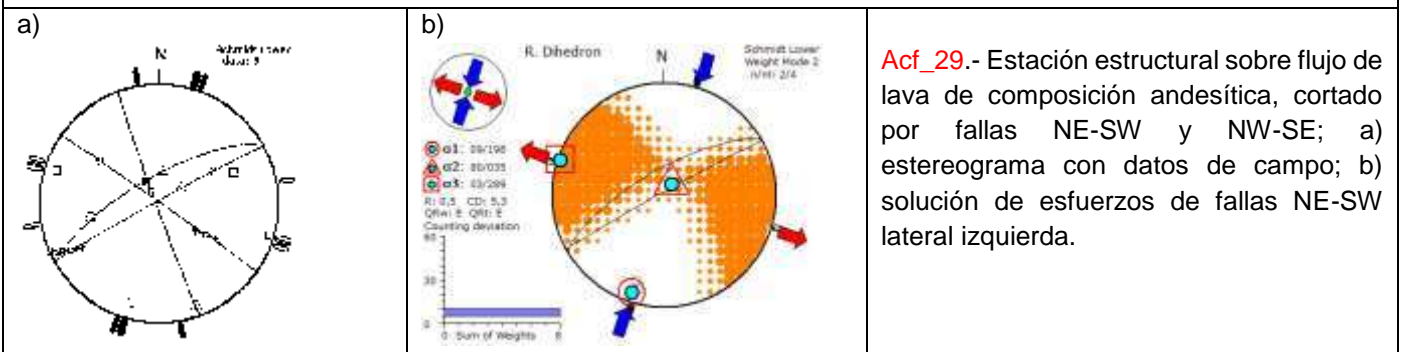


cálculo de paleotensor para planos con estrías oblicuas, con movimiento lateral derecho y componente normal; c) con estrías que indican movimiento normal con componente lateral derecha.

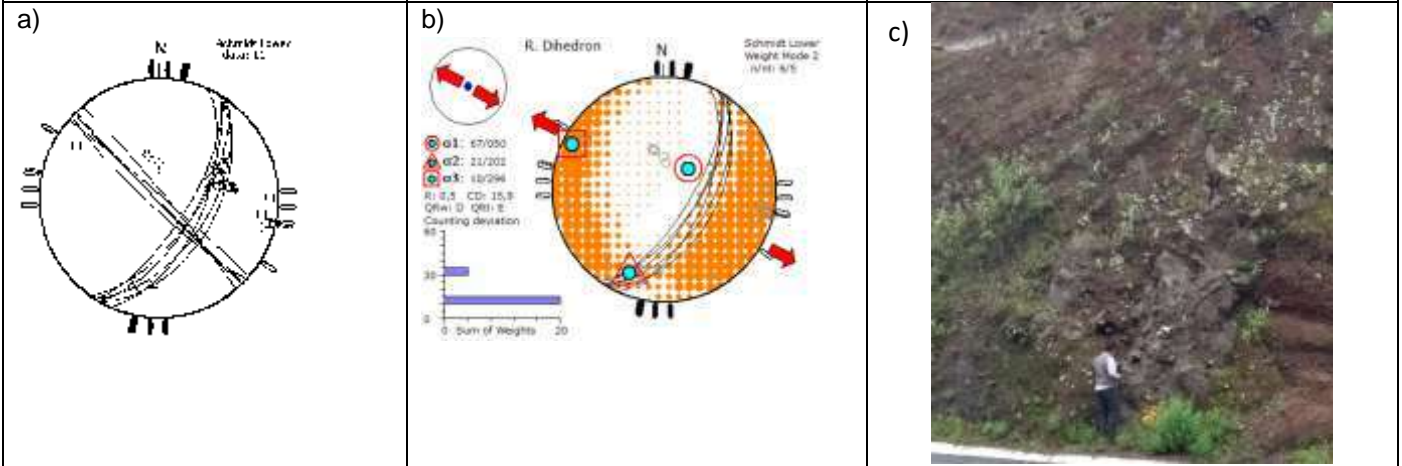




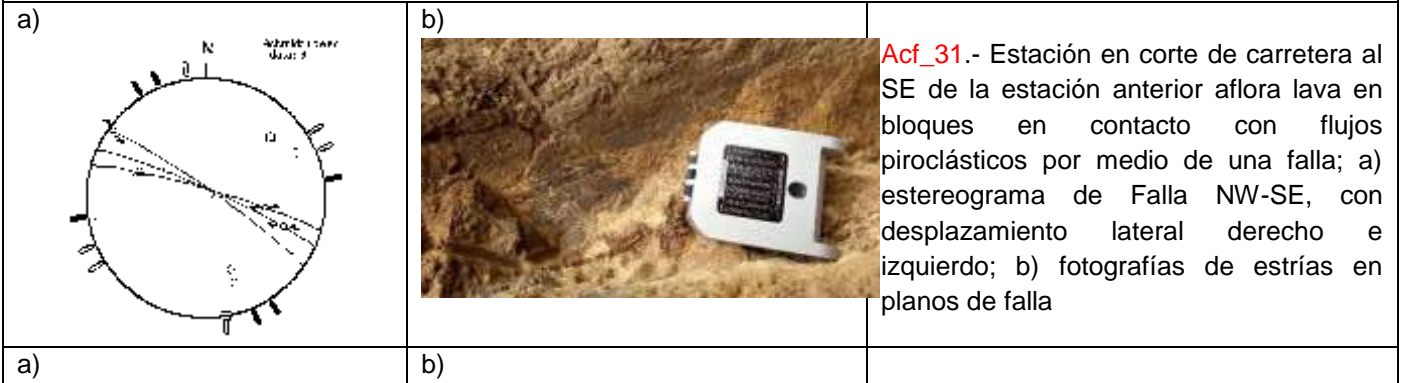
**Acf\_21.-** Estación sobre la ignimbrita Ac.; a) y b): estereograma de planos de falla fallas NE-SW: lateral derecho con componente normal (en color gris), estructuras NE-SW y NW-SE con desplazamiento normal derecho (planos de color verde), NE-SW normal (líneas de color rosa), fallas NW-SE con estrías oblicuas (planos en color azul); c) Solución calculada para fallas ENE-WSW normal; Soluciones de esfuerzos calculadas para: d) Falla NW-SE Normal con componente lateral derecho; e) NW-SE con estrías oblicuas; f) NE-SW normal.



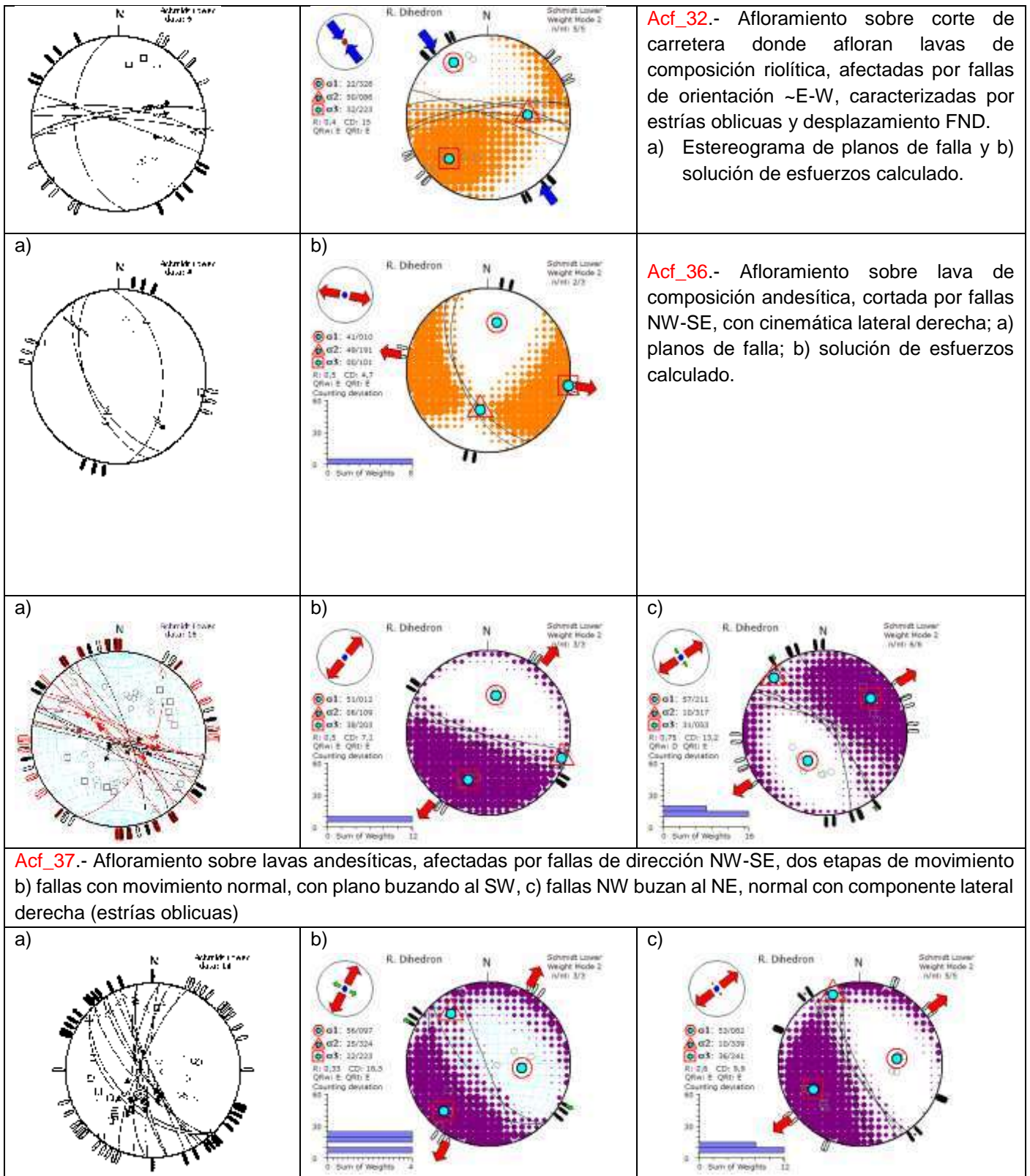
**Acf\_29.-** Estación estructural sobre flujo de lava de composición andesítica, cortado por fallas NE-SW y NW-SE; a) estereograma con datos de campo; b) solución de esfuerzos de fallas NE-SW lateral izquierda.

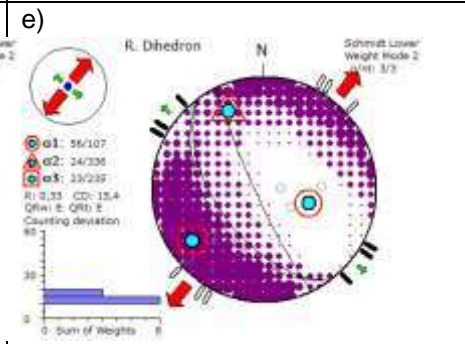
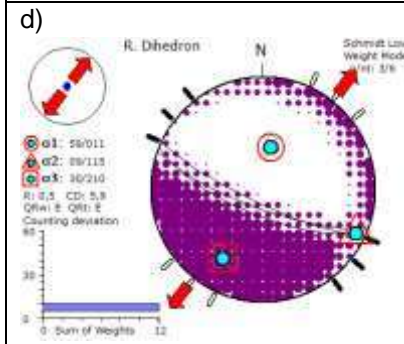
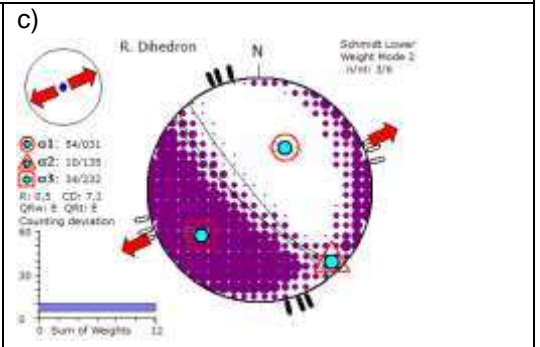
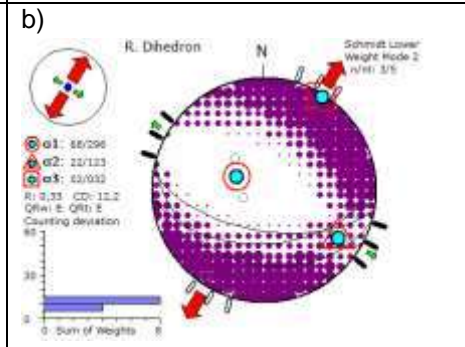
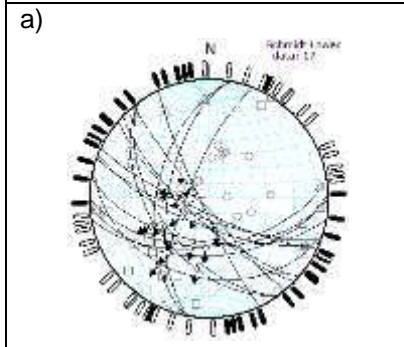
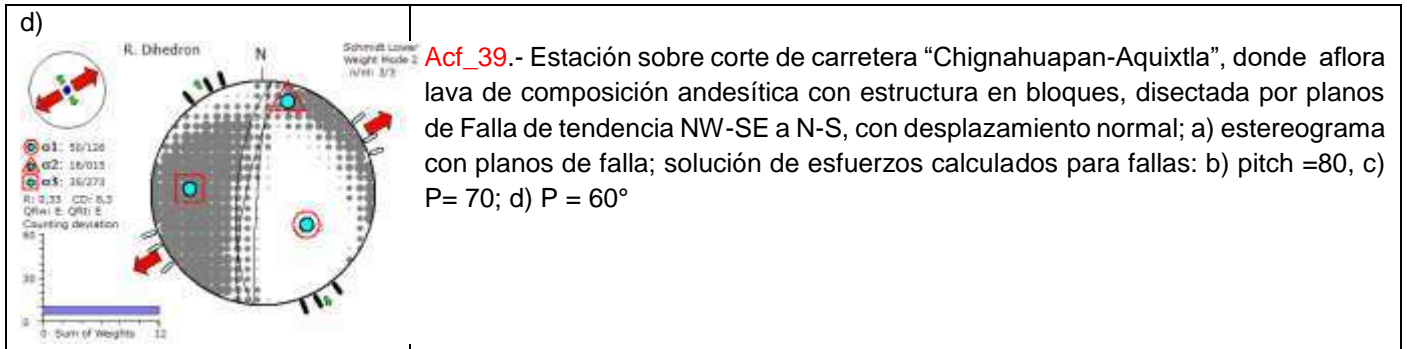


**Acf\_30.-** Sobre cono de escoria del CVAT, fallas y fracturas de dirección NW-SE y NNE-SSW; a) estereograma y cálculo de tensor de esfuerzos para fallas NNE-SSW normales; b) dique (N32-70°).



**Acf\_31.-** Estación en corte de carretera al SE de la estación anterior aflora lava en bloques en contacto con flujos piroclásticos por medio de una falla; a) estereograma de Falla NW-SE, con desplazamiento lateral derecho e izquierdo; b) fotografías de estrías en planos de falla

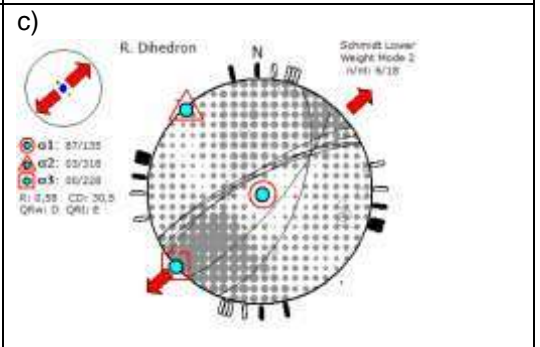
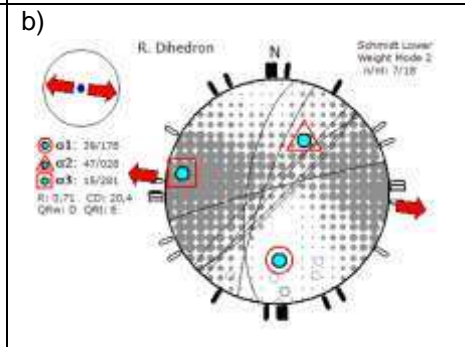
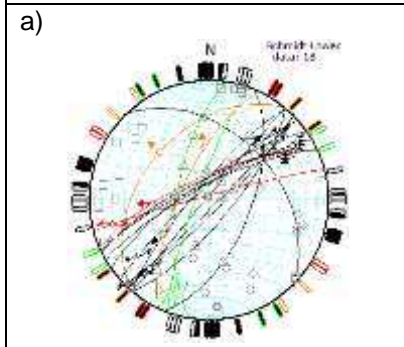
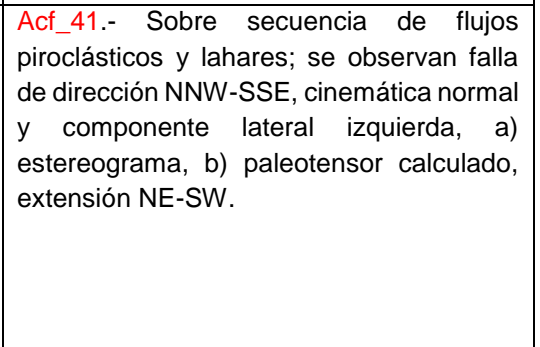
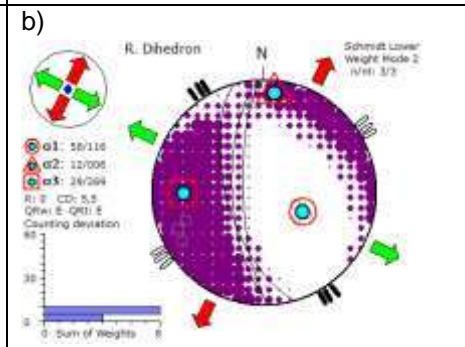
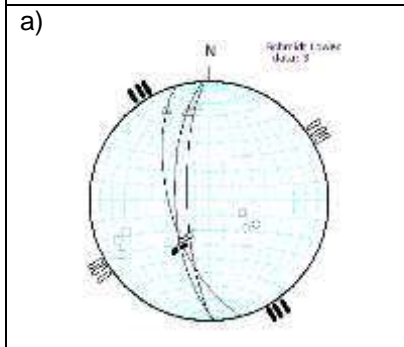




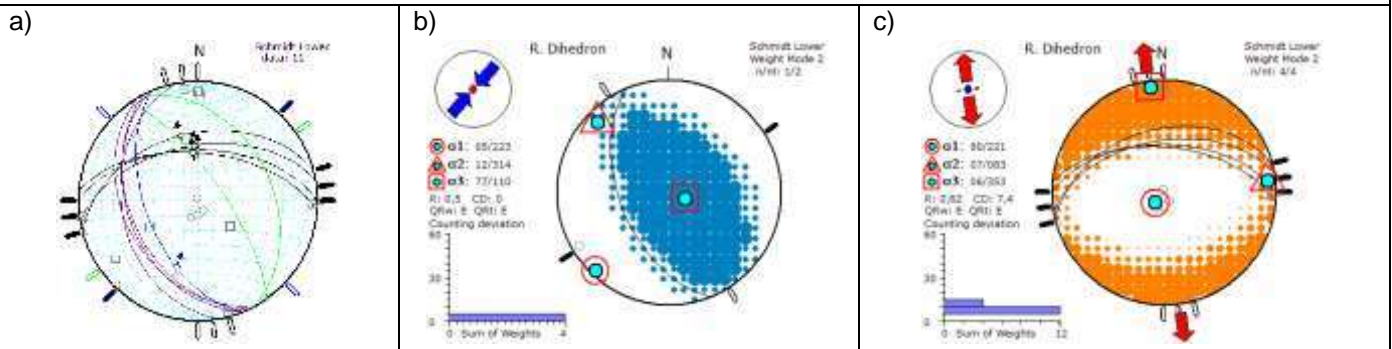
**Acf\_40.-** Estacion sobre lavas basálticas del Mioceno cortadas por fallas de orientación NW-SE a N-S; a) Estereograma con datos de fallas de campo; soluciones separadas para cada subgrupo de fallas: b) fallas E-W (FN); c) y d) planos de falla principal (FN)



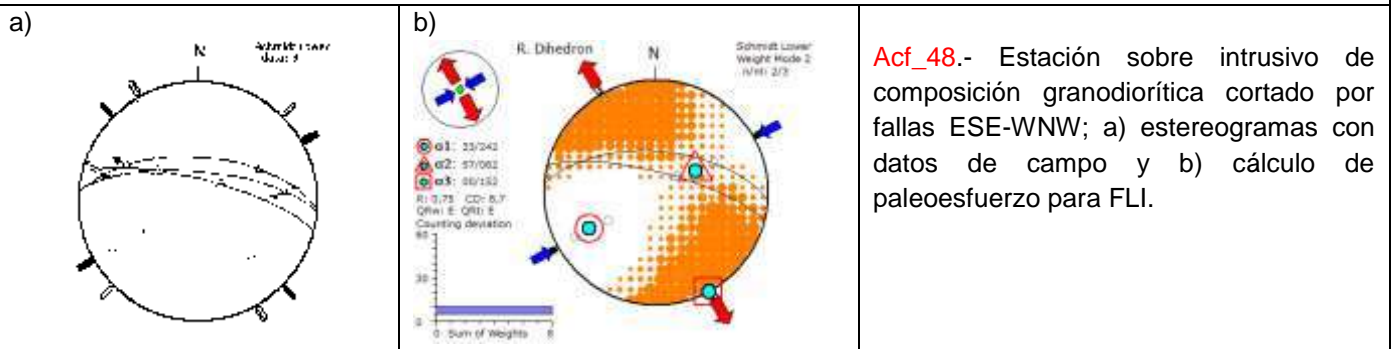
**Acf\_41.-** Sobre secuencia de flujos piroclásticos y lahares; se observan falla de dirección NNW-SSE, cinemática normal y componente lateral izquierda, a) estereograma, b) paleotensor calculado, extensión NE-SW.



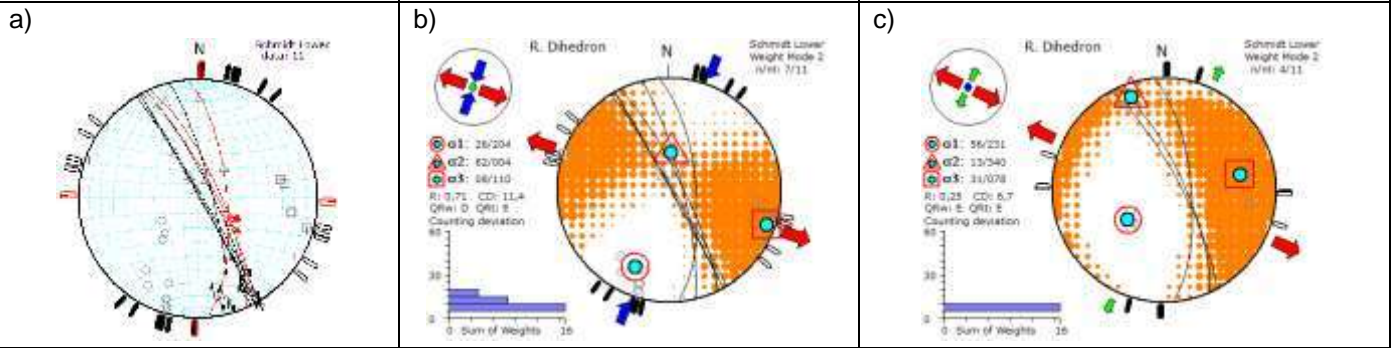
**Acf\_43.-** Afloramiento sobre flujos de lava de composición basáltica en el HCh; en donde se observaron a) planos de falla NE-SW y NW-SE, en negro fallas con desplazamiento lateral (NE-SW) y normal (NW-SE), en verde falla N-S, con desplazamiento lateral izquierdo; b) solución de esfuerzos para fallas FLI; c) solución de esfuerzos para fallas FLD.



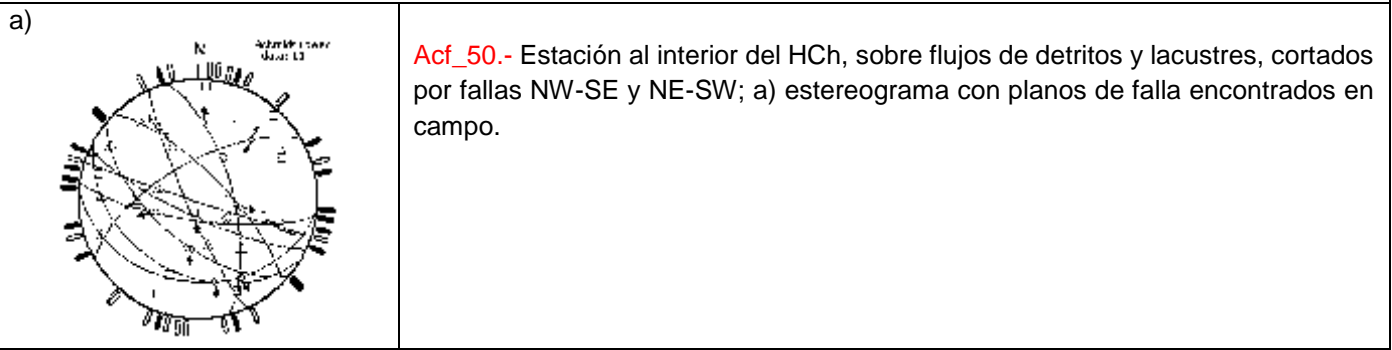
**Acf\_45.-** Afloramiento (intercalación de cz-Lu); a) estereograma con datos de campo: fallas normales ~ E-W (líneas negras), falla inversa (líneas azules), fracturas de tensión (líneas de verde) y estratificación (planos en morado); solución de esfuerzos para: b) estructuras NW-SE, con desplazamiento inverso; c) fallas ~ E-W con movimiento normal.



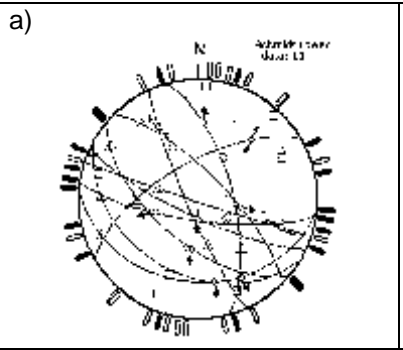
**Acf\_48.-** Estación sobre intrusivo de composición granodiorítica cortado por fallas ESE-WNW; a) estereogramas con datos de campo y b) cálculo de paleoesfuerzo para FLI.

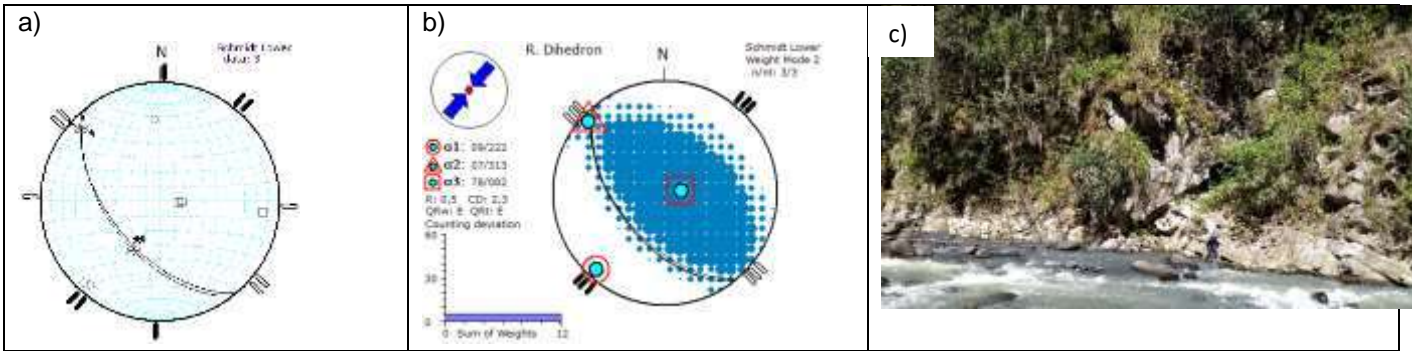


**Acf\_49.-** Afloramiento en corte sobre autopista al SW de la CAC, en lavas de composición andesítica afectadas por fallas de orientación NNW-SSE; a) estereograma con datos de campo, FLD (planos de color negro) y FND (Planos de color rojo); b) que muestran desplazamiento normal con componente lateral derecho; c) fallas laterales, cortadas por planos.

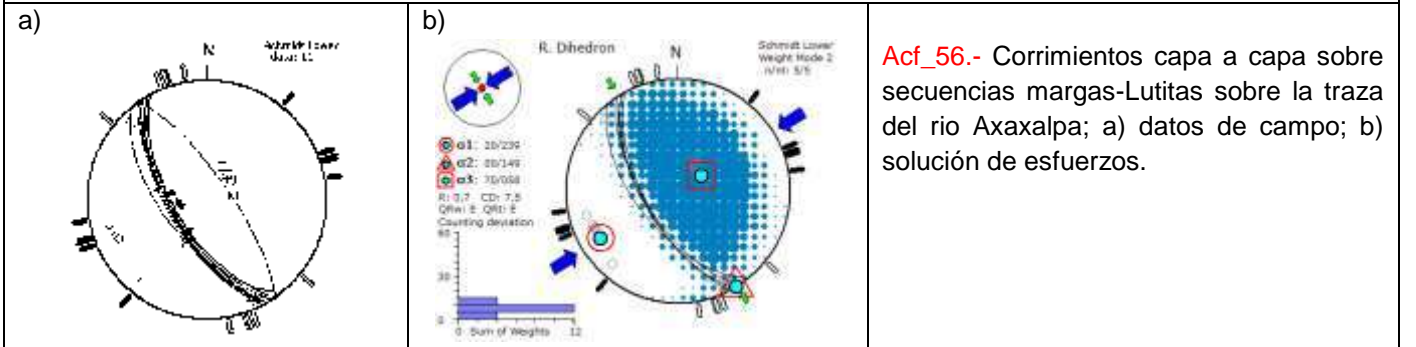


**Acf\_50.-** Estación al interior del HCh, sobre flujos de detritos y lacustres, cortados por fallas NW-SE y NE-SW; a) estereograma con planos de falla encontrados en campo.

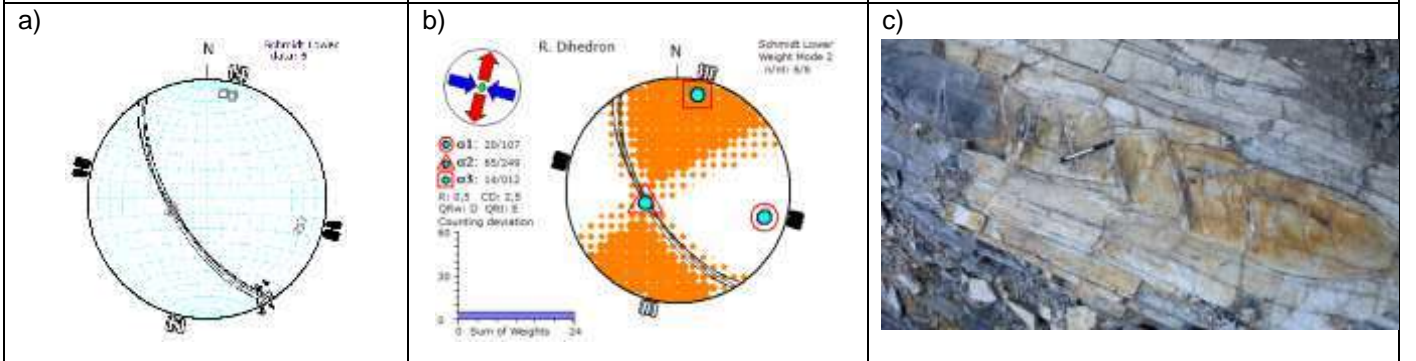




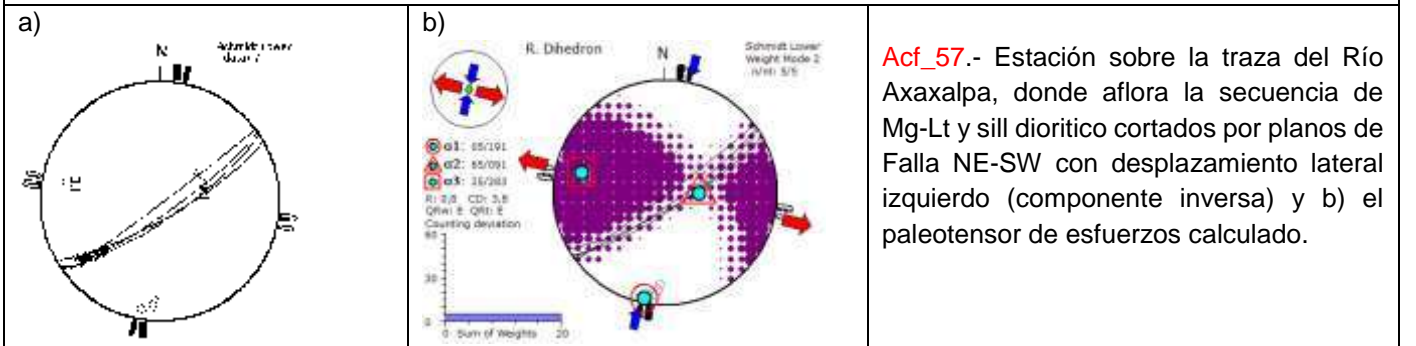
**Acf\_54.-** Falla inversa en secuencia Cz-Lu; a) estereograma con datos de campo; b) solución de tensor de esfuerzos y c) fotografía de estación estructural.



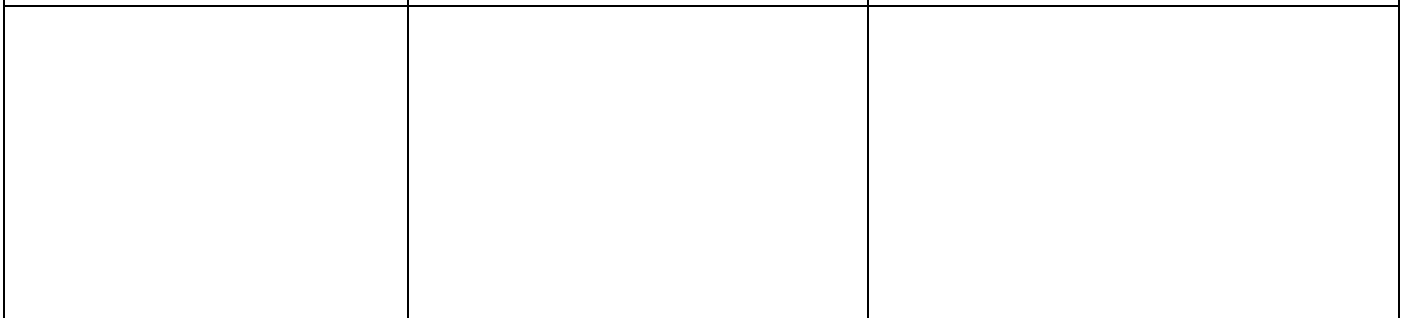
**Acf\_56.-** Corrimientos capa a capa sobre secuencias margas-Lutitas sobre la traza del río Axaxalpa; a) datos de campo; b) solución de esfuerzos.

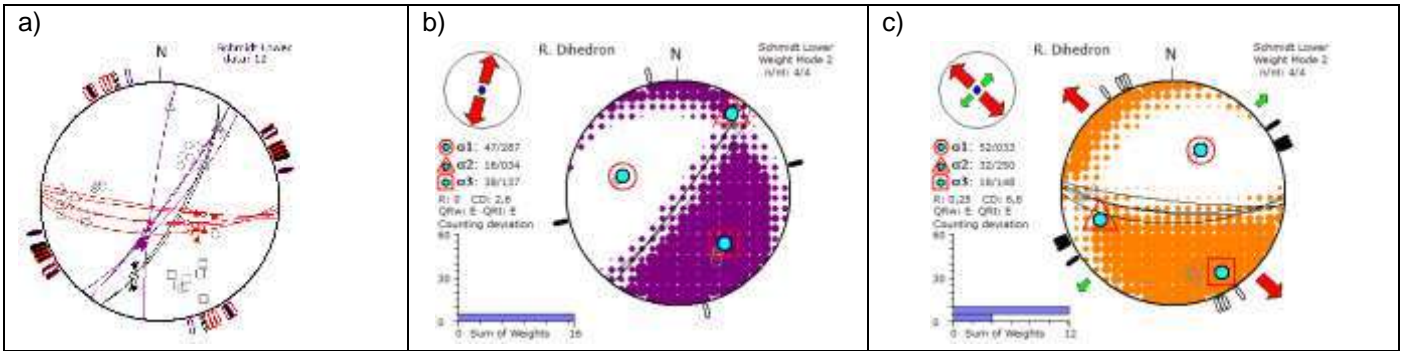


**Acf\_56 b.-** Falla lateral y fracturas de tensión con arreglo en echelón en algunos estratos, sobre la misma estación Acf\_56; a) estereograma; b) solución de esfuerzos y c) imagen de estación de fracturas sistemáticas.

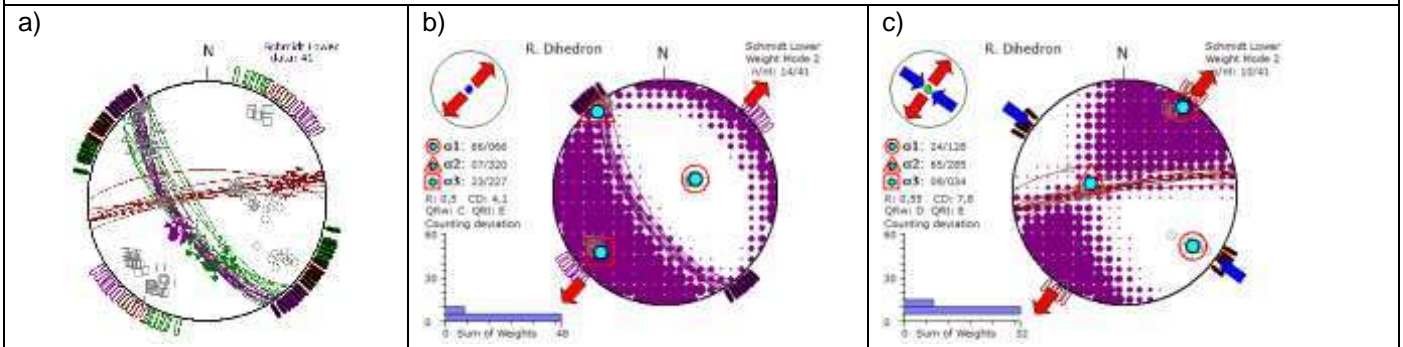


**Acf\_57.-** Estación sobre la traza del Río Axaxalpa, donde aflora la secuencia de Mg-Lt y sill diorítico cortados por planos de Falla NE-SW con desplazamiento lateral izquierdo (componente inversa) y b) el paleotensor de esfuerzos calculado.

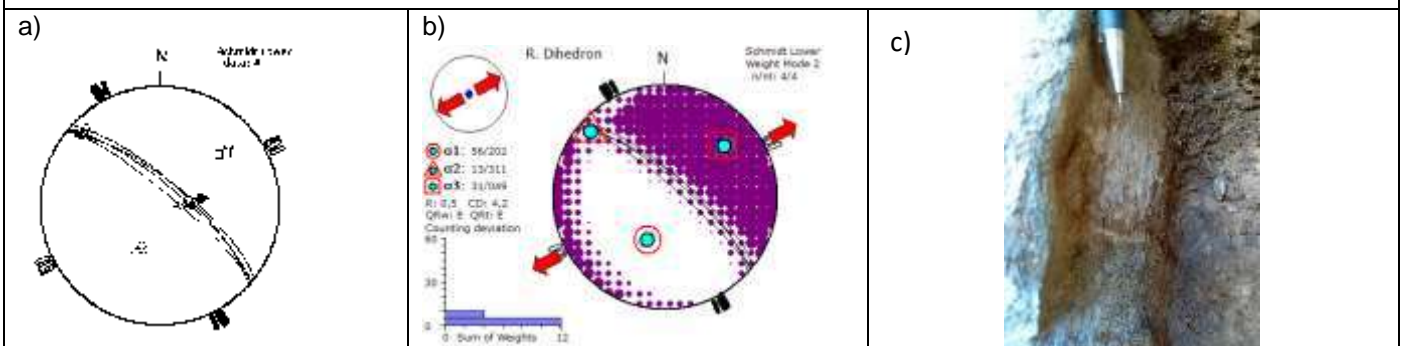




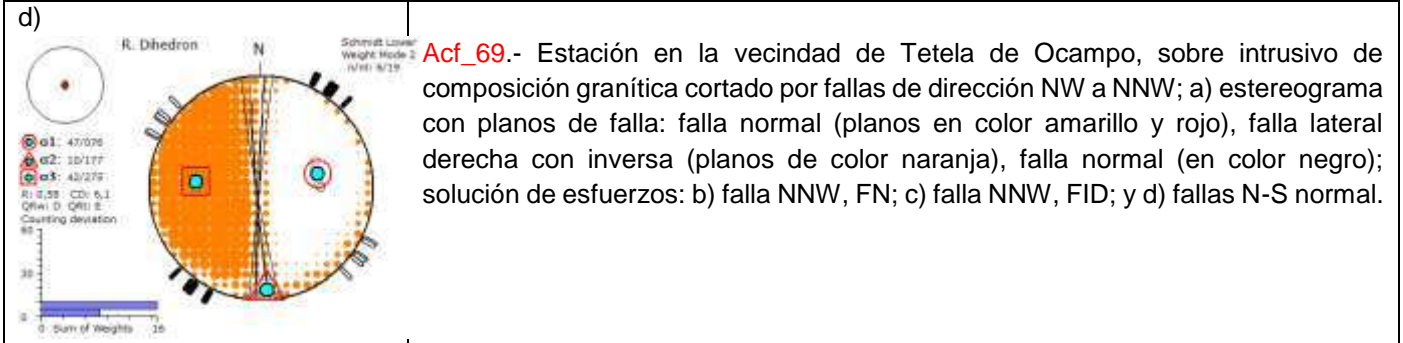
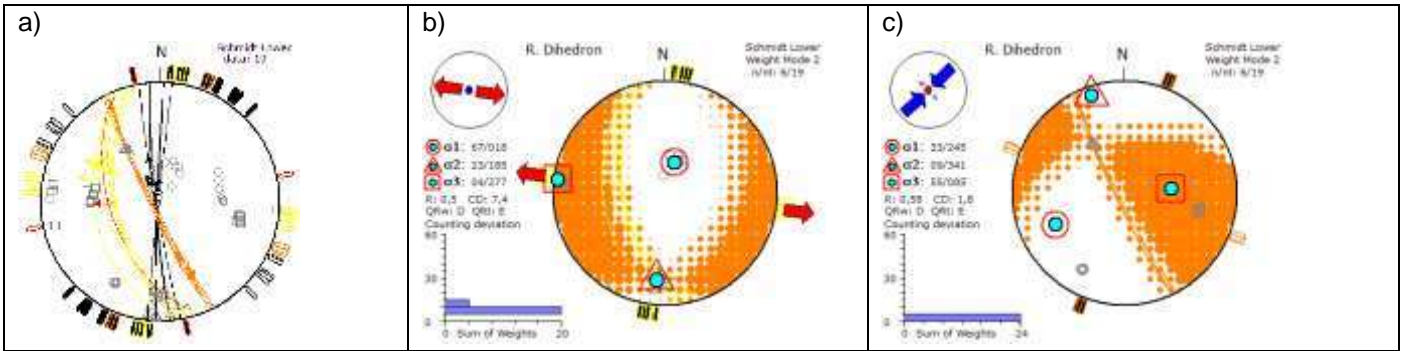
Acf\_59.-Estacion en la vecindad de Aquixtla sobre lavas basálticas afectadas por fallas NW-SE y NE-SW; a) estereogramas con planos de fallas; solucion de esfuerzos: b) Falla NE-SW FLD con componente normal; c) planos ~E-W FNI.



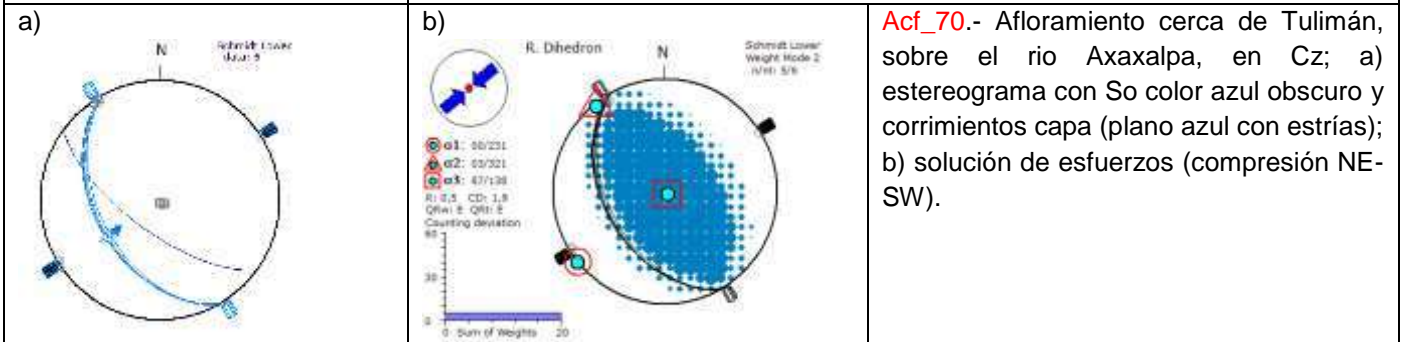
Acf\_60.- Estación estructural en banco de material, donde afloran Basaltos del basamento, fallamiento de dirección NE-SW y NW-SE; a) estereograma con separación de fallas de acuerdo a su cinemática, b) Fallas NW-SE con estrías verticales y desplazamiento netamente normal, producto de la extensión NE-SW, c) fallas NE, con cinemática lateral derecha, d) fallas NW-SE con desplazamiento normal con componente lateral derecho; e) imagen de estrías en plano NW-SE.



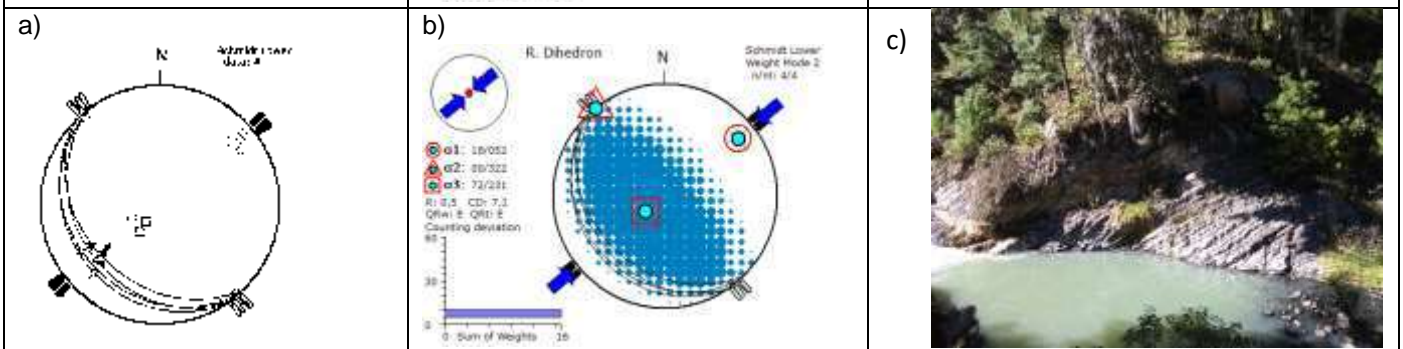
Acf\_65.- Estación cerca de la carretera Aquixtla-Tetela, cortando basaltos (Acf\_43); a) planos de falla NW-SE con movimiento normal y componente lateral derecha, b) paleotensor calculado con SHmin de dirección NE-SW; c) imagen de estrías de falla.



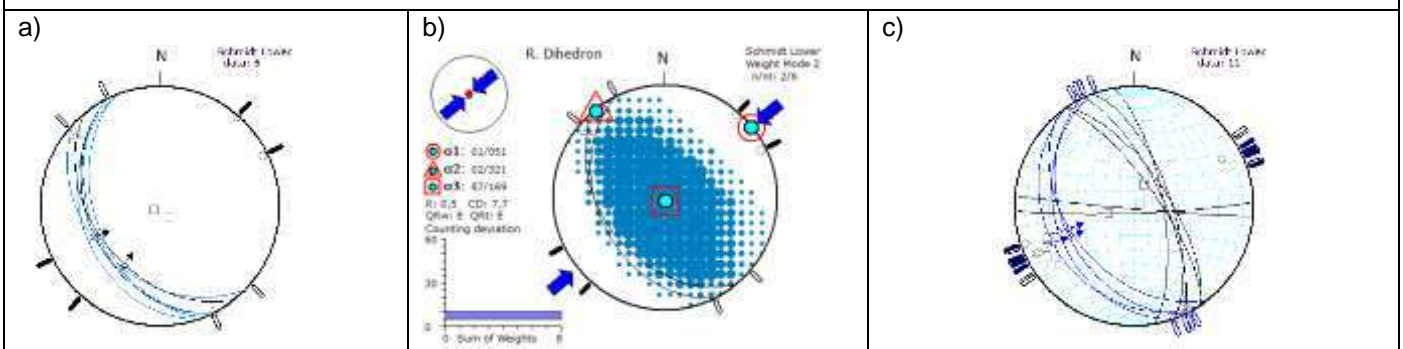
**Acf\_69.-** Estación en la vecindad de Tetela de Ocampo, sobre intrusivo de composición granítica cortado por fallas de dirección NW a NNW; a) estereograma con planos de falla: falla normal (planos en color amarillo y rojo), falla lateral derecha con inversa (planos de color naranja), falla normal (en color negro); solución de esfuerzos: b) falla NNW, FN; c) falla NNW, FID; y d) fallas N-S normal.



**Acf\_70.-** Afloramiento cerca de Tulimán, sobre el río Axaxalpa, en Cz; a) estereograma con So color azul oscuro y corrimientos capa (plano azul con estrías); b) solución de esfuerzos (compresión NE-SW).

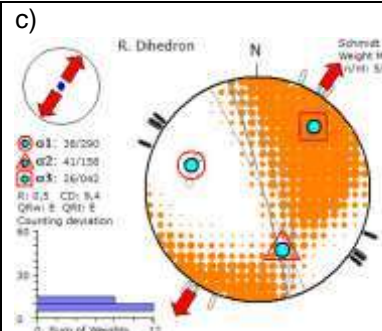
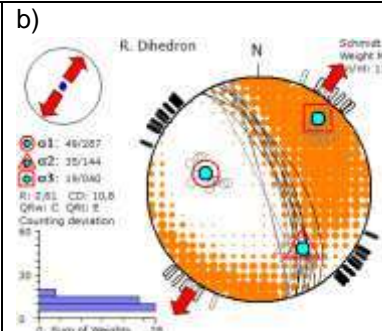
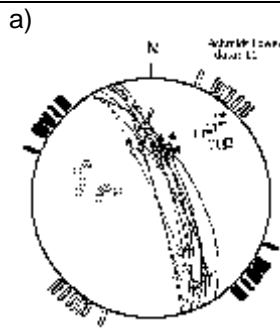


**Acf\_71.-** Afloramiento sobre rocas estratificadas, secuencia de Cz-Lu, afectada por falla inversa; a) estereograma; b) solución de esfuerzos; c) afloramiento.

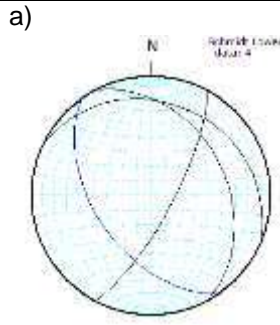




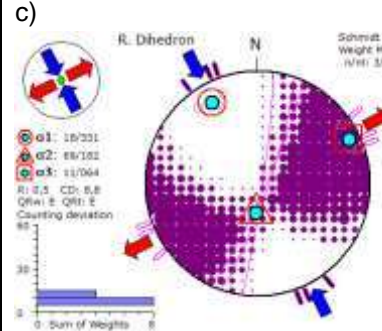
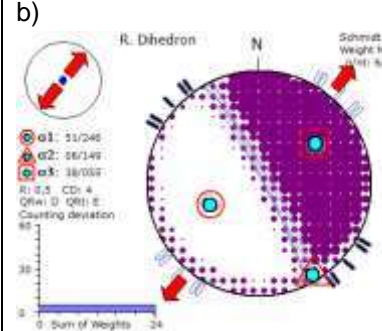
**Acf\_72.-** Estación sobre secuencia de Mg-Lu, a) planos de estratificación y corrimientos capa-capa; b) solución de esfuerzos; c) corrimientos capa a capa y sistemas de fracturas sistemáticas (color negro) relacionadas con la deformación plicativa.



**Acf\_76.-** Estación al interior del HCh, sobre flujo piroclástico de color café claro, cortada por fallas NW-SE; a) estereograma con planos de falla, falla normal (planos en color negro) falla lateral izquierda con componente normal (estrías oblicuas en color gris); soluciones de esfuerzos: b) FN y c) FLI.



**Acf\_77.-** Estación estructural sobre F. Mendez; a) estereograma con fracturas sistematicas observadas en afloramiento (planos de color negro) y estratificación (plano de color azul); b) afloramiento.

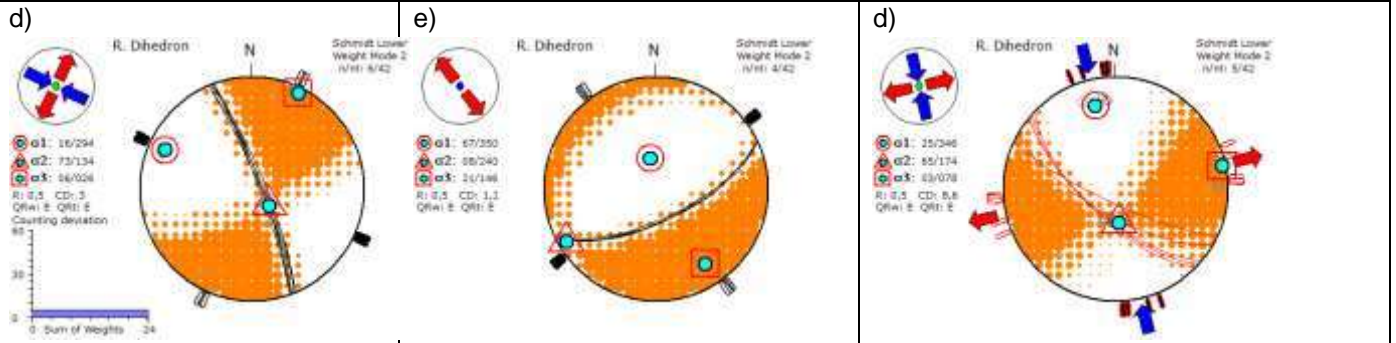
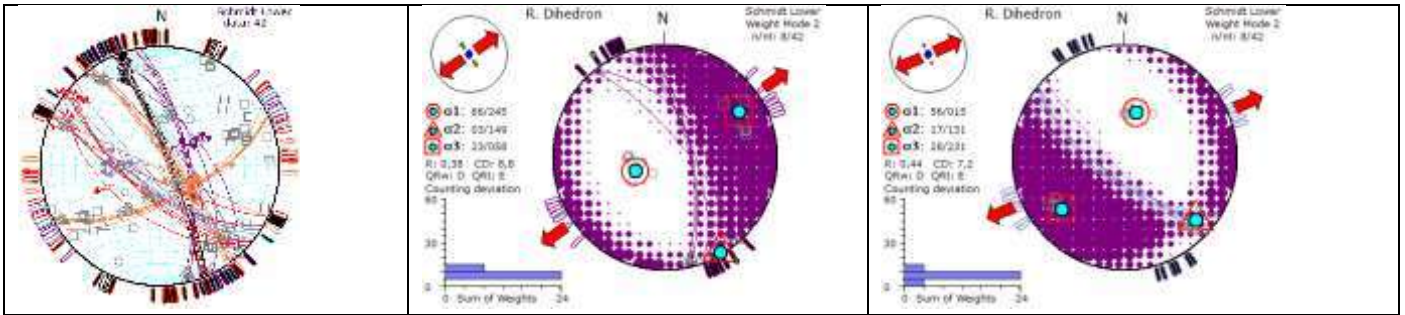


**Acf\_81.-** Afloramiento sobre flujo piroclástico de color ocre, sobre el rio Axaxalpa, se observaron fallas NW-SW; a) estereograma falla normal NW-SW (planos de color de morado); fallas NNE-SSW, lateral izquierda (color rosa) y normal (negro); solución de esfuerzos para: b) falla NW normal; c) fallas NE lateral; así como fotografía de estrías verticales en plano NW-SE.

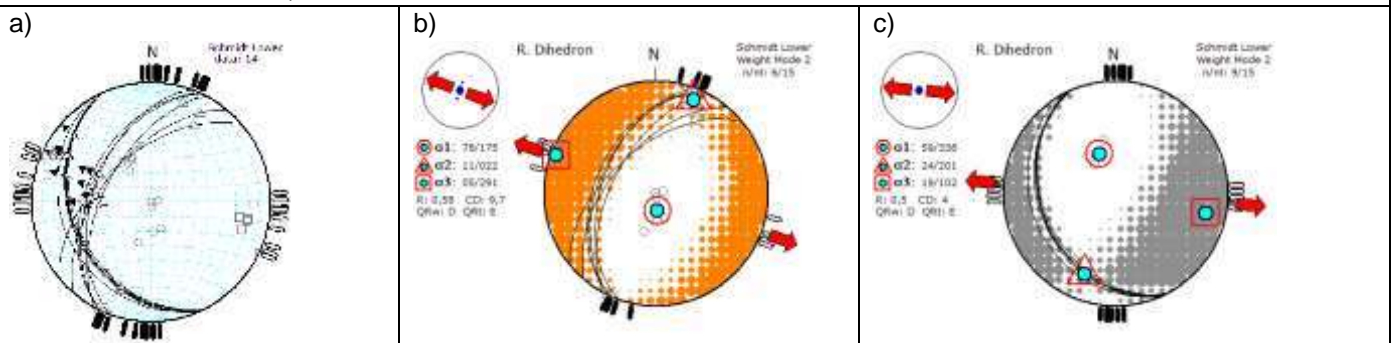
a)

b)

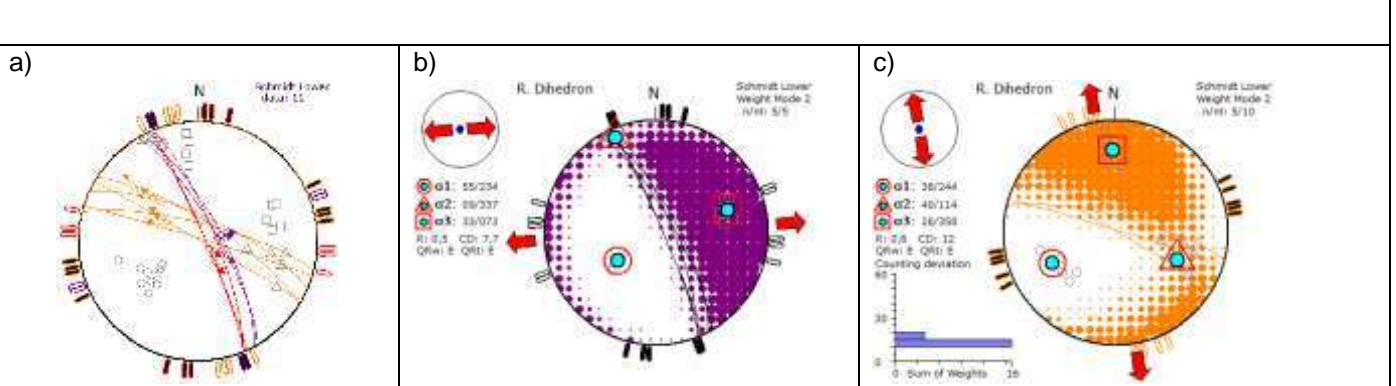
c)



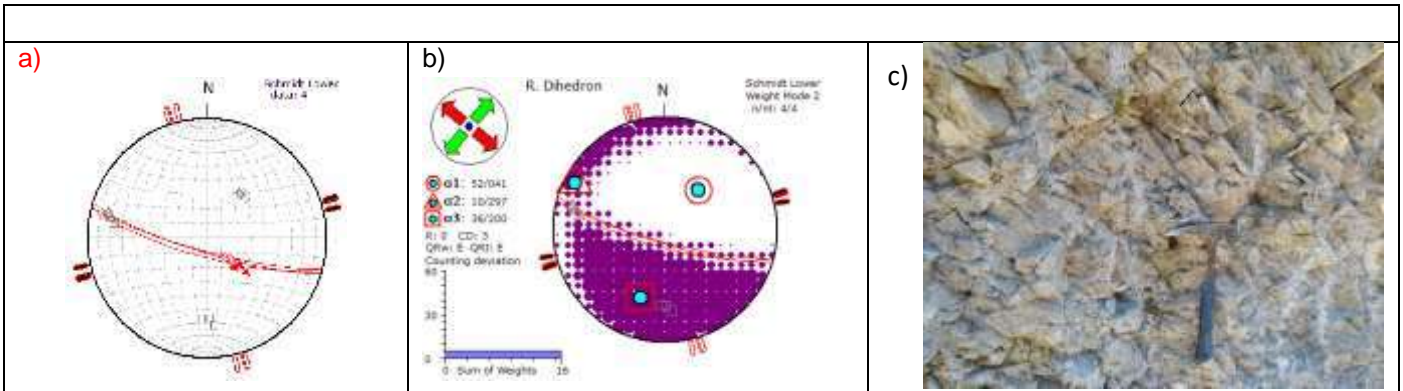
**Acf\_82.-** Afloramiento sobre el río Axaxalpa, en basaltos muy vesiculados, afectados por fallas NW-SE y en menor proporción NE-SW: a) estereograma con datos de campo; fallas NW-SE normales (planos color morado) y solución en b); NW-SE con movimiento normal con componente lateral derecha (planos de color azul) y solución de esfuerzos c); NW-SE con movimiento lateral izquierdo (planos en color negro) y solución de esfuerzos d); fallas NE normal (líneas anaranjadas) y solución de esfuerzos calculado e); fallas NW-SE lateral derecha (planos en color rojo) y solución de esfuerzos d).



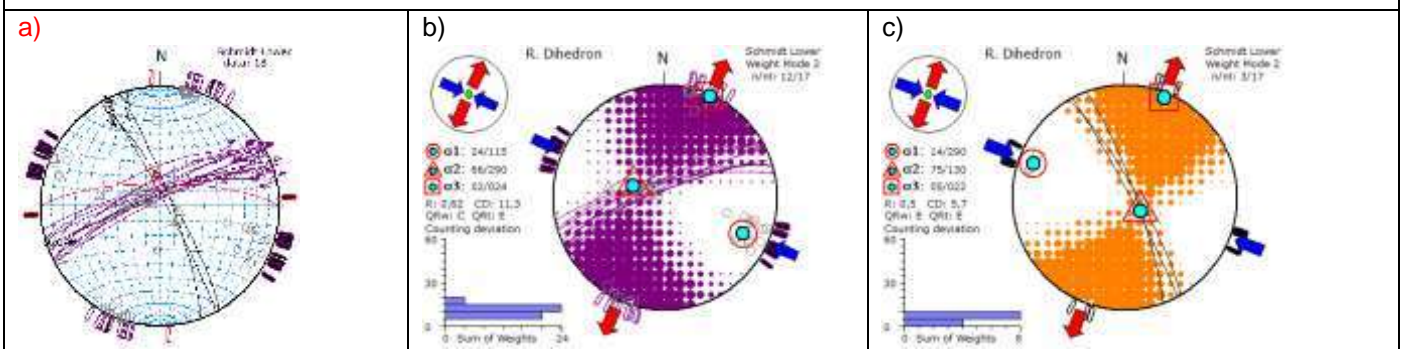
**Acf\_83.-** Afloramiento sobre el río Axaxalpa sobre flujos piroclásticos cortados por fallas NW-SE y NNE-SSW; a) estereograma con datos de campo; solución de esfuerzos: b) fallas NE-SW normal y c) planos NW-SE lateral derecha.



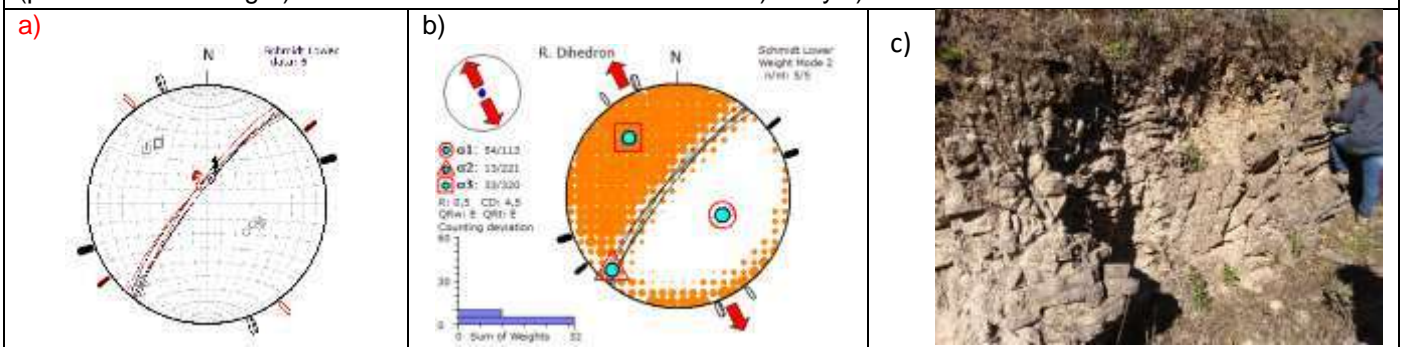
**Acf\_88.-** Estacion sobre lavas andesítico-basáltica al interior del HCh, donde se han observado fallas NW-SE; a) estereograma con datos de campo; fallas normales (planos en morado), normal con componente derecho (rojo) y solución de esfuerzos b); fallas normal con componente lateral izquierdo (estrias oblicuas, planos de color Naranja) y solución de esfuerzos c).



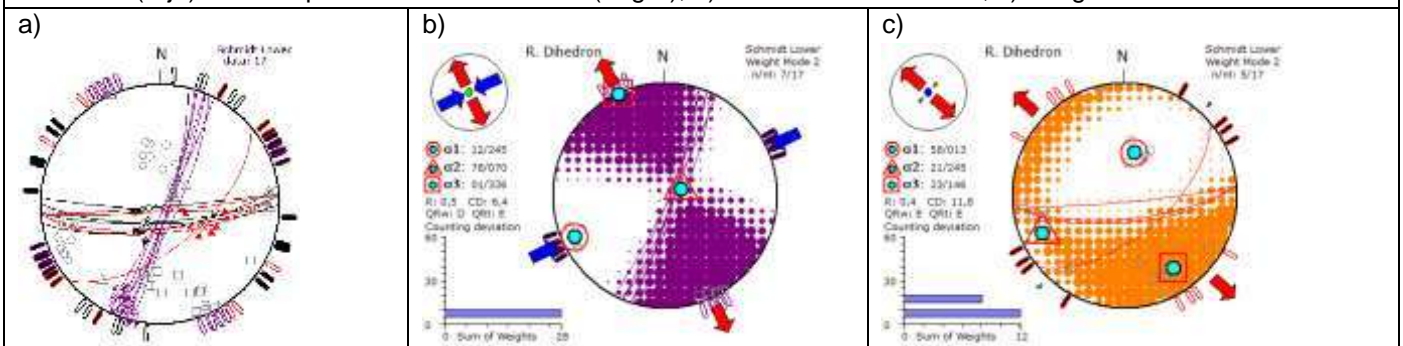
**Acf\_89.-** Estación sobre andesitas intensamente fracturadas, cortada por fallas NW-SE, FNI, a) estereograma de datos de campo; b) paleotensor calculado; c) afloramiento de unidad.



**Acf\_90.-** Estación al interior del HCh, sobre andesitas del mioceno; a) estereograma con datos de campo: fallas NE-SW con desplazamiento lateral izquierdo (planos en color morado) y normal (color rojo), NW-SE fallas lateral derecha (planos en color negro). Soluciones de esfuerzos calculados: b) FLI y c) FLD.



**Acf\_96.-** Afloramiento sobre andesitas al interior del HCh, cortadas por fallas NE-SW; a) estereogramas Fallas NE normales (rojo) con componente lateral derecha (negro); b) solución de esfuerzos; c) fotografía de afloramiento.

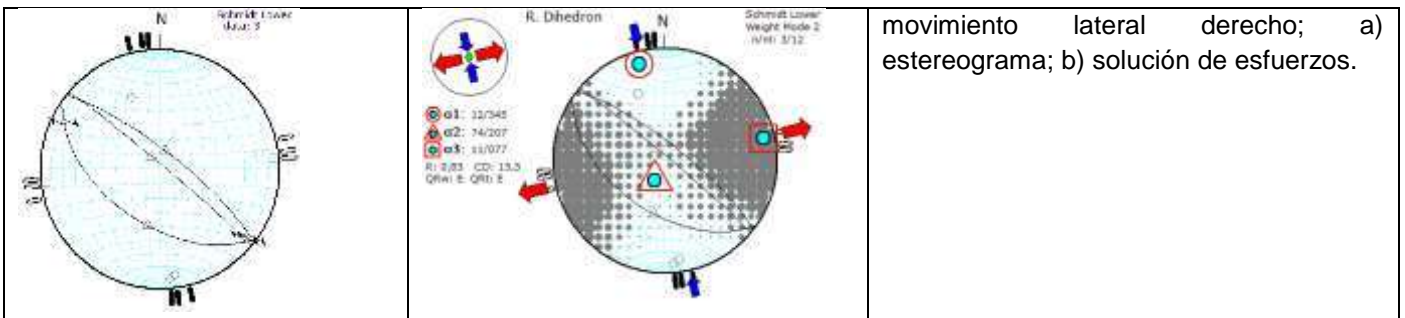


**Acf\_97.-** Falla en andesitas al interior del HCh, a) estereograma NE-SW lateral derecha, solución de esfuerzos calculada b); fallas ~E-W normal con componente lateral izquierda (planos en color rojo) y normal con componente lateral derecha (planos en color negro), solución de esfuerzos para FNI.

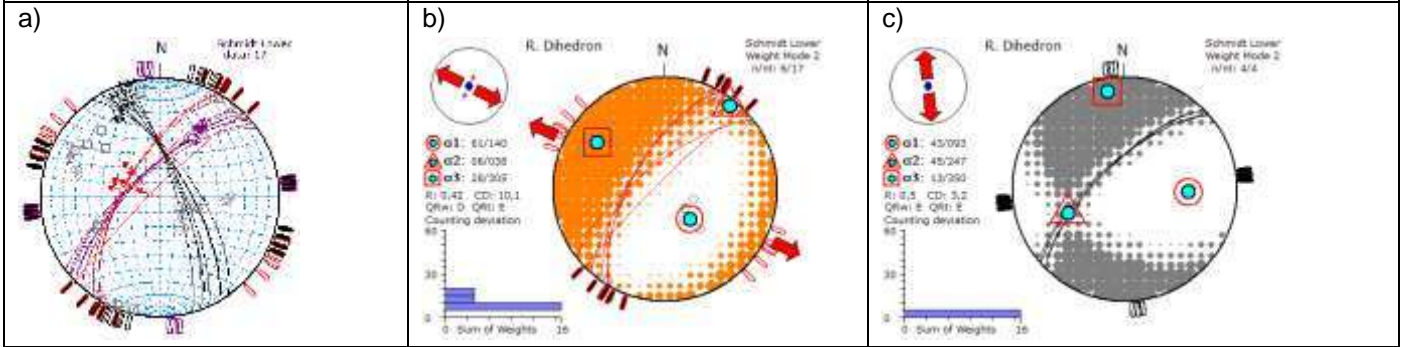
a) b)



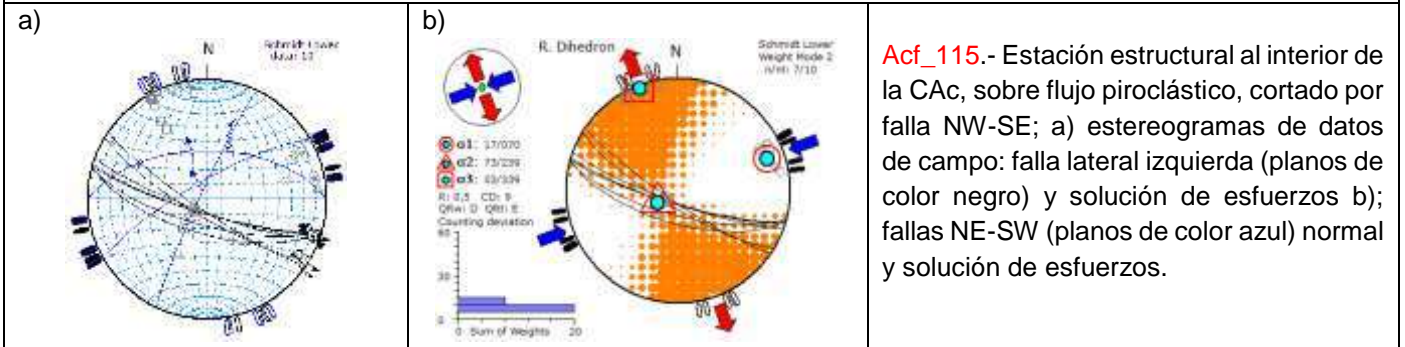
<p>Acf_100.- Estación estructural en la vecindad de Chignahuapan, sobre calizas</p>		
<p>a)</p>	<p>b)</p>	<p>Acf_102.- Estación en corte de carretera sobre secuencia Cz-Lu, pliegues chevron, cortada por falla NNW-SSE: a) estereograma y b) solución de esfuerzos.</p>
<p>a)</p>	<p>b)</p>	<p>Acf_107.- Estación sobre flujo piroclástico cortados por fallas NW-SE lateral izquierda con componente normal (estrías oblicuas)</p>
<p>a)</p>	<p>b)</p>	<p>Acf_108.- Estación sobre lavas de composición dacítica, cortada por fallas NW-SW normal con componente lateral derecho</p>
<p>a)</p>	<p>b)</p>	<p>Acf_111.- Estación estructural sobre andesitas (2.6 Ma), al interior de la CAC afectada por falla NNW-SSE: fallas laterales derechas y fallas normales con componente lateral derecha (estrías oblicuas)</p>
<p>a)</p>	<p>b)</p>	<p>Acf_112.- Estación al interior de la CAC, sobre unidad intensamente alterada, disectada por planos de falla NW-SE con</p>



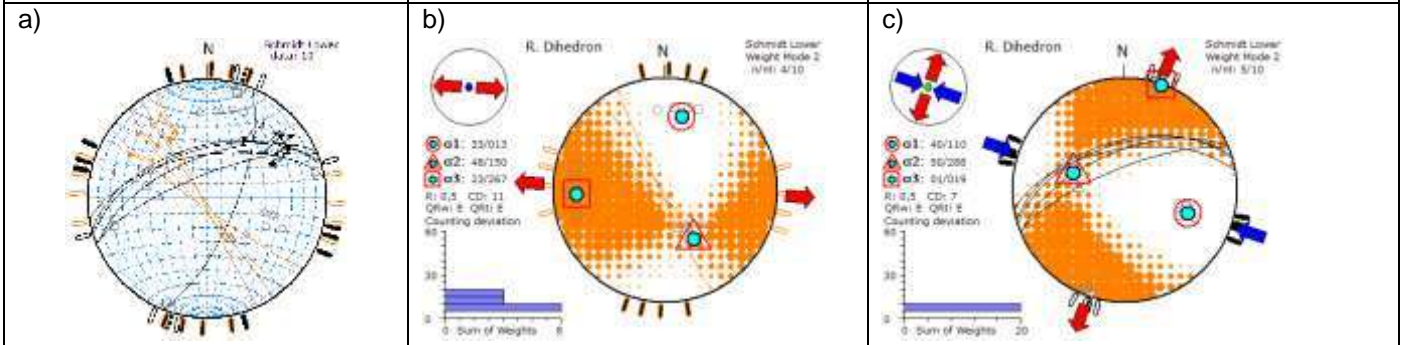
movimiento lateral derecho; a) estereograma; b) solución de esfuerzos.



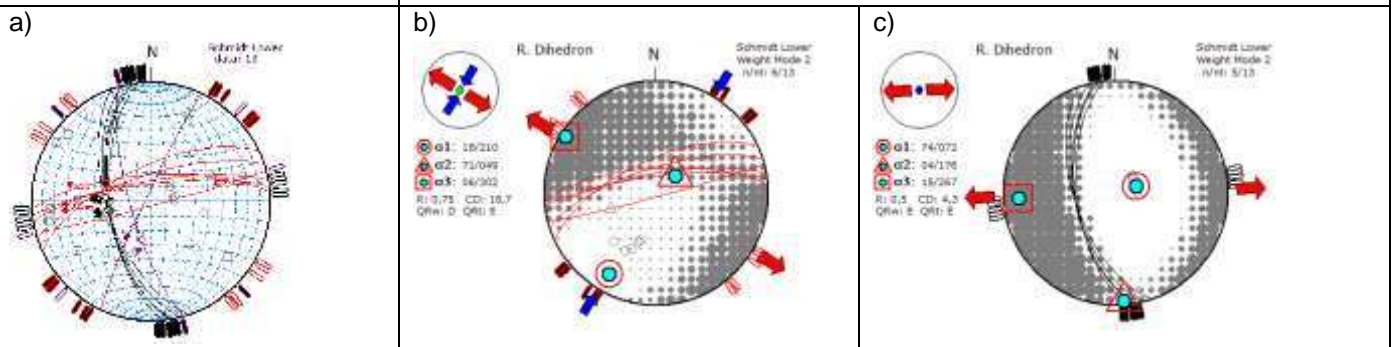
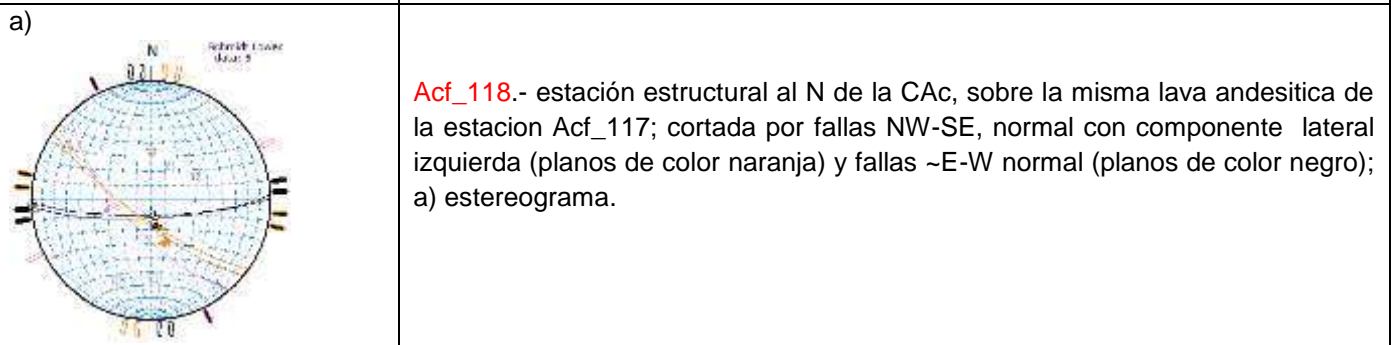
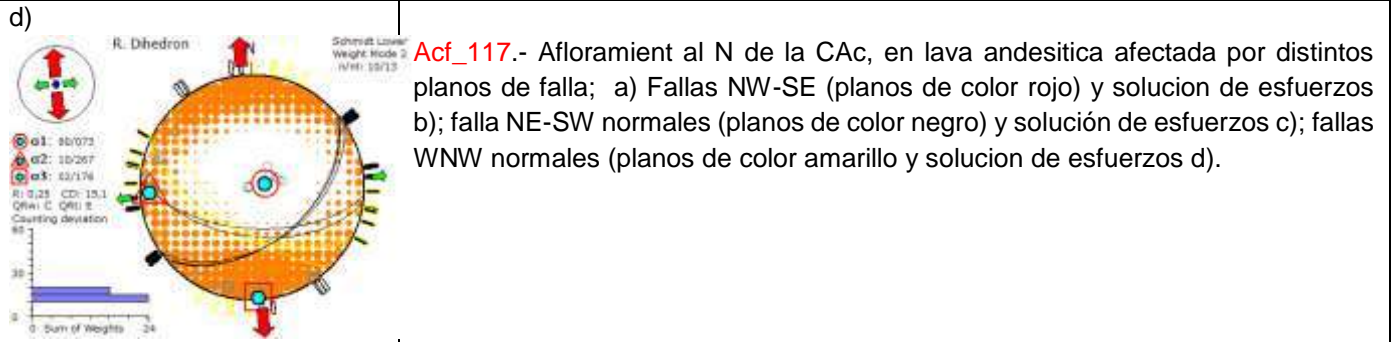
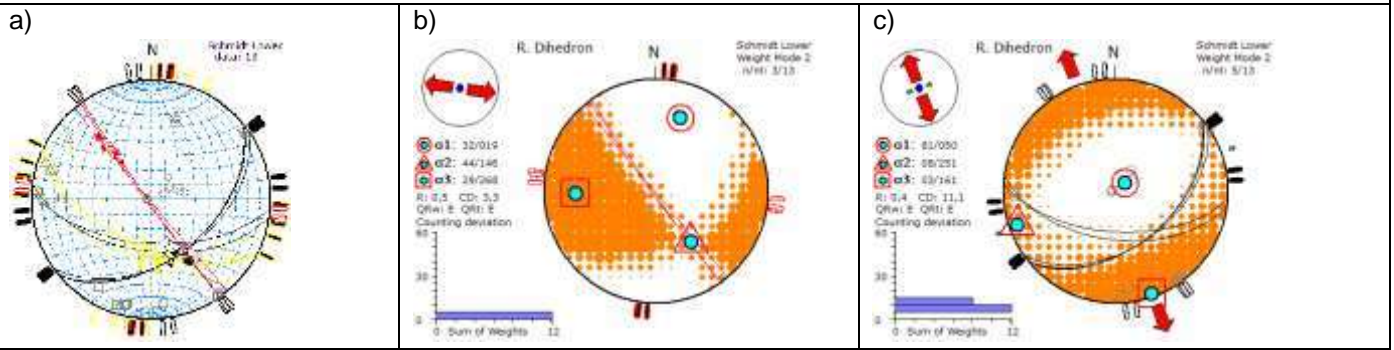
**Acf\_114.**- Estación al N de la CAC, sobre roca de estructura brechada cortada por planos de fallas de dirección NNW-SSE y NE-SW; a) planos de falla, NNW (en color negro) FLI, NE (líneas en color rojo) FN, NE (líneas en color morado) FLD; b) solución para FN NE-SW; c) tensor de esfuerzos calculado para fallas NE-SW laterales y d) tensor de esfuerzos para fallas NNW-SSE (como fallas de transferencia).



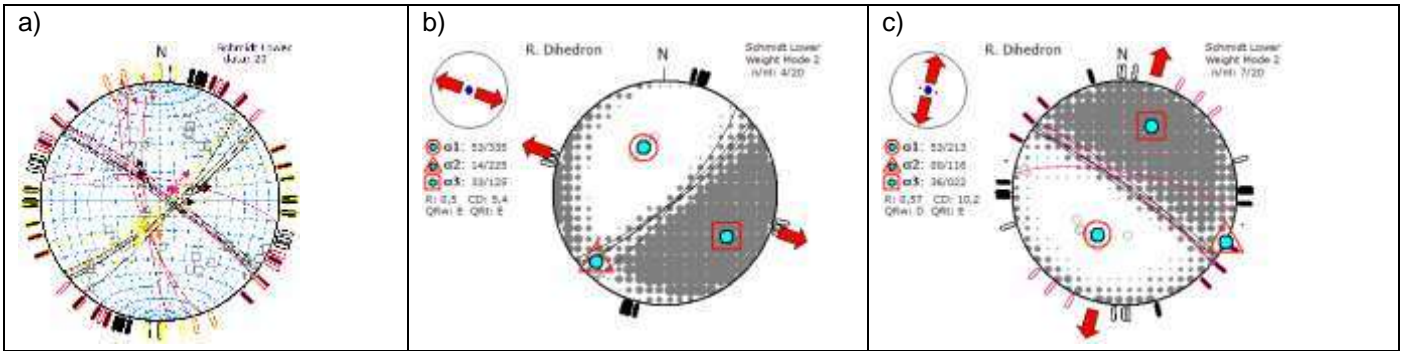
**Acf\_115.**- Estación estructural al interior de la CAC, sobre flujo piroclástico, cortado por falla NW-SE; a) estereogramas de datos de campo: falla lateral izquierda (planos de color negro) y solución de esfuerzos b); fallas NE-SW (planos de color azul) normal y solución de esfuerzos.



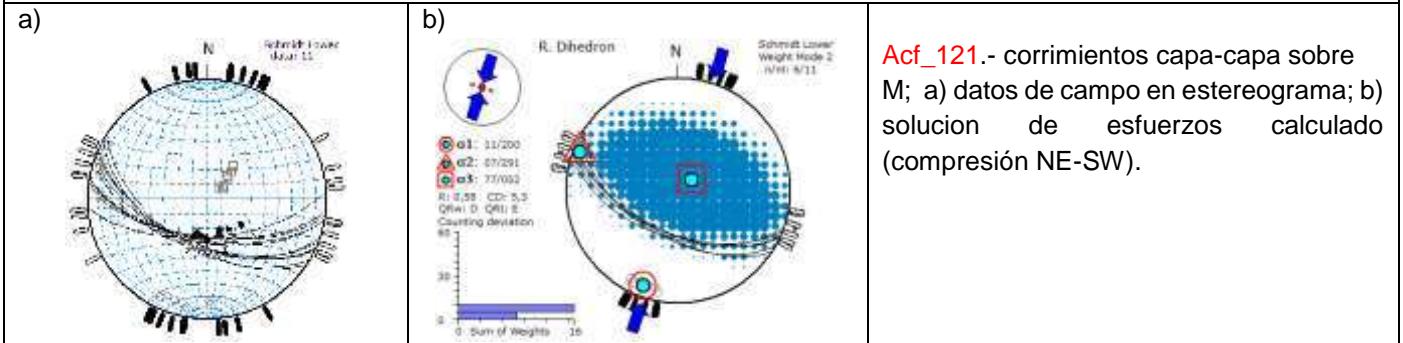
**Acf\_116.-** Estación al interior de la CAC a unos 60 m del punto anterior, sobre la misma unidad la cual es disectada por fallas NE y NW; a) estereograma de datos de campo: fallas NE-SW (FND) (planos de color negro), NW-SE (FND) (planos en color naranja); soluciones de esfuerzos: b) planos NW-SE y c) planos NE-SW.



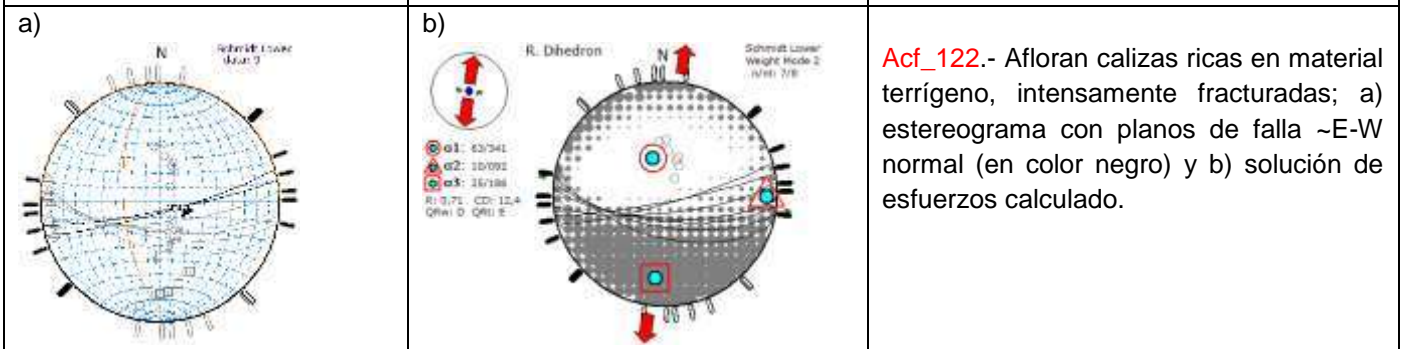
**Acf\_119.-** Estacion a norte de la CAC sobre misma unidad de la estacion anterior; cortada por falla NNW-SSE, planos ENE-WSW; a) estereograma planos NNW-SSE normal (en color negro), falla ENE-WSW FLI (en color rojo); soluciones de esfuerzos: b) fallas ENE y c) planos NNW.



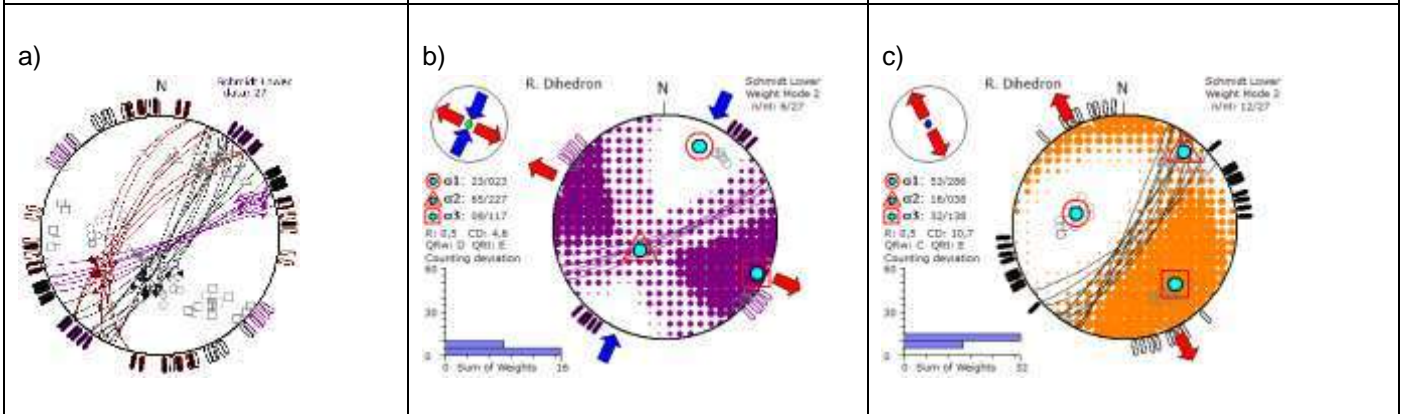
**Acf\_120.-** Estacion al N de la CAC sobre lava andesitica, a) estereograma fallas NE-SW: normal (planos de color negro), solución de esfuerzos calculados en b); FN con componente lateral derecha (en color naranja y en color amarillo); planos NW-SE; normal (planos en rosa mexicano y en negro) y solución de esfuerzos calculados en c); FLD (en color rojo).



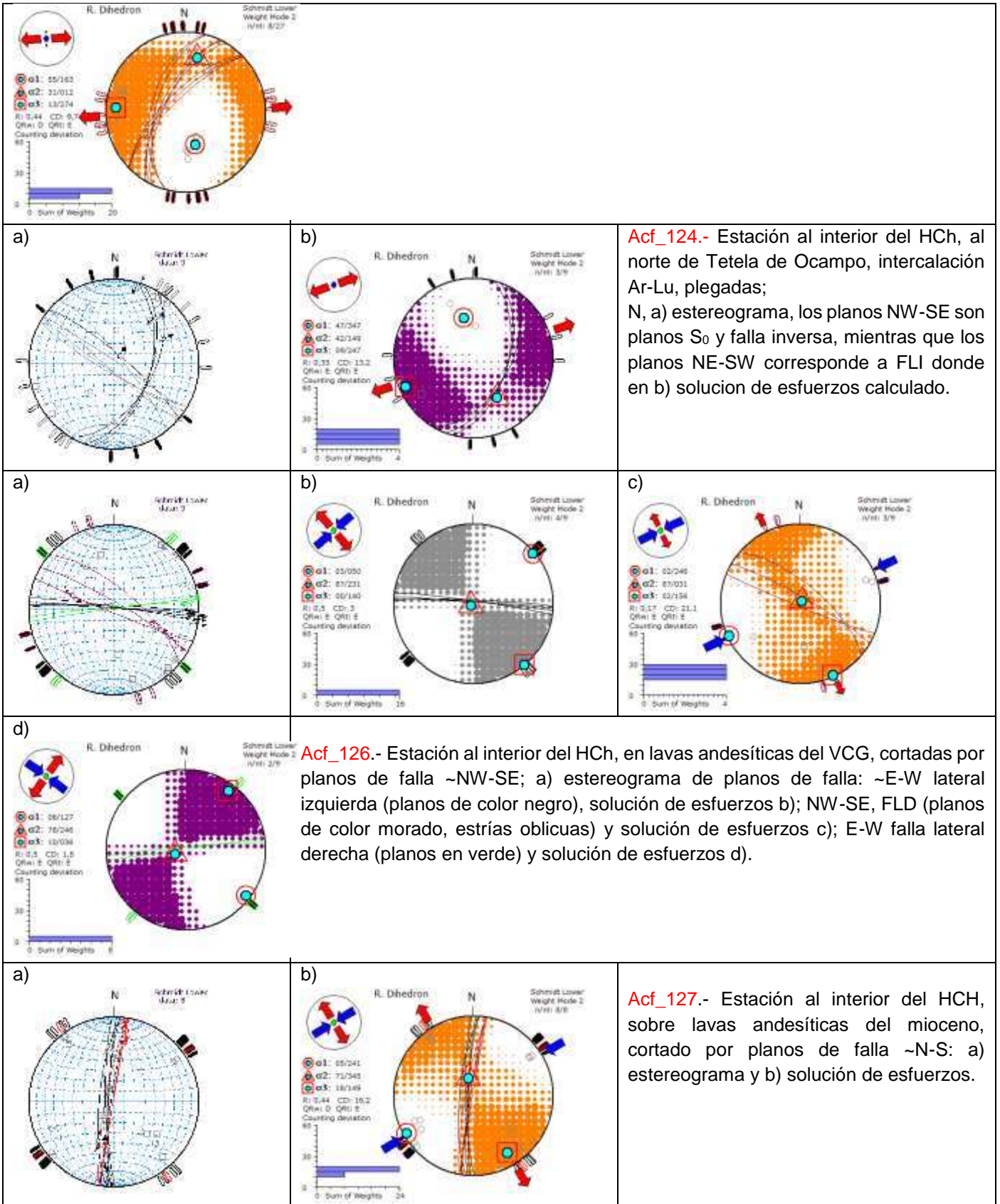
**Acf\_121.-** corrimientos capa-capa sobre M; a) datos de campo en estereograma; b) solución de esfuerzos calculado (compresión NE-SW).



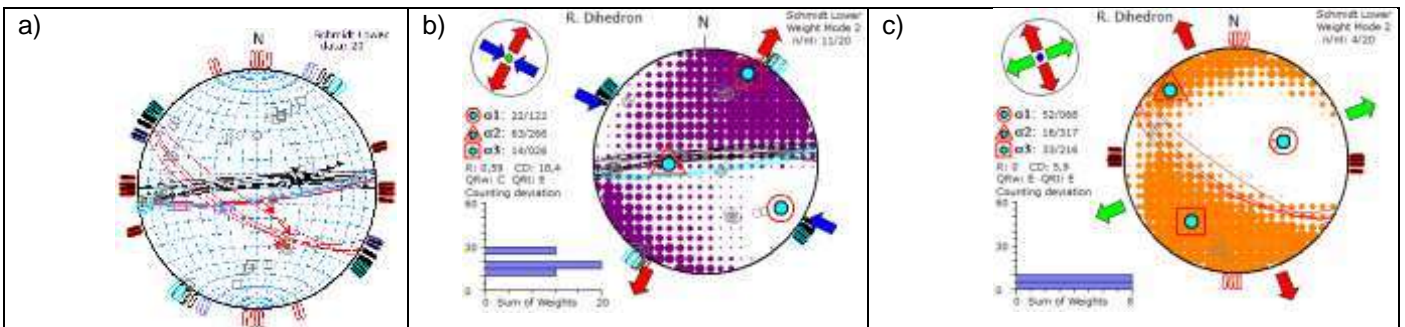
**Acf\_122.-** Afloran calizas ricas en material terrígeno, intensamente fracturadas; a) estereograma con planos de falla ~E-W normal (en color negro) y b) solución de esfuerzos calculado.



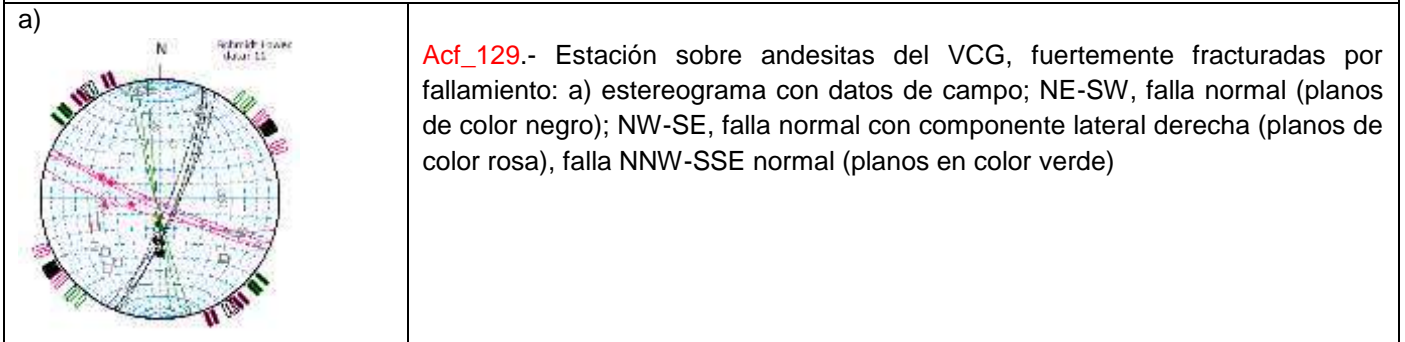
**Acf\_123.-** Afloramiento al interior del HCh en corte de carretera al norte de Tetela de Ocampo, donde aflora la secuencia de Lt-Ar; donde se identificó fallamiento de dirección NNE-SSW a NE-SW, b) fallas NE-SW con desplazamiento lateral izquierdo, c) fallas con cinemática normal con componente lateral derecha, d) normal con componente lateral derecho (estrías oblicuas).



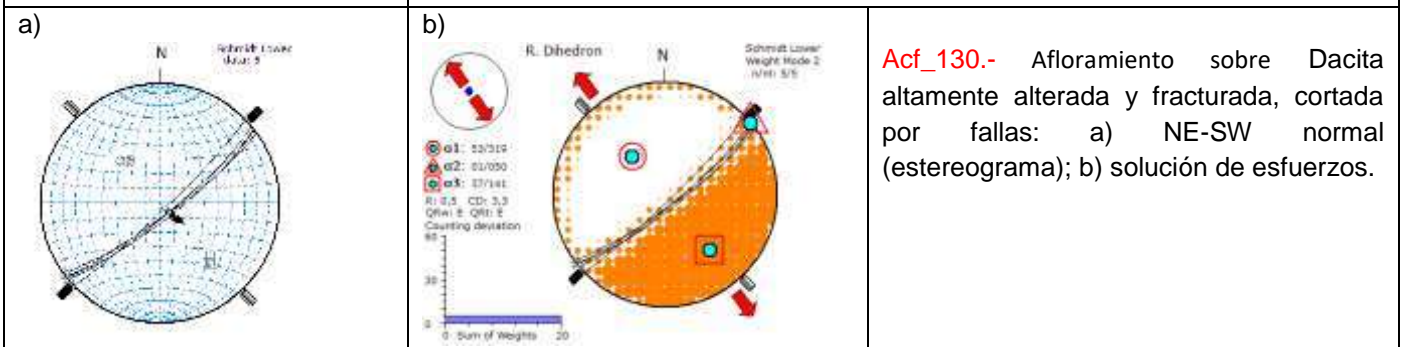




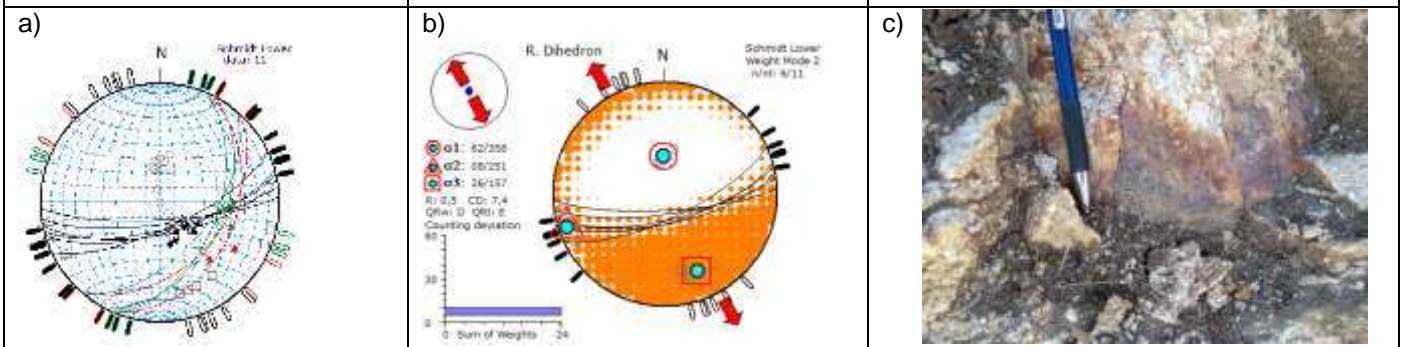
**Acf\_128.-** Afloramiento sobre andesitas del VCG, las cuales son disectadas por fallas NW-SW, ENE-WSW; a) estereograma de datos de campo: Falla norma con componente lateral izquierda de orientación NW-SE (planos en color rojo) y solución de esfuerzos en c); planos ENE; FND (planos en color negro) y FLD (e color azul)



**Acf\_129.-** Estación sobre andesitas del VCG, fuertemente fracturadas por fallamiento: a) estereograma con datos de campo; NE-SW, falla normal (planos de color negro); NW-SE, falla normal con componente lateral derecha (planos de color rosa), falla NNW-SSE normal (planos en color verde)

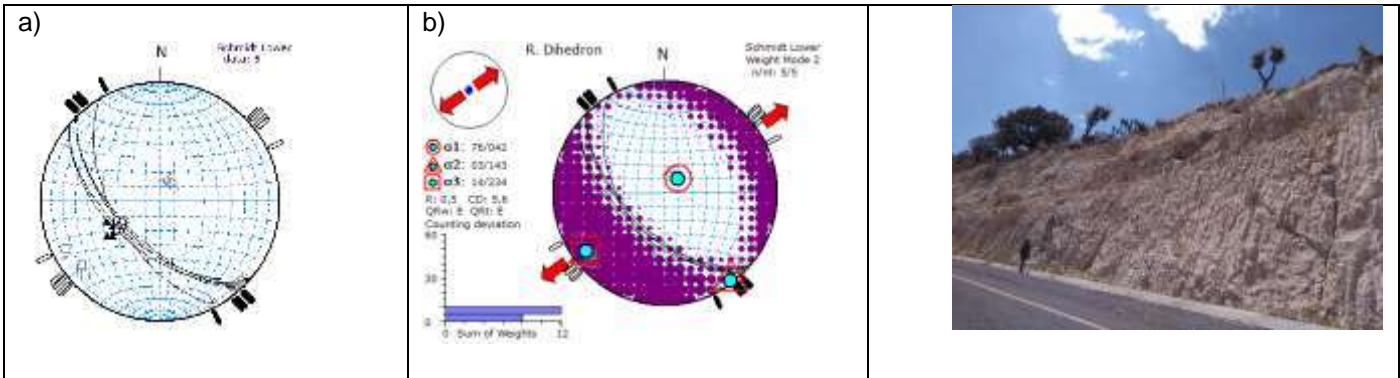


**Acf\_130.-** Afloramiento sobre Dacita altamente alterada y fracturada, cortada por fallas: a) NE-SW normal (estereograma); b) solución de esfuerzos.

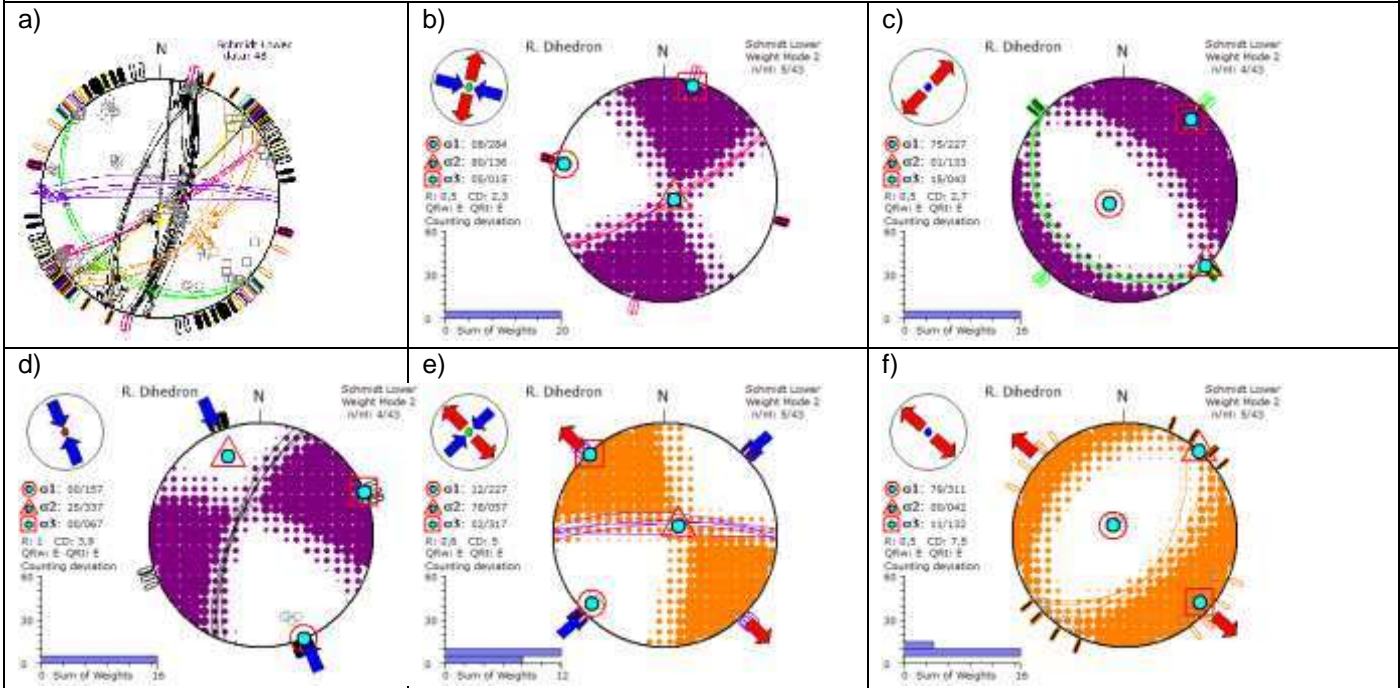


**Acf\_131.-** Estación al SE de Apan, sobre ignimbrita Matamoros, este depósito es afectado por fallas NE-SW, desplazamiento normal con componente lateral: a) estereograma, b) solución de esfuerzos y c) imagen de estrías características.

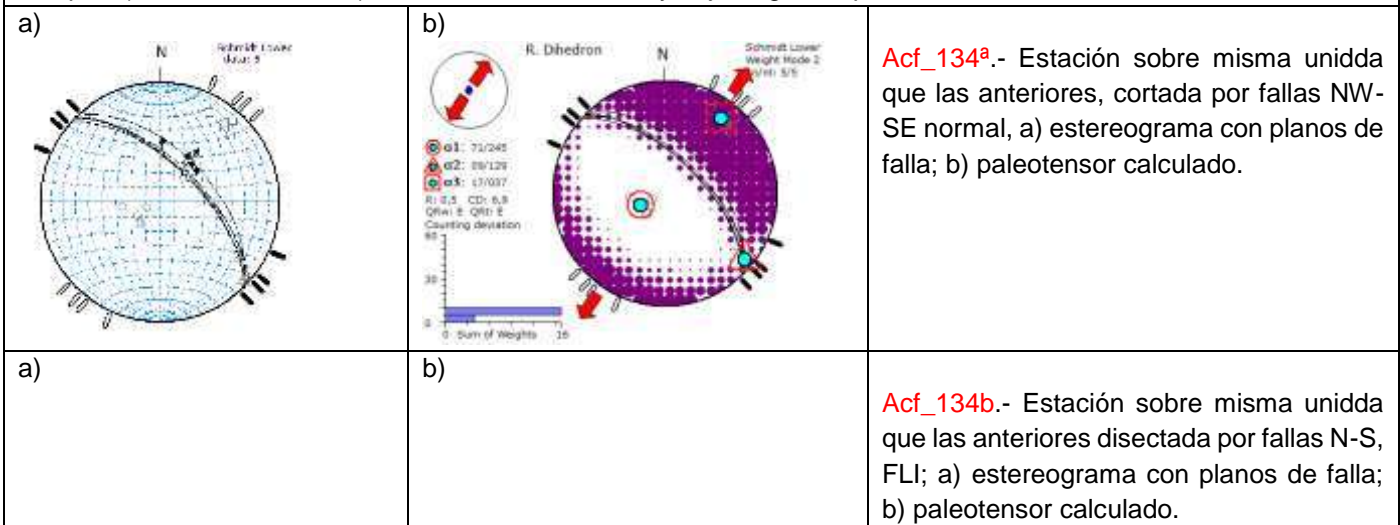
c)

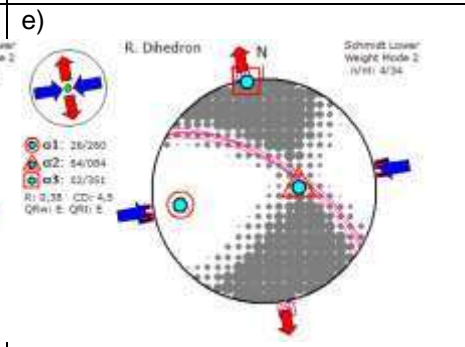
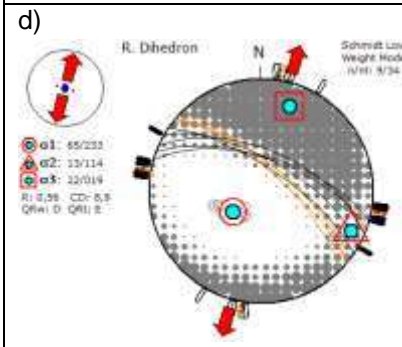
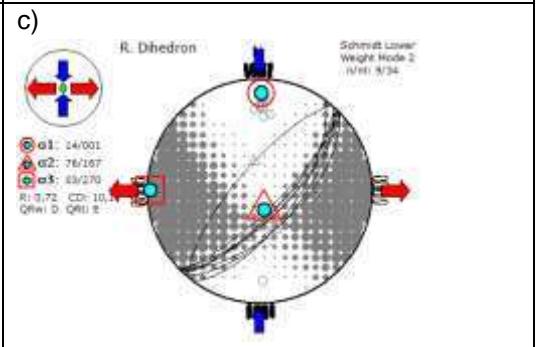
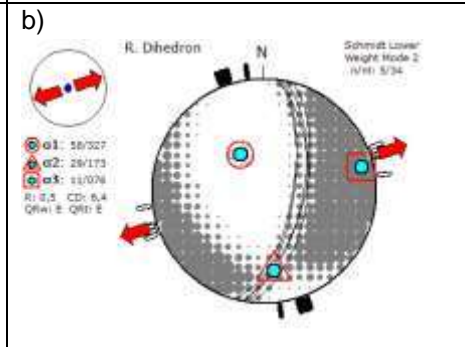
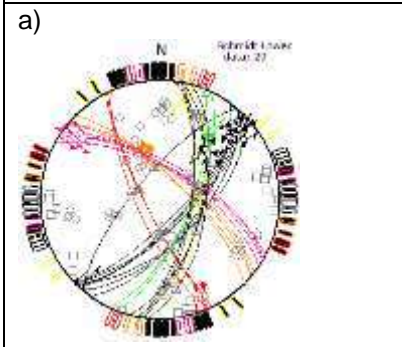
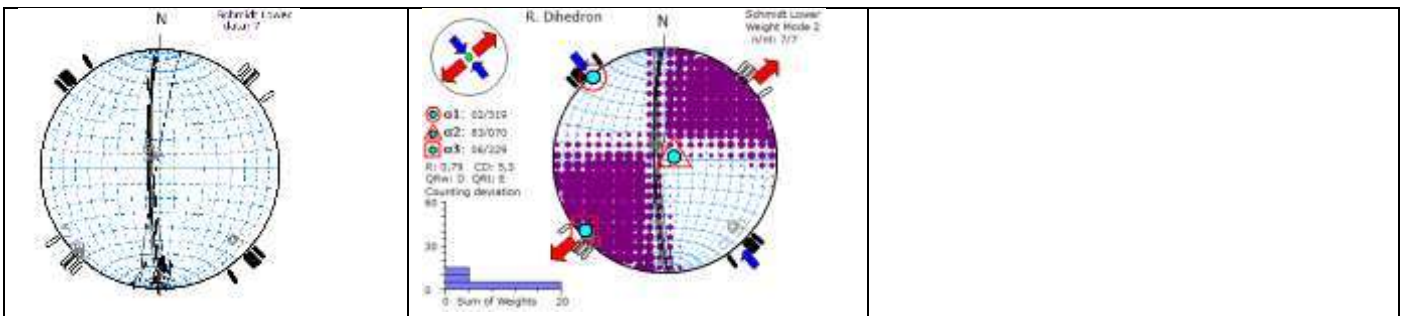


**Acf\_132.**- Estación sobre misma unidad que la anterior, donde se observaron fallas NW-SE con movimiento normal:  
 a) Estereograma; b) solución de esfuerzos y c) imagen de afloramiento.

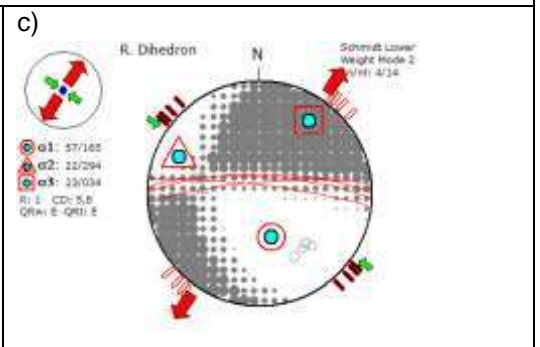
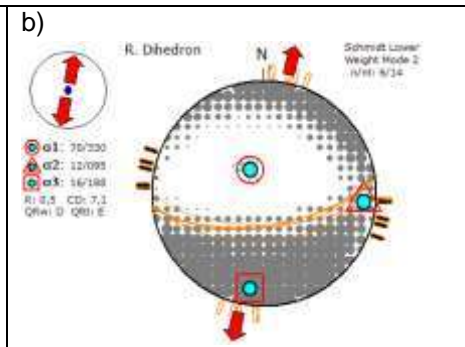
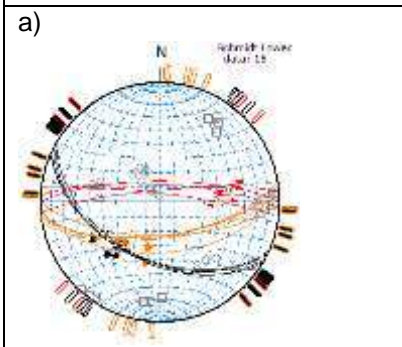


**Acf\_133.**- Estación sobre ignimbrita Matamoros, intensamente fallada y fracturada; a) planos de falla tomados en campo; b) fallas NE lateral, c) fallas NW normal de muy bajo ángulo el plano.

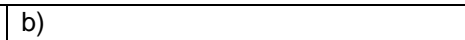


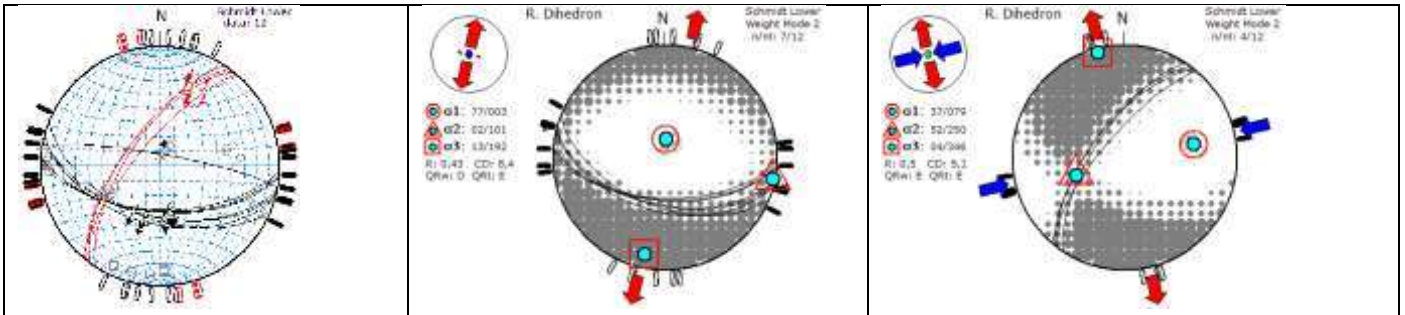


**Acf\_135.-** estaciones intracaldera, sobre unidad intensamente alterada; Fallas NE-SW (PFP); NNW-SSE (R'), NNE (R); b) y c) fallas NE-SW, b) planos de falla lateral izquierdo y c) desplazamiento normal; falla NW-SE: d) normal; e) lateral.

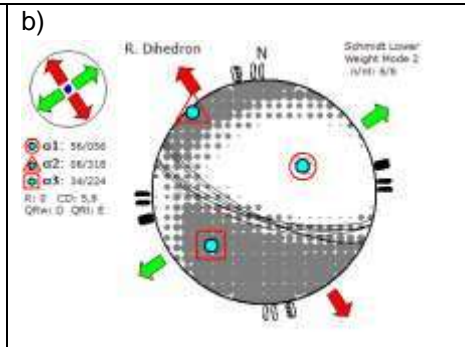
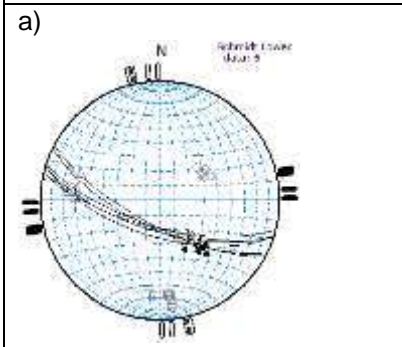


**Acf\_136.-** Estaciones al interior de la CAc, sobre flujo piroclástico cortado por fallas de orientación ~E-W; a) estereograma: Falla NW-SE normal (plano en color negro); fallas ~E-W normal (color naranja), solución de esfuerzos b); fallas ~E-W lateral derecha (en color rojo) y solución de esfuerzo c).

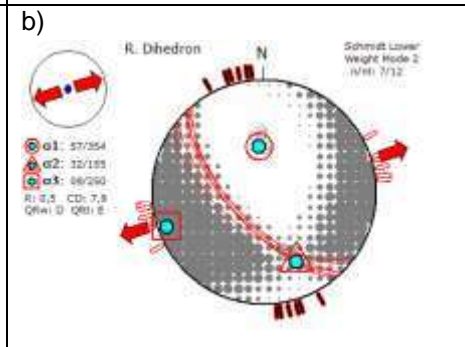
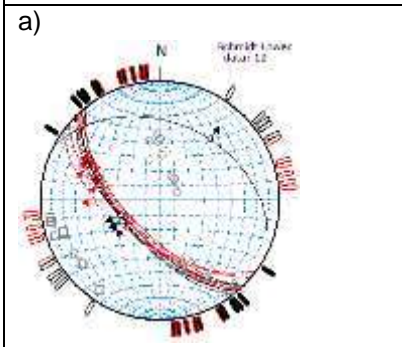




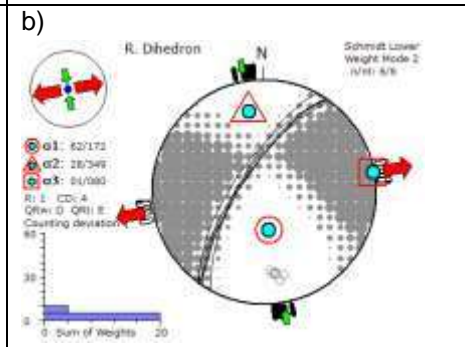
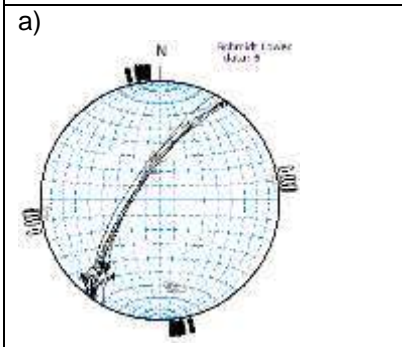
**Acf\_137.-** Estación al interior de la CAC, donde aflora andesita intensamente fracturada y alterada, disectada por fallas ~E-W y NE-SW; a) estereograma: fallas ~E-W normales (planos de color negro), solución de esfuerzos b); fallas NE-SW lateral derecha (planos en color rojo) y solución de esfuerzos c).



**Acf\_138.-** Estación al interior de la CAC, sobre flujos piroclásticos, donde se observaron planos de falla NW-SE; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.



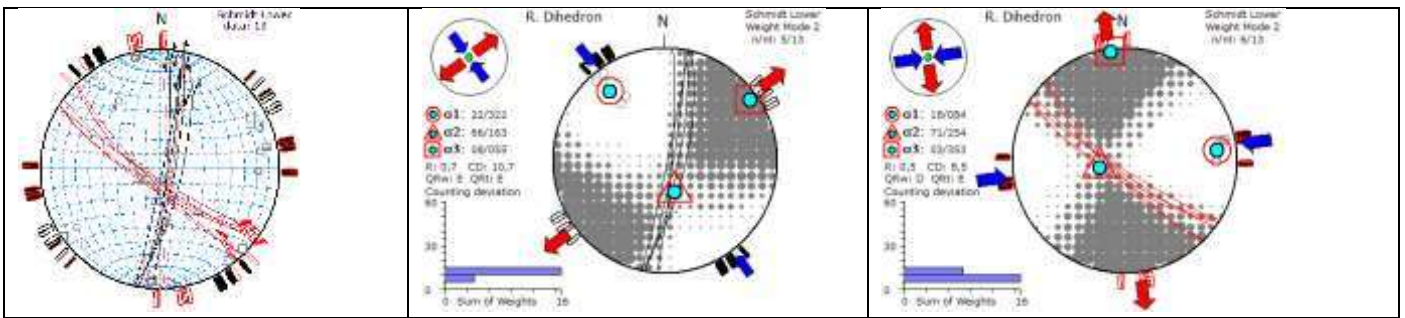
**Acf\_139.-** Estación al interior de la CAC, Fallas NW-SE; a) estereograma de datos de campo, falla normal (planos en color negro) y fallas lateral (en color rojo).



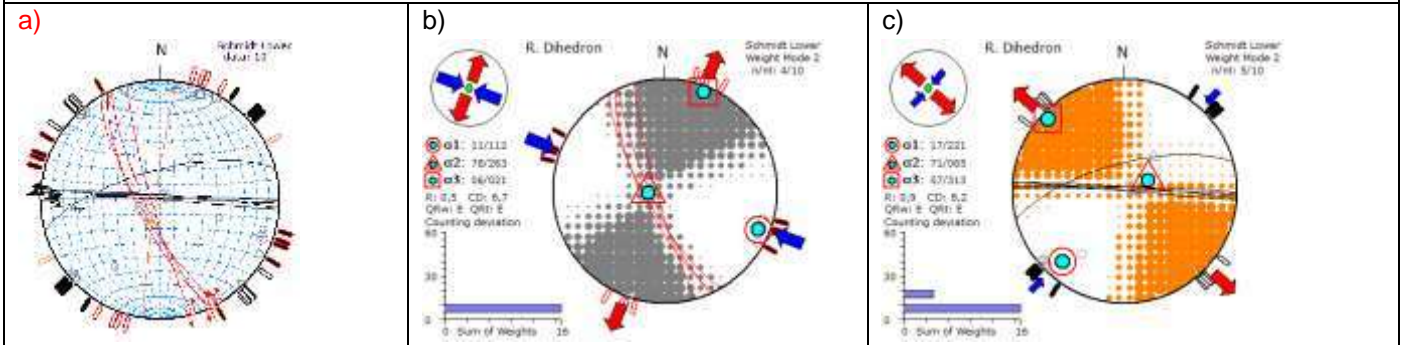
**Acf\_140.-** Estación al interior de la CAC, sobre Lacustres, cortados por falla NE-SW laterales izquierdas: a) estereograma y b) solución de esfuerzos.



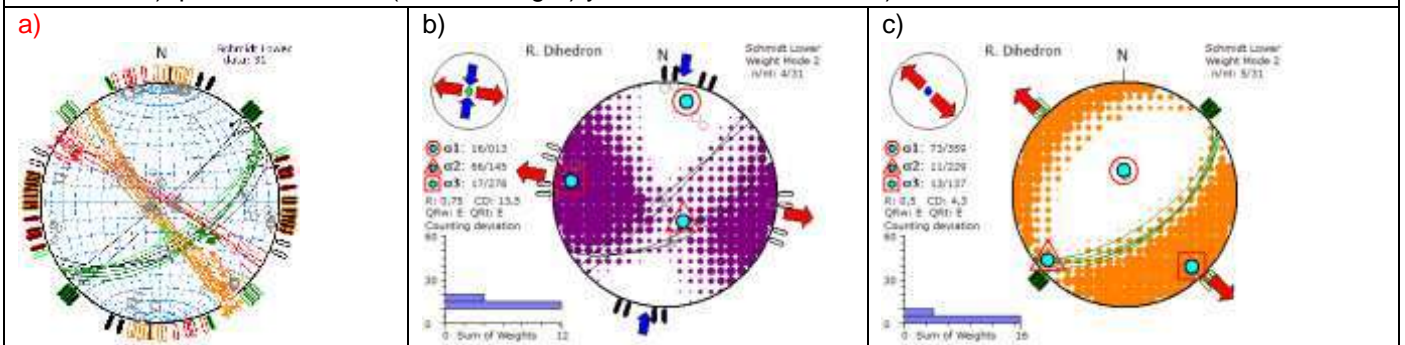
c)



Acf\_141.- Estación al interior de la CAc, sobre secuencias lacustres, intensamente fracturadas, disectada por fallas NW-SE y NNE-SSW; a) estereograma: falla NNE-SSW, FLI (en color negro) y solución de esfuerzos b); fallas NW-SE, lateral izquierda (en color rojo) y solución de esfuerzos c).

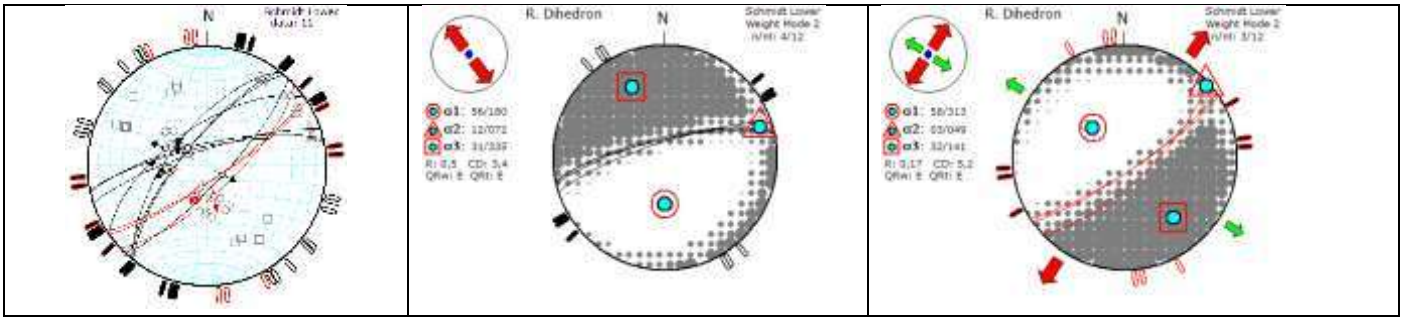


Acf\_142.- Estación en corte de carretera al este de la CAc, sobre flujo piroclástico; disectado por fallas NW-SE y E-W: a) estereograma con datos estructurales de campo; falla NW-SE lateral izquierda (en color rojo), solución de esfuerzos b); planos E-W, FLD (en color negro) y solución de esfuerzos c).

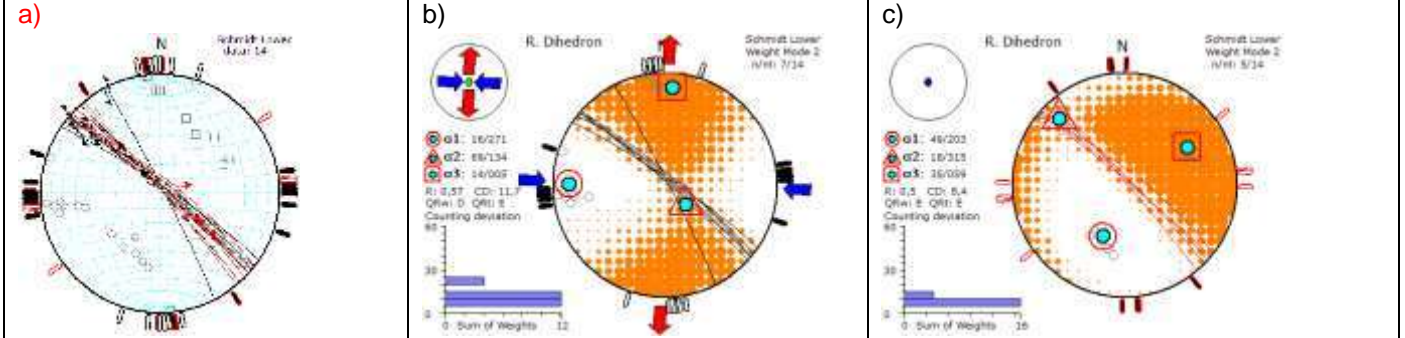
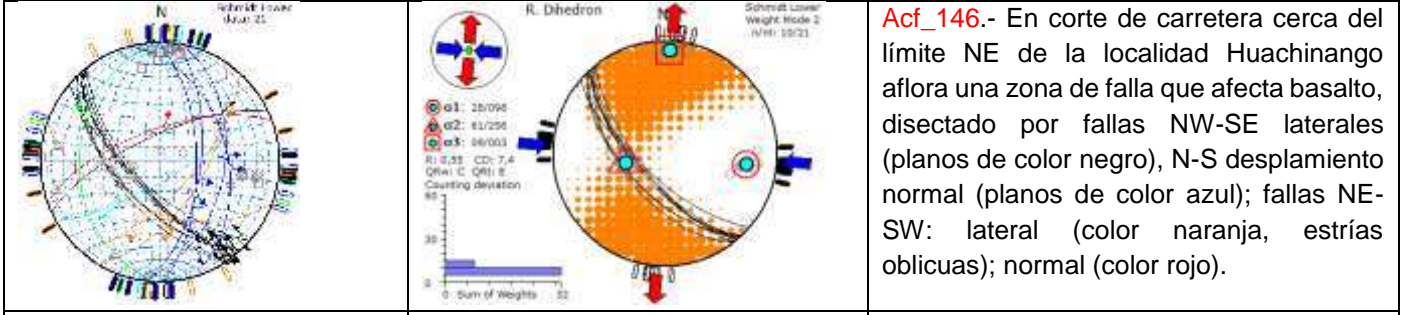


Acf\_143.- Estación estructural sobre ignimbrita riolítica (Ing. Piedras Encimadas), afectadas por fallas NW-SE; a) estereogramas: lateral izquierda (planos de color naranja); fallas laterales (planos de color rojo); fallas normales NE-SW (planos de color verde); fallas NE-SW, latera (color negro);

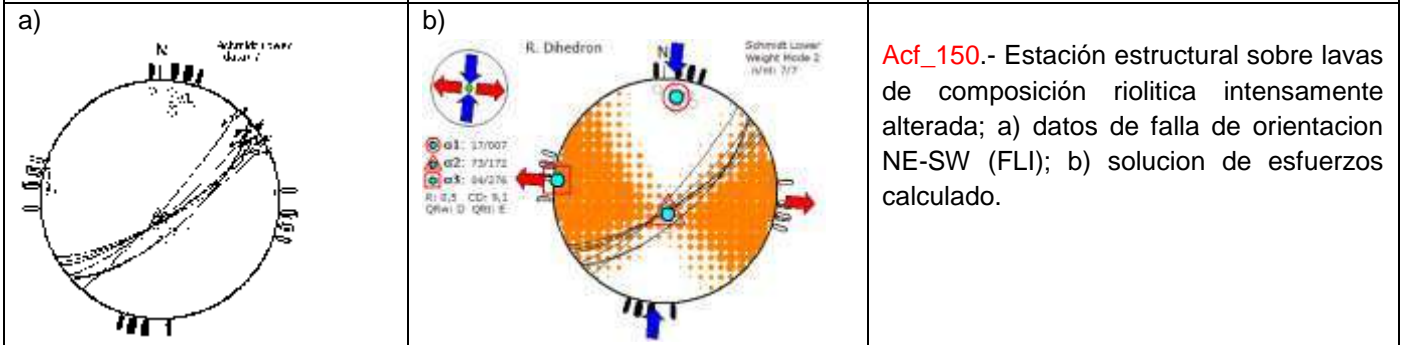
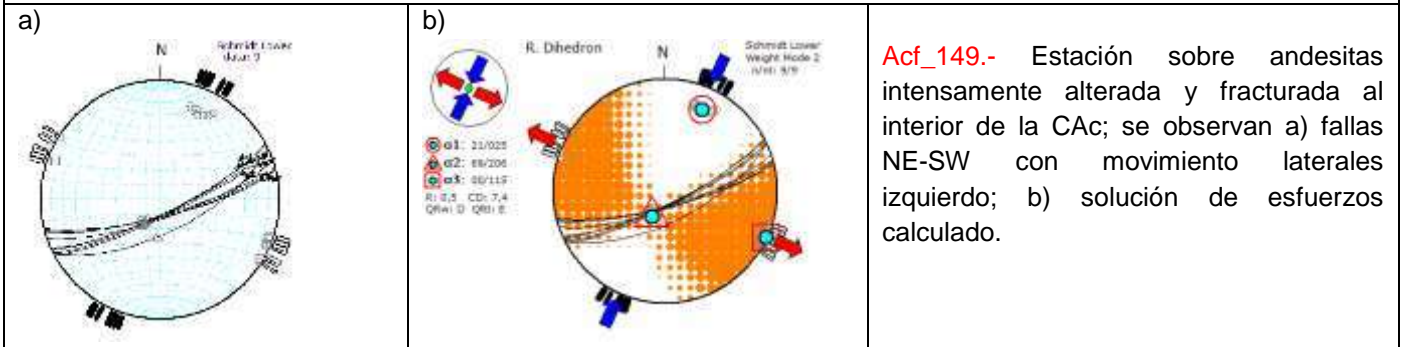




Acf\_144.- Estación en corte de carretera, al norte de la estación anterior; afloran flujos piroclásticos (Ignimbrita Piedras Encimadas), disectado por fallas NE-SW. a) estereograma con planos de falla observados en campo: falla normal; componente lateral izquierdo (color negro) y componente lateral derecho (color rojo)



Acf\_147.- Estación estructural sobre la misma unidad de la estación anterior, se observan planos de falla NW-SE, normal derecha (planos de color rojo), lateral izquierda (planos de color negro).

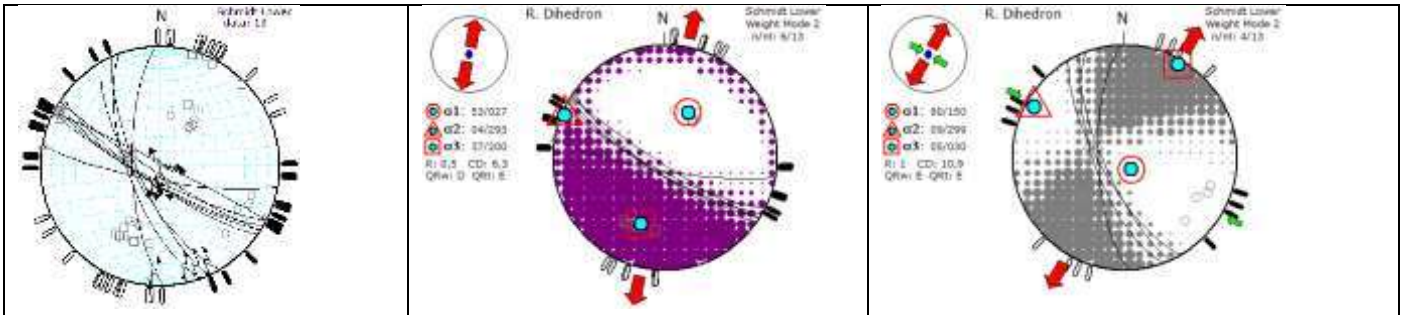


Acf\_150.- Estación estructural sobre lavas de composición riolítica intensamente alterada; a) datos de falla de orientación NE-SW (FLI); b) solución de esfuerzos calculado.

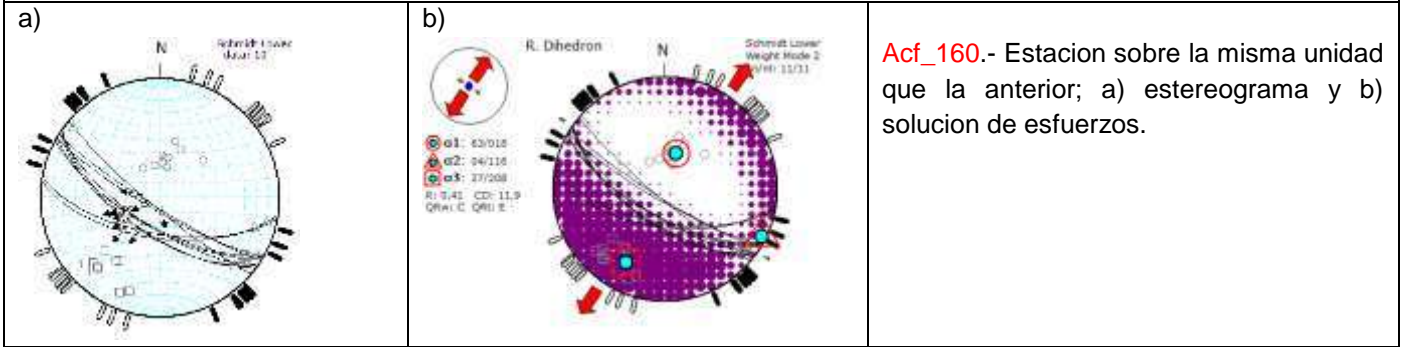
	<p>R. Dihedron</p> <p>Schmitt Lower Weight Mode 2 (N/E) 5/5</p> <p>             g1: 04/071              g2: 06/540              g3: 63/197              R: 0.2 CD: 21.3              Q/W: 2 Q/R: 2         </p>	<p><b>Acf_151.-</b> Estación al este del HCh, en corte de carretera donde aflora secuencia de Lu-Cz, donde se identificaron fracturas de tensión AB.</p>
<p>a)</p>	<p>b)</p> <p>R. Dihedron</p> <p>Schmitt Lower Weight Mode 2 (N/E) 5/5</p> <p>             g1: 58/181              g2: 09/205              g3: 31/050              R: 0.5 CD: 9.3              Q/W: 2 Q/R: 2         </p>	<p><b>Acf_152.-</b> Afloramiento de intercalación lutitas-limolitas, en donde se presentan fallas ~E-W a NW-SE normal; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.</p>
<p>a)</p>	<p>b)</p> <p>R. Dihedron</p> <p>Schmitt Lower Weight Mode 2 (N/E) 3/11</p> <p>             g1: 79/123              g2: 12/248              g3: 16/591              R: 0.5 CD: 5.8              Q/W: 2 Q/R: 2         </p>	<p><b>Acf_153.-</b> Estación donde aflora intrusivo diorítico, cortado por fallas: a) NNE-SSE (color rojo) desplazamiento normal; NE-SW (color naranja) y lateral derechas (planos de color negro).</p>
<p>a)</p>	<p>b)</p> <p>R. Dihedron</p> <p>Schmitt Lower Weight Mode 2 (N/E) 8/8</p> <p>             g1: 72/294              g2: 09/174              g3: 18/081              R: 0.5 CD: 6.2              Q/W: 0 Q/R: 2         </p>	<p><b>Acf_154.-</b> Estación sobre la misma unidad que aflora en la estación Acf_153, cortado por fallas N-S.</p>
<p>a)</p>	<p>b)</p>	<p><b>Acf_155.-</b> Estación al interior del HCh, en corte de carretera, donde aflora roca completamente alterada por alteración hidrotermal y meteorización debido a que</p>

<p>Stereogram for station Acf_154. Legend: g1: 71/277, g2: 16/132, g3: 18/039, R: 0.5, CD: 7.3, QW1: 2, QR1: 2.</p>	<p>R. Dihedron for station Acf_154. Legend: g1: 71/277, g2: 16/132, g3: 18/039, R: 0.5, CD: 7.3, QW1: 2, QR1: 2.</p>	<p>se encuentra en una zona de falla; a) estereograma, falla NE-SW y NE-SW; b) solución de esfuerzos para falla NW-SE normal.</p>
<p>a)</p> <p>Stereogram for station Acf_156. Legend: g1: 37/231, g2: 42/100, g3: 37/343, R: 0.5, CD: 5.3, QW1: 2, QR1: 2.</p>	<p>R. Dihedron for station Acf_156. Legend: g1: 37/231, g2: 42/100, g3: 37/343, R: 0.5, CD: 5.3, QW1: 2, QR1: 2.</p>	<p><b>Acf_156.-</b> Estación al interior del HCh, sobre depósitos aluviales intensamente fracturados y fallas ~E-W lateral izquierda; a) estereograma; b) solución de esfuerzos calculados.</p>
<p>a)</p> <p>Stereogram for station Acf_157. Legend: g1: 57/217, g2: 12/105, g3: 30/011, R: 0.5, CD: 5.8, QW1: 2, QR1: 2.</p>	<p>R. Dihedron for station Acf_157. Legend: g1: 57/217, g2: 12/105, g3: 30/011, R: 0.5, CD: 5.8, QW1: 2, QR1: 2.</p>	<p><b>Acf_157.-</b> Estación en lavas de composición andesítica y flujos piroclásticos, cortadas por fallas NW-SE desplazamiento normal; a) estereograma; b) solución de esfuerzos calculado.</p>
<p>a)</p> <p>Stereogram for station Acf_158. Legend: g1: 77/275, g2: 12/078, g3: 04/149, R: 0.5, CD: 2, QW1: 2, QR1: 2.</p>	<p>R. Dihedron for station Acf_158. Legend: g1: 77/275, g2: 12/078, g3: 04/149, R: 0.5, CD: 2, QW1: 2, QR1: 2.</p>	<p>c)</p> <p>R. Dihedron for station Acf_158. Legend: g1: 82/100, g2: 04/035, g3: 04/325, R: 0.5, CD: 29.6, QW1: 2, QR1: 2.</p>
<p><b>Acf_158.-</b> Estación sobre Autopista, sobre la fisura eruptiva (misma que la Acf_157), cortada por fallas NW-SE y E-W; a) estereograma con datos de falla planos NW-SE (en color rojo) falla lateral, solución en c); Falla E-W normal (color negro) y solución de esfuerzos b).</p> <p>a)</p>	<p>b)</p>	<p>c)</p>

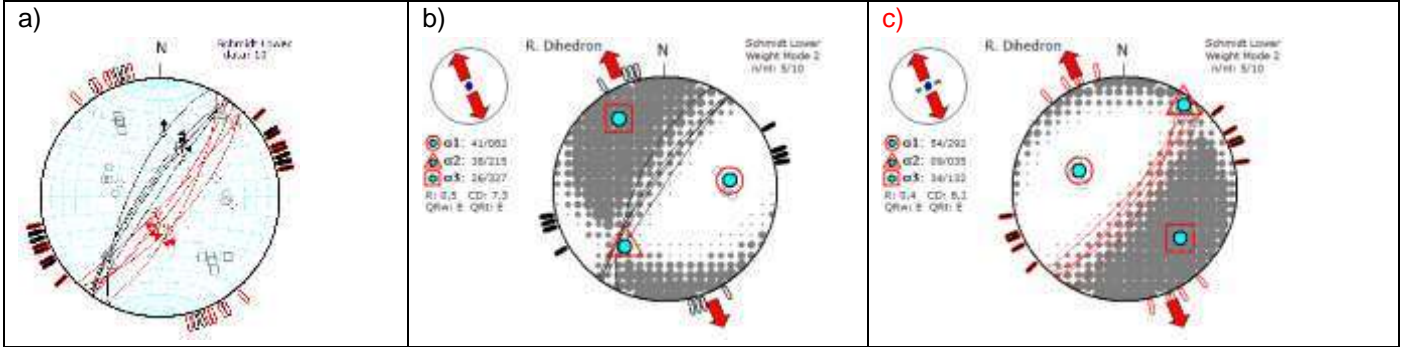




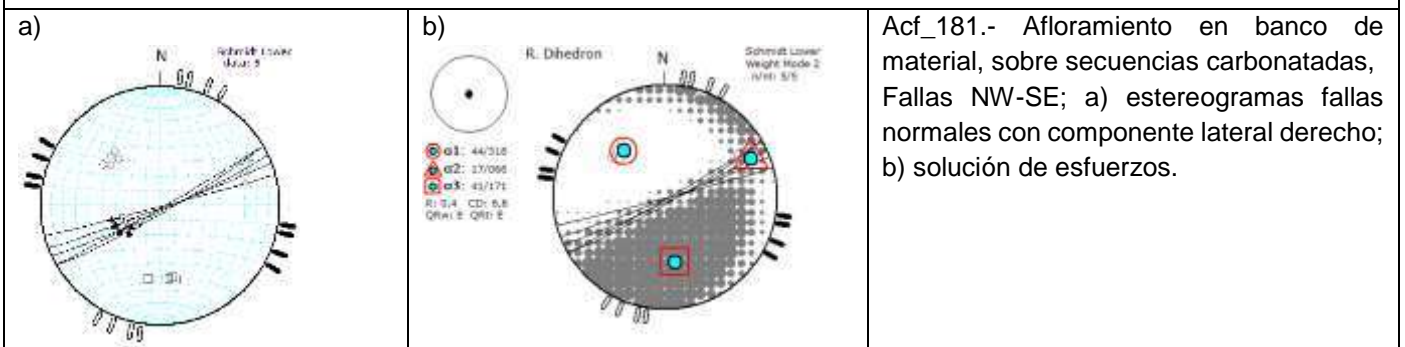
**Acf\_159.**- Estación sobre andesita, del VCG, cortadas por fallas: a) estereograma con datos de campo: Fallas NW-SE normales y fallas NNW-SSE laterales izquierda.



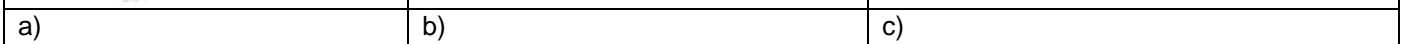
**Acf\_160.**- Estacion sobre la misma unidad que la anterior; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.

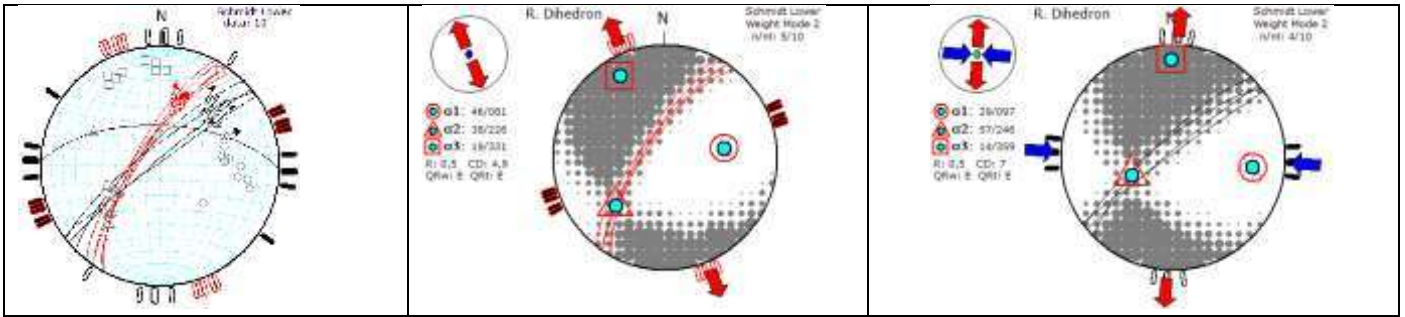


**Acf\_180.**- Estacion al interior del HCh, sobre secuencias Cz, cortadas por: a) fallas NE-SW con movimiento normal (planos de color rojo); lateral derechos (planos de color negro).

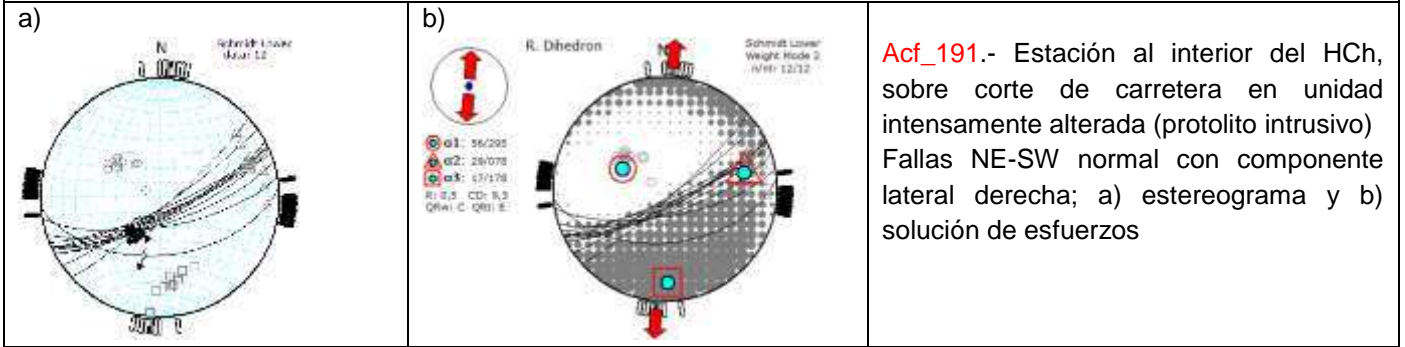


**Acf\_181.**- Afloramiento en banco de material, sobre secuencias carbonatadas, Fallas NW-SE; a) estereogramas fallas normales con componente lateral derecho; b) solución de esfuerzos.

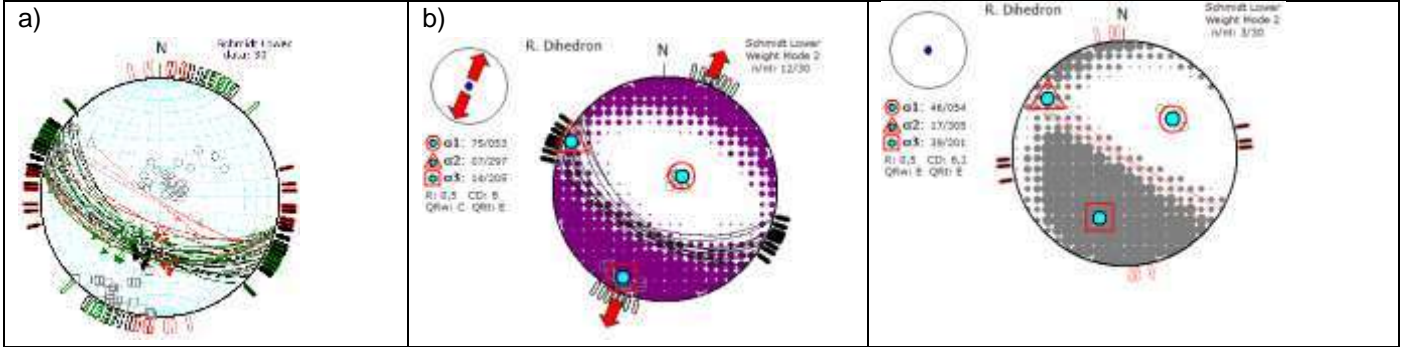




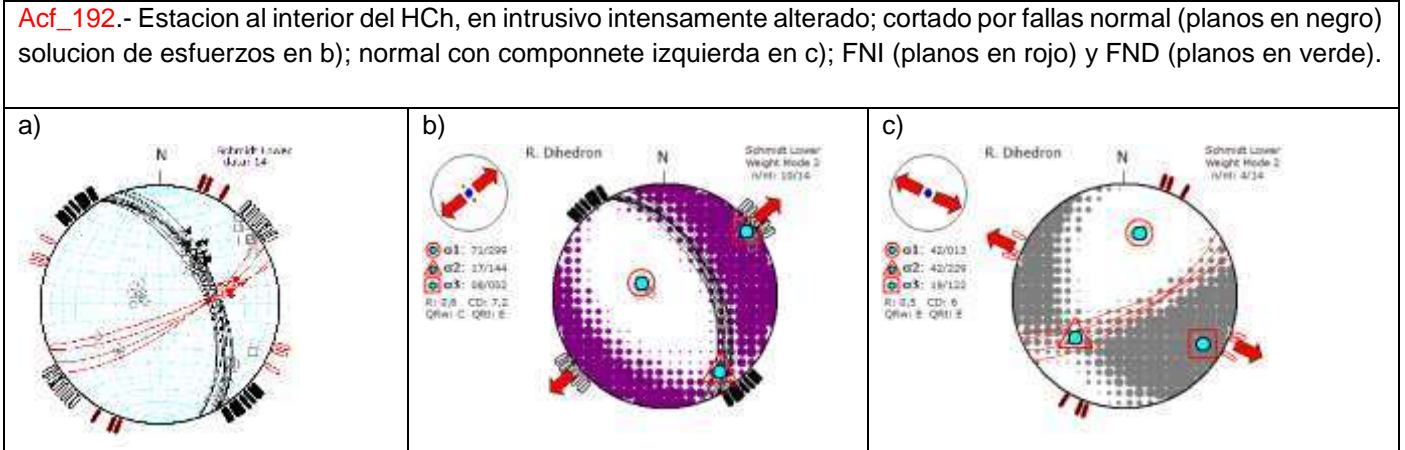
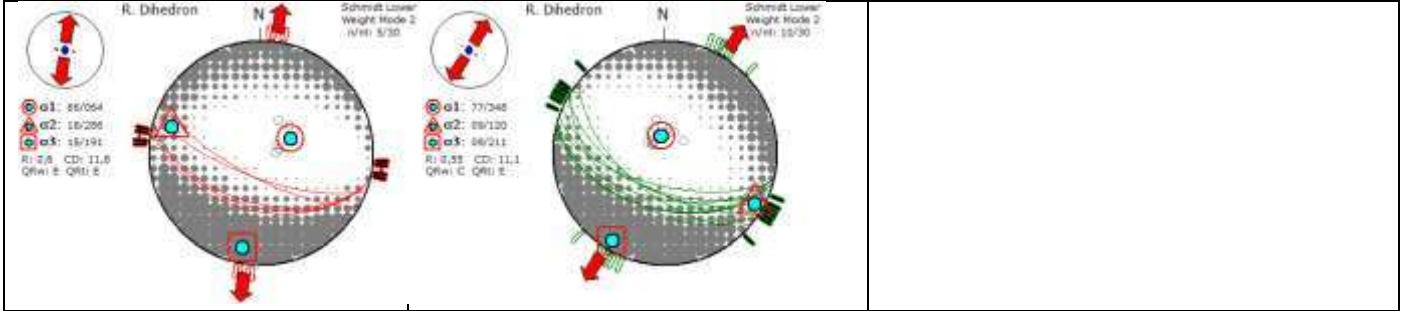
**Acf\_183.-** Estación estructural en Cz, falladas NE-SW; a) estereogramas lateral derechos (planos de color negro), normal componente lateral derecha (planos de color rojo, estrías oblicuas)



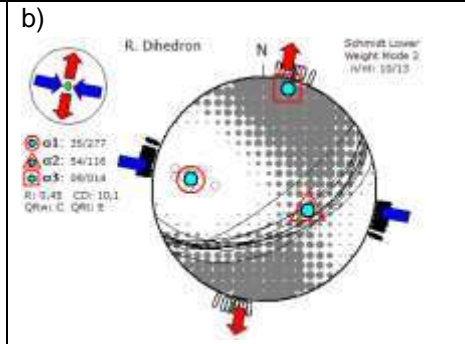
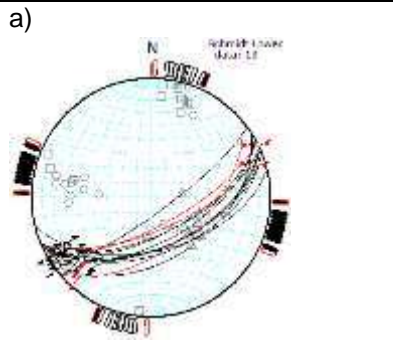
**Acf\_191.-** Estación al interior del HCh, sobre corte de carretera en unidad intensamente alterada (protolito intrusivo) Fallas NE-SW normal con componente lateral derecha; a) estereograma y b) solución de esfuerzos



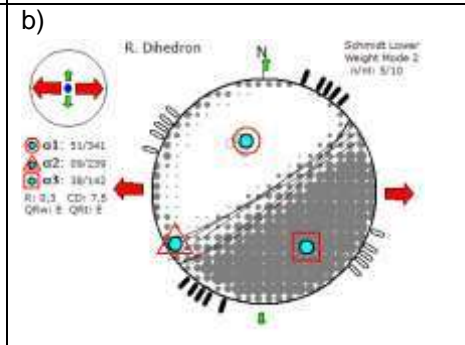
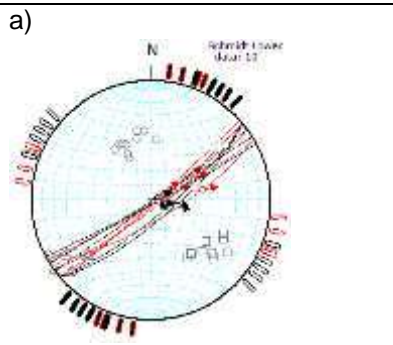
**Acf\_192.-** Estacion al interior del HCh, en intrusivo intensamente alterado; cortado por fallas normal (planos en negro) solución de esfuerzos en b); normal con componnente izquierda en c); FNI (planos en rojo) y FND (planos en verde).



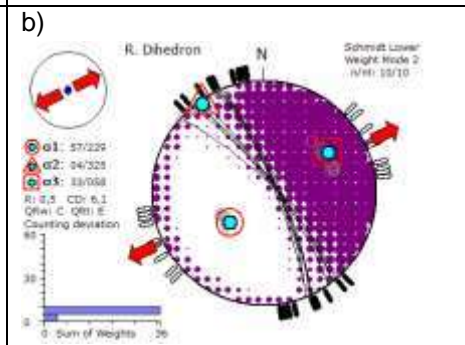
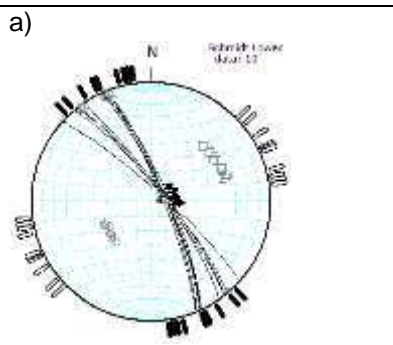
**Acf\_193.-** Estacional interior del HCh en el extremo oriental; a) estereograma con datos de falla NW-SE normal (color negro), planos NE-SW estrías oblicuas (en color rojo).



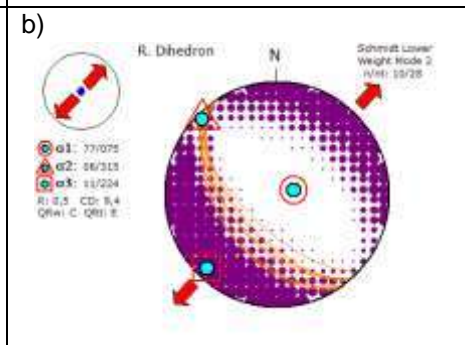
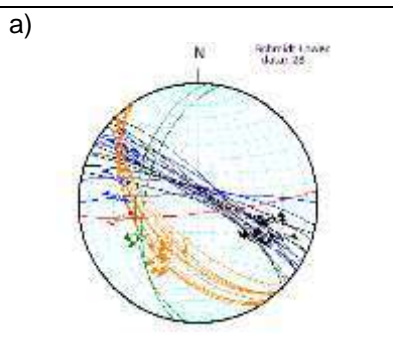
**Acf\_195.-** Estación estructural al interior del HCh, sobre secuencias sedimentarias Cz, disectada por fallas NE-SW con movimiento lateral; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.



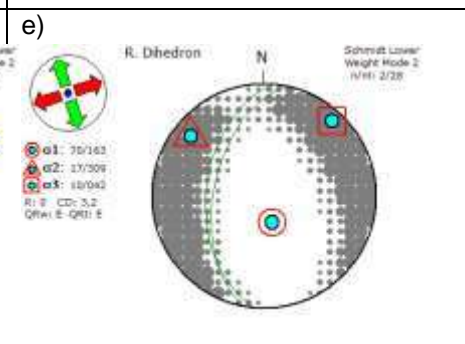
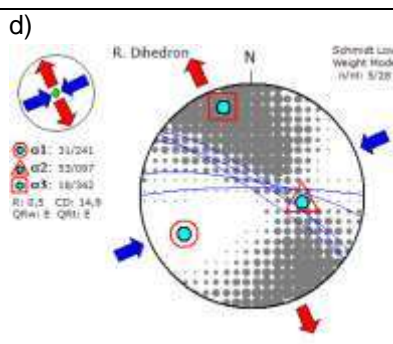
**Acf\_196.-** Estación en contacto Cz-Lu con intrusivo; disectado por fallas normales de dirección NE-SW; a) estereograma y b) solución de esfuerzos calculado.



**Acf\_197.-** Estación estructural al interior del HCh, sobre secuencias Nocooyo, en donde se han observado fallas NW-SE normales; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.



**Acf\_198.-** Estación sobre secuencia sedimentaria Nocooyo; disecada por fallas NW-SE, con movimiento normal; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.



**Acf\_199.-** Estación sobre secuencia sedimentaria Nocooyo; disecada por fallas NW-SE, con movimiento normal; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.



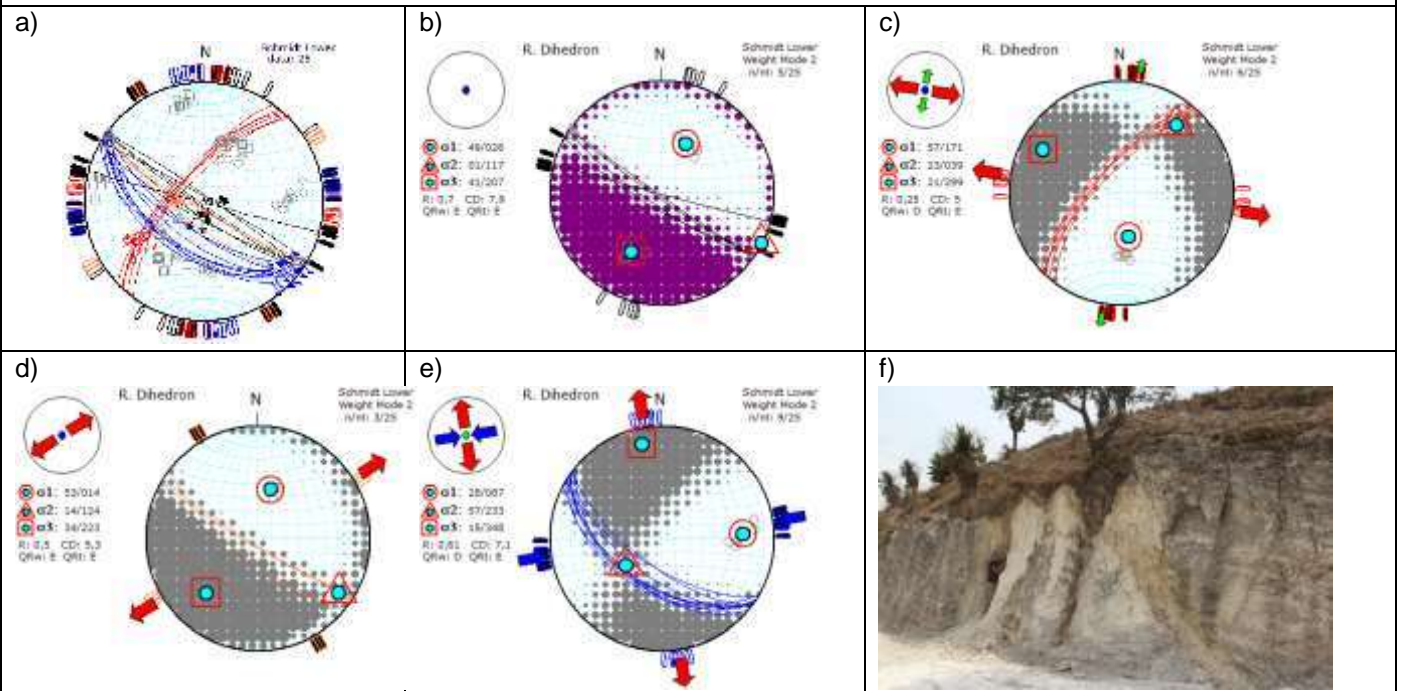
**Acf\_200.-** Estación sobre secuencia sedimentaria Nocooyo; disecada por fallas NW-SE, con movimiento normal; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.



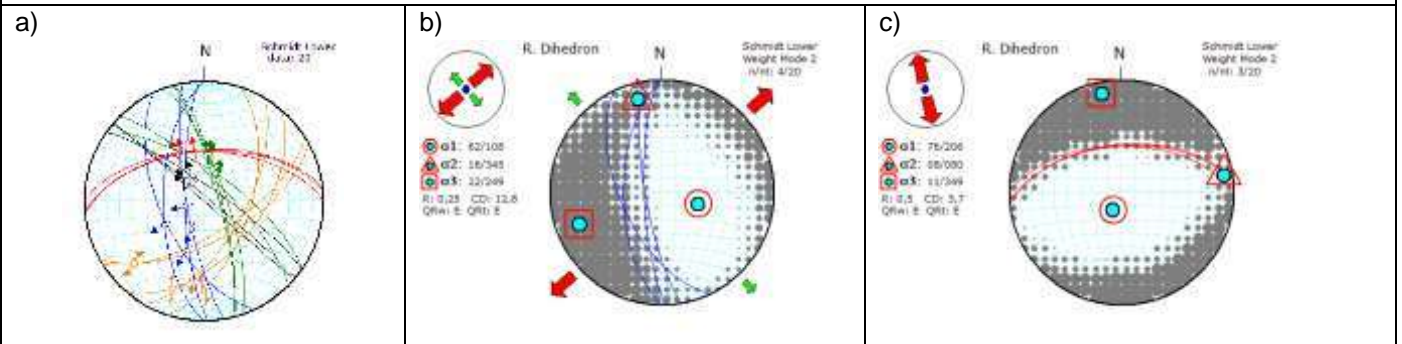
**Acf\_201.-** Estación sobre secuencia sedimentaria Nocooyo; disecada por fallas NW-SE, con movimiento normal; a) estereograma y b) solución de esfuerzos.



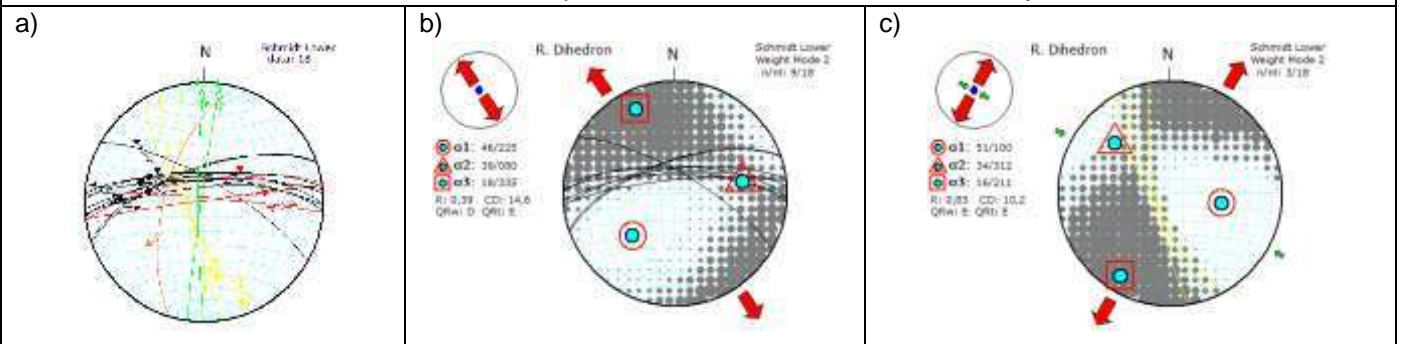
a) Estereograma con planos de falla normal (planos de color naranja), solución en b); estrías oblicuas (en color negro), solución en c); fallas laterales (planos de color azul), solución en d); falla N-S (en verde) solución de esfuerzos en e).



Acf\_201.- Estación sobre misma unidad que las estaciones anteriores; a) estereogramas de fallas NW-SE y NE-SW; b), c), d) y e); solución de esfuerzos, f) fotografía de afloramiento.



Acf\_202.-Estación sobre la misma secuencia que las anteriores; tren de falla NW-SE y NE-SW.



Acf\_204.- Estación al Sur del HCh, falla ~N-S y ~E-W; a) estereograma y solución de esfuerzos calculados b) y c).