



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis Cinemático y Cronología
de la Falla Las Peñas al Sur de
Huajuapán de León, Oax. México**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

PRESENTA:

TEODORO HERNÁNDEZ NIETO

DIRECTOR: DR. GILBERTO SILVA ROMO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Índice

RESUMEN	5
Graphical Abstract	6
Abstract	7
PROBLEMÁTICA Y OBJETIVO DE ESTUDIO	11
METODOLOGÍA	11
ÁREA DE ESTUDIO	12
Complejo Acatlán	17
Formación La Mora	20
Formación Diquiyú	20
Formación Ayuquila	20
Formación Tecamazúchil	21
Formación Solano	22
Formaciones Chimeco y Mapache	24
Formación Huajuapán	24
Indicadores cinemáticos	27
Indicadores tipo TM Material Acarreado	28
Indicador ST Escalones	29
Indicadores Arreglo de Estructuras Planas Inclinadas (IS)	30
Estructuras analizadas	31
Estructuras en la Localidad 1 Contacto formaciones Tecamazúchil y Solano	31
Estructuras en la Localidad 2 Contacto entre las formaciones La Mora y Solano.	32
Estructuras en la Localidad 3 Contacto entre las formaciones Ayuquila y Solano	34
Pliegues menores	46
Localidad 1	46
Localidad 2	52
Fallas y crucero	55
Localidad 3	55

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mi asesor el Dr Gilberto Silva Romo por la confianza, por sus consejos, su paciencia y enseñanzas. Por todo lo que me ha apoyado en la realización de este trabajo, me ha hecho analizar, aprender a tener pasión y visualizar desde otro aspecto la geología. Además gracias por cada plática, por volverme un mexicano ejemplar. Gracias infinitas por todo.

Hago extensivo el agradecimiento a la Dra Claudia Cristina Mendoza Rosales quien siempre me dio consejos personales y para la realización de este trabajo, gracias a ella me enamore del trabajo de campo y de la geología, gracias por enseñarme a disfrutar cada una de las experiencias de campo. Gracias por siempre apoyarme.

Agradezco al Ing. Alfredo Victoria Morales por sus consejos, sus enseñanzas y sobre todo por brindarme la confianza como un amigo, gracias por volverme un apasionado de los minerales y sobre todo aprender más sobre el Reino Mineral. Muchas gracias.

Quiero agradecer al Ing Teodoro Hernández Treviño por sus consejos, por cada uno de esos días de pláticas geológicas, por cada enseñanza, gracias por apoyarme a lo largo de este camino. Infinitas gracias.

Agradezco al Ing. Gabriel Salinas Calleros y a la M.I. Isabel Domínguez Trejo por brindarme su apoyo, por tener la disposición para ayudarme en la realización de proyectos, gracias por su apoyo.

Agradezco infinitamente a mi familia sin ellos no sería posible la culminación de esta etapa de mi vida, gracias a mi padre Teo y mi madre Geo por siempre mantenerse al pendiente de mí. Por siempre recibir su apoyo, sus consejos, enseñanzas, sin ustedes no sería posible esto. Gracias a mi hermano y mi mejor amigo Daniel siempre acompañándome en este camino, creciendo juntos, dándome consejos. Gracias por su apoyo los quiero.

Quiero agradecer a mis abuelos Roberto y Simona por cada enseñanza, por sus consejos, por su apoyo. Por cada plática con ellos gracias por estar conmigo en este camino, además dedico este trabajo a mi abue que ya no está conmigo Pita quien siempre me dio consejos, me enseñó muchas cosas y quien formo parte de este camino, gracias por cada plática. Infinitas gracias a mis tres viejos!

Agradezco a mis tíos Armando, Elsa, Rosa, Min, Gastón, Viri, Memo, Carlos por siempre darme su apoyo, por cada plática, por cada consejo y sus enseñanzas que me han servido a lo largo de este camino; extendiendo este agradecimiento a mis primos Elsa, Gastón, Any y en especial a Alan quien me enseñó muchas cosas que me han servido para este trayecto. Los quiero mucho a cada uno de ustedes.

Agradezco infinitamente a mis amigos y hermanos Lalo, Felipe, Hassel, Sara, Ramses, Alan, Daniel, Damian que siempre han estado conmigo desde hace muchos años, gracias por cada plática, cada consejo, gracias por darme su apoyo; es un logro más para este clan. Gracias mis queridos amigos.

Gracias a mis amigos Lupita, Memo por siempre darme consejos y su apoyo. Gracias a la Maestra Ana Cecilia Lopera Gasca por siempre apoyarme, por sus consejos, por su amistad.

Agradezco a mis amigos del 400 por su apoyo, por sus consejos, por cada plática que tuvimos. Gracias Alam, Orestes, Yoalli, Emanuel, Esther, Karina, Clau.

Quiero agradecer a mis amigos de la carrera que he pasado increíbles momentos a su lado, Gustavo, Arody, Ivan Cuadros, Eric León, Nahir, Mariana Cocuns, Fred, Thiare, Brenda Wizkas, Tetla, Juls, Luis Espinoza, Kari Navarrete, Karina Bautista gracias a todos por pasar muchas experiencias juntos, por enseñanzas y por siempre recibir su apoyo. ¡Gracias!

Quiero agradecer a cada persona que intervino en mi formación, aquellos que me dieron consejos, platicas. Gracias a cada uno, sin ustedes no sería posible la realización de esto.

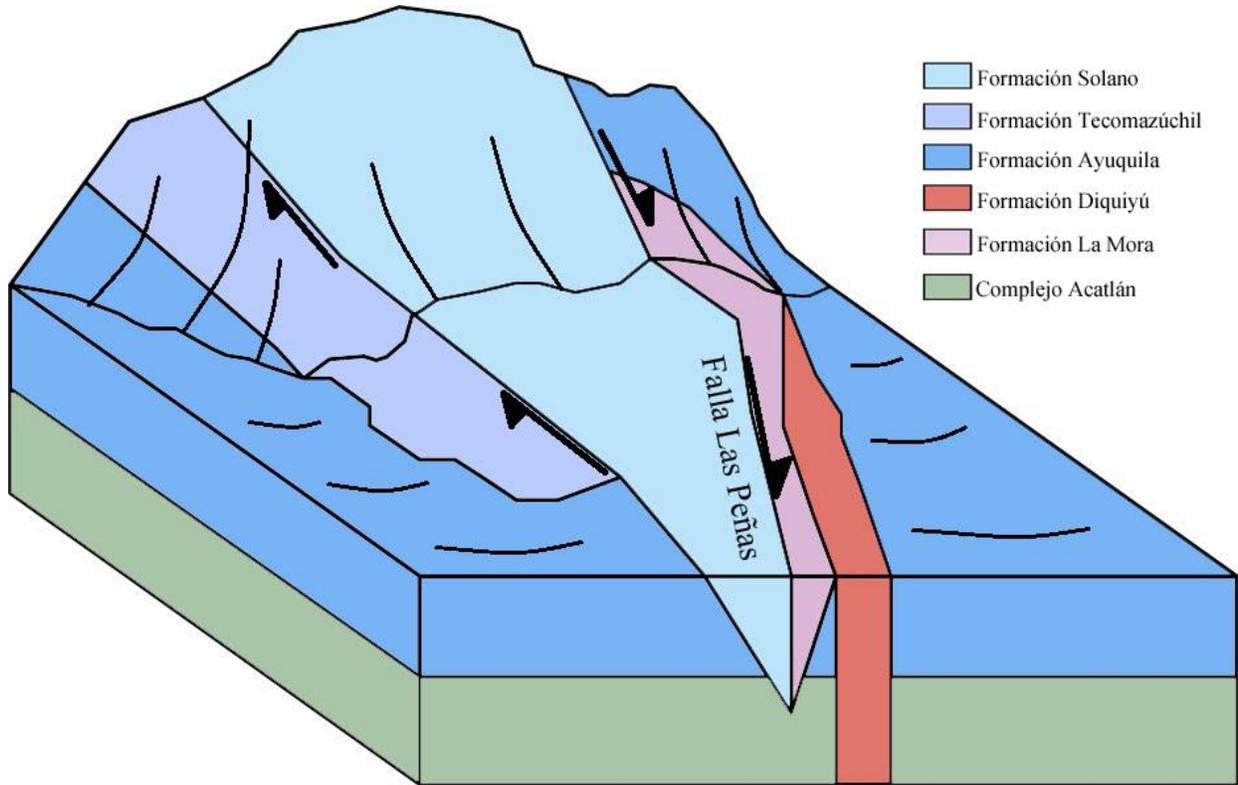
Infinitas gracias,

Teodoro Hernández Nieto

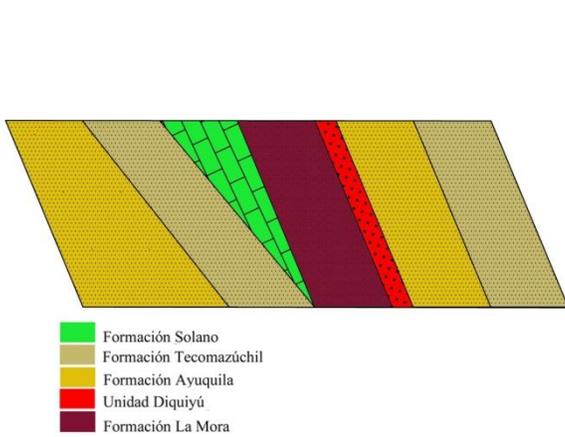
RESUMEN

Se reconoce que al sur de Huajuapán de León, Oaxaca, las rocas de la Formación Solano del Jurásico Tardío, se encuentran constreñidas entre el Sistema de falla Las Peñas, formado por dos fallas de rumbo general sur-sureste - nor-noroeste, con trazas convergentes hacia el sur. El Sistema presenta evidencias de desplazamiento con cinemática diversa; primero en sentido derecho e inverso durante el Cretácico. Posteriormente experimentó reactivación como falla lateral izquierda y normal durante el Oligoceno. Se estudió la cinemática del sistema de fallas Las Peñas en tres localidades en las cuales se identificaron superficies de crucero y se estudiaron pliegues menores formados en las rocas de falla e indicadores cinemáticos de los tipos: arreglos de estructuras inclinadas, material acarreado y escalones. La localidad 1 incluye además a un banco de materiales en la carretera Huajuapán de León-Mariscala, donde están involucradas las formaciones Solano y Tecomazúchil, aquí obtuvieron datos de estratificación, datos de pliegues (charnelas, flancos, planos axiales), crucero y superficie de falla, los datos obtenidos en esta área sugieren dos episodios de deformación uno por falla lateral derecha y otro con desplazamiento normal. Los pliegues menores en la Formación Solano estudiados en el banco de material aledaño no se asocian a la deformación del sistema, se tratan de rasgos de carácter sinsedimentario. En la localidad 2 ubicada en un corte carretero de Huajuapán de León-Yosocuta se caracterizaron pliegues desarrollados en la zona de falla entre las formaciones La Mora y Solano, de los pliegues se obtuvieron flancos, charnelas y planos axiales, con base en los cuales se interpretan tres eventos de deformación en los que se encuentra una falla inversa y dos de desplazamiento lateral uno derecho y otro izquierdo. La localidad 3 se encuentra en la terracería que va a la presa de Yosocuta, aquí el contacto es entre las formaciones Ayuquila y Solano, en esta zona se tomaron datos de crucero, estratificación y de planos de falla. De acuerdo al análisis de los datos se determinó que el crucero está asociada a la reactivación de la Falla occidental con desplazamiento normal. Con todo lo anterior, se considera al Sistema de Falla Las Peñas como un rasgo estructural de vida larga que experimentó desplazamientos con cinemática contrastada: D₁) Desplazamiento lateral derecho y tal vez inverso probablemente en el Cretácico, ya que involucra a la Formación Solano del Jurásico Superior. D₂) Desplazamiento lateral izquierdo (como se había reportado previamente) y D₃ normal en el Paleógeno (Oligoceno).

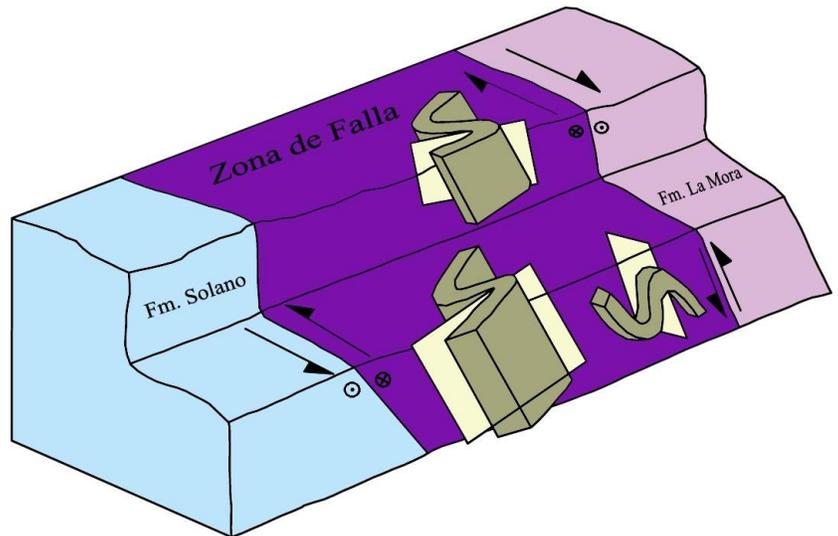
Graphic Abstract



Distribución de las formaciones involucradas en la cinemática del sistema de fallas Las Peñas al Sur de Huajuapán de León, Oaxaca.



1b) *Distribución de las formaciones al Sur de Huajuapán de León, Oax.*



1c) *Geometría de las tres familias de pliegues reconocidas en el área.*

Abstract

Southward of Huajuapán de León, Oaxaca, the Late Jurassic aged Solano formation is constrained between two faults with south-southeast - north-northwest general trending. These faults have a southward converging trend. Both faults compose the Las Peñas fault system. This system has displacement evidence with diverse kinematics; first as right strike slip and reverse sense during the Cretaceous. Subsequently, the Las Peñas fault system experienced reactivation as left strike and normal slip during Oligocene time. In this work, the kinematics of the Las Peñas fault system were studied on three locations, where cleavage surfaces and minor folds on fault rocks were identified. The slip sense was studied based on three types of kinematic indicators: Trains of inclined planar structures, trailed material and steps. On Locality 1 where the Solano and Tecomazúchil formations are involved, also includes a quarry, here we obtained stratification data, folds information (hinge, flanks, axial planes), cleavage and fault surface. The data obtained in this area suggest two deformation stages, one due to right strike slip and the other with normal displacement. The minor folds in the Solano Formation studied in the quarry are not associated with the deformation of the Las Peñas fault system. They are features of a not-studied nature. In the locality 2 located in a highway section of Huajuapán de León-Yosocuta, folds developed in the fault zone between La Mora and Solano formations were characterized, with flanks of folds, hinges and axial planes were obtained. Based on which it is possible to propose three deformation events. One is compressive with reverse fault and another two both with strike slip, one right and one left. The Locality 3 is located on the dirt road that goes to the Yosocuta dam, here outcrops the contact is between the Ayuquila and Solano formations, in this area data on cleavage, stratification and fault planes were recorded. According to the analysis of this data, it was determined that the cleavage is associated with Western fault reactivation with normal displacement. With all of the above, the Las Peñas Fault System is considered as a long life structural feature that experienced displacements with proven kinematics: D1) Right strike slip and reverse slip, perhaps probably in Cretaceous time, since it involves the late Jurassic Solano formation. D2) Left lateral slip (as previous author reported) and normal D3 in the Paleogene time (Oligocene).

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la evolución geológica de una cuenca sedimentaria se infiere a partir de su registro estratigráfico y estructural. Por un lado, se requiere la caracterización sedimentológica y estratigráfica de las sucesiones de su relleno y por otro, se deben valorar los rasgos estructurales impresos en las rocas del relleno; ya sean sinsedimentarios o posteriores. En la región de Huajuapán de León, Oax., se localiza la Cuenca Ayuquila, en la cual se ha reconocido una sucesión sedimentaria que atestigua una evolución geológica desde el Triásico hasta el Cretácico. (Caballero-Miranda, 1990; Morán-Zenteno et al., 1993; Campos-Madrigal et al., 2013; Silva-Romo et al., 2015). La configuración de la Cuenca Ayuquila denota un origen tectónico; de tal forma, está delimitada por fallas (Campos-Madrigal et al., 2013) (Figura 1). En el extremo sur de la cuenca se han caracterizado sistemas de fallas como la de Río Salado y Las Peñas (Martiny, 2010) El Sistema de fallas Las Peñas yuxtapone a la sucesión clástica del Jurásico con las rocas marinas de la Formación Solano mediante un desplazamiento lateral (Martiny, 2010) La cinemática de las fallas en la Cuenca Ayuquila es motivo de controversia: Campos-Madrigal et al, (2013) propusieron que la Cuenca Ayuquila se formó en el marco de una cizalla izquierda, en tanto que Martini y Ortega-Gutiérrez (2016) asocian la formación de la cuenca a una cizalla derecha en el marco de la disgregación de Pangea. En su estudio de la Falla del Río Salado Martiny et al. (2012) consideran a la Falla Las Peñas con una cinemática de falla lateral izquierda que disloca inclusive a las rocas volcánicas del Oligoceno. En este trabajo se propone que el Sistema de Fallas Las Peñas tuvo una cinemática de falla lateral derecha. Esta tesis se desarrolló en el marco del proyecto DGAPA-UNAM PAPIIT IN116116 “Evolución tectono-sedimentaria de la región centro-sur de México durante la ruptura de Pangea”

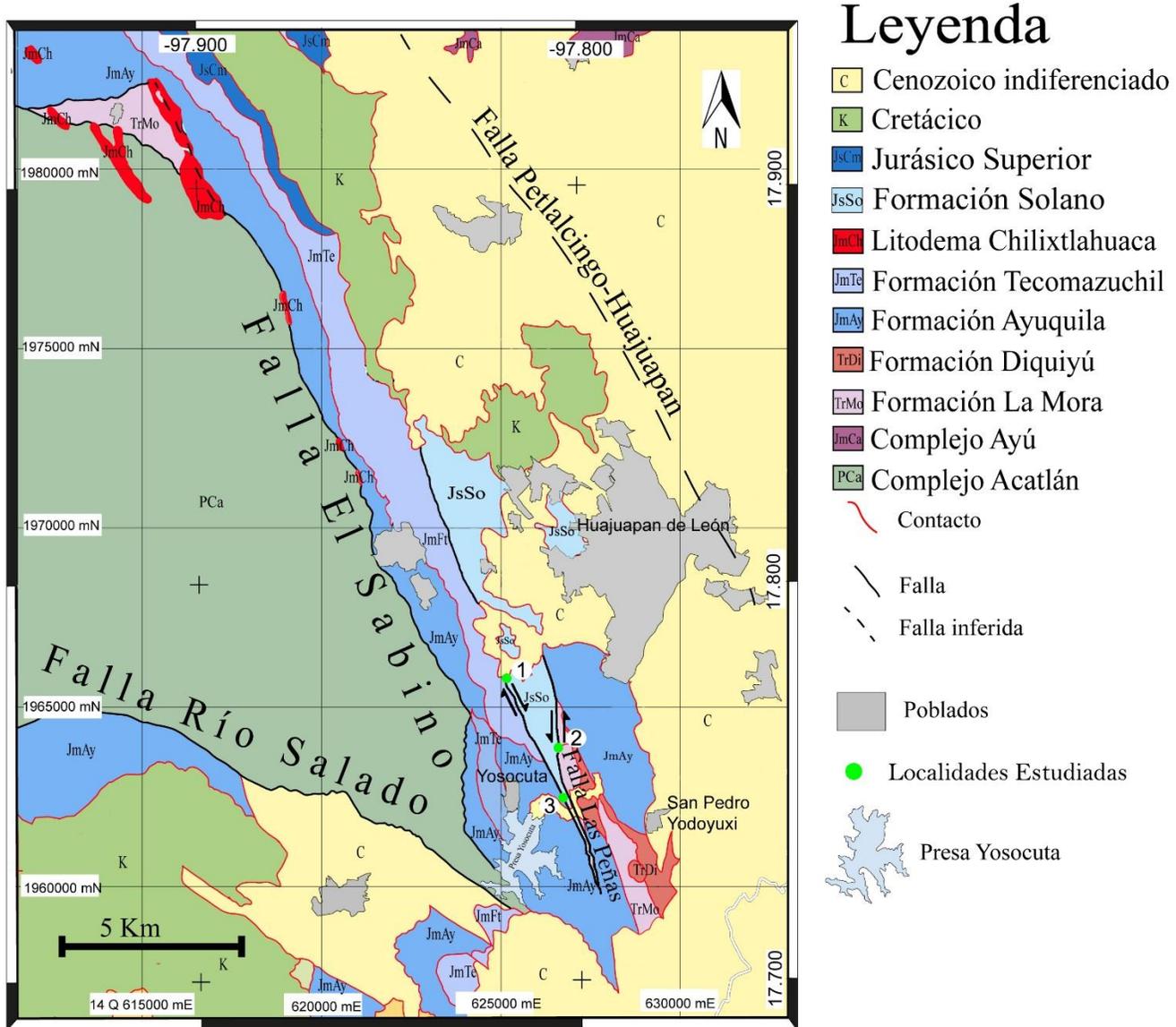


Figura 1^a. Mapa Regional de Huajuapán de León. En el recuadro se muestra la ubicación de las tres localidades estudiadas en este trabajo. Modificado de De la Torre (2019).

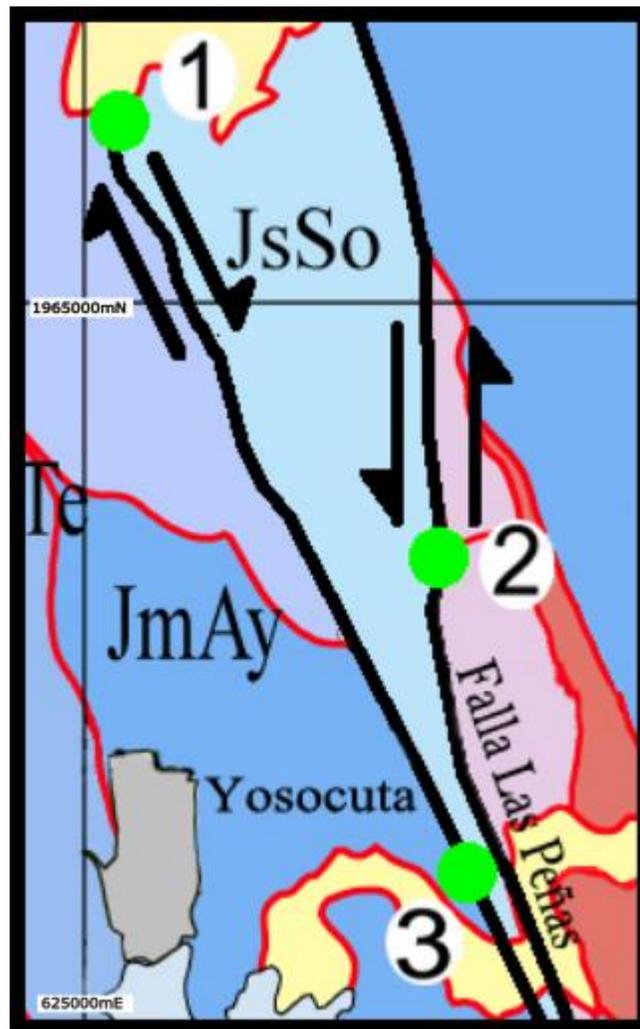


Figura 1b. Mapa del área de estudio en los que se involucra la formación Solano con las formaciones La Mora, Tecomazúchil y Ayuquila.

PROBLEMÁTICA Y OBJETIVO DE ESTUDIO

En el Proyecto DGAPA-UNAM PAPIIT-IN116116 se interpretan los contactos de la Formación Solano con las unidades clásicas, son por falla como había sido propuesto previamente por Martiny et al. (2010). Comprobar la naturaleza de dichos contactos y analizar en su caso la cinemática de las fallas. Por otro lado, se identificó la naturaleza de los pliegues menores presentes en la zona de falla Las Peñas, para la determinación del desplazamiento de las formaciones presentes en el área de estudio.

Este trabajo tiene por objetivo general establecer la cinemática de la Falla Las Peñas que yuxtapone las unidades jurásicas expuestas en el sector sur de la Cuenca Ayuquila.

Caracterizaron los rasgos menores asociados a los contactos entre las unidades jurásicas y los pliegues menores que presenta la Formación Solano.

METODOLOGÍA

Con el fin de reconocer y obtener datos de la Formación Solano y sus alrededores y la segunda etapa que consistió en afinar la caracterización estructural en los sitios que presentan rasgos menores y son más accesibles por un lapso de 5 días.

Para la toma de datos se usó una brújula Brunton, los datos obtenidos fueron de superficies de estratificación, de planos de falla, datos de pliegues (flancos, plano axial y charnela), cruceros y fracturas. Para medir el pitch de las estrías en los planos de falla se utilizó un goniómetro estructural.

Lo primero que se realizó en el área fue un levantamiento geológico con el fin de caracterizar las rocas que forman parte del área del estudio, recolectar datos estructurales, muestras de mano y visualizar la distribución y contactos que tienen las formaciones entre sí.

El trabajo de gabinete consistió en procesar todos los datos estructurales, para lo que se utilizó el software Stereonet®. Los datos que se obtuvieron de cada uno de los rubros mencionados, se agruparon de acuerdo a su lugar de colecta y a sus características para posteriormente obtener una media de cada uno de ellos, con el fin de establecer las relaciones estructurales, por ejemplo de estratificación con respecto al crucero, estratificación con respecto a Plano de falla y crucero, Planos

axiales de los pliegues comparados con estratificación y plano de falla. Posteriormente estos datos se ubicaron y se colocaron en un mapa del área de estudio esto con el fin de ilustrar mejor la distribución de la unidad y sus características estructurales-cinemáticas. Se corroboraron los datos de los contactos en el mapa que se presenta en este trabajo. Se realizaron estudios petrográficos con un microscopio Olympus® (LUGIS, IGF-UNAM) y un microscopio Zeiss® (Taller de Cartografía, FI-UNAM) , las fotografías se tomaron con una Cámara Nikon Reflex®.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra al Sur-suroeste de Huajuapán de León, Oaxaca. Para llegar desde la Ciudad de México se pueden tomar dos rutas, la primera viajando hacia Puebla y desviarse sobre la carretera a Tehuacán y de ahí, continuar hacia Huajuapán de León vía Chazumba (carretera federal 125). La segunda ruta consiste en viajar hacia Izúcar de Matamoros vía Cuautla y llegar por la carretera de Acatlán de Osorio-Hujuapán de León (carretera federal 190 a Oaxaca).

La investigación se realizó en las tres siguientes localidades ubicadas en cortes carreteros al suroeste de Huajuapán de León, Oax. Norte a Sur (Figuras 1 y 2).

Localidad 1. Se encuentra en la carretera estatal 34 Huajuapán de León – Mariscala de Juárez, el afloramiento se localiza a un kilómetro de la desviación a Tejaltilán, Oax. Ahí se observa el contacto estructural entre las formaciones Solano y Tecomazúchil. También se estudiaron los rasgos que presenta la formación Solano en un banco de material aledaño.

Localidad 2. Está ubicada en la carretera estatal 15 Huajuapán de León – Juxtlahuaca, Oax., donde la Formación Solano tiene contacto estructural con la Formación La Mora. Como referencia, la localidad se encuentra a 500 metros pasando un puente dirección hacia Yosocuta, Oaxaca. Se estudió con detalle la zona de falla, en donde las rocas presentan pliegues asociados al desplazamiento de los bloques.

Localidad 3. Se trata de una localidad al Oeste del poblado de San Pedro Yodoyuxi, de acceso relativamente difícil debido a que se encuentra en una terracería, que originalmente comunicaba con la presa de Yosocuta, pero ahora se encuentra cerrada al paso de vehículos automotores.

Localidad	Coordenadas UTM	Formaciones Involucradas	Fotografía del Afloramiento
1	14Q 624059 mE 1968534 mN	Solano y Tecomazúchil	
2	14 Q 626632 mE, 1964095 mN	Solano y La Mora	
3	14 Q 627214 mE , 1961692 mN	Solano y Ayuquila	

Figura 2. Coordenadas UTM de las tres localidades estudiadas y unidades geológicas involucradas

2. ENTORNO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra dentro del Terreno Mixteco (Figura 3), ubicado al SW de la República Mexicana, es uno de los 17 Terrenos tectonoestratigráficos propuestos para nuestro país, de acuerdo con sus características geológicas (Sedlock et al., 1993). En el Terreno Mixteco se reconoce como basamento a las rocas metamórficas del Complejo Acatlán, sobre el cual se encuentran una sucesión sedimentaria que incluye rocas clásticas, carbonatadas y finalmente rocas ígneas.

En el basamento del terreno Mixteco se han interpretado procesos de subducción durante el Paleozoico Temprano, la colisión de rocas oceánicas del Terreno Mixteco con la corteza continental del Terreno Zapoteco durante el Paleozoico Temprano-Medio, del Paleozoico Medio-Tardío se encuentra la deformación y metamorfismo que afloran la región y finalmente en el Paleozoico Tardío el depósito sinorogénico y postorogénico de las rocas calcáreas. El registro del Terreno Mixteco incluye sucesiones mesozoicas, dentro de las que se encuentran las rocas clásticas y calcáreas del Jurásico y las rocas carbonatadas del Cretácico. Las rocas volcánicas expuestas en la región corresponden al Paleógeno y al Neógeno Temprano, estas rocas sugieren la proximidad a un arco magmático.

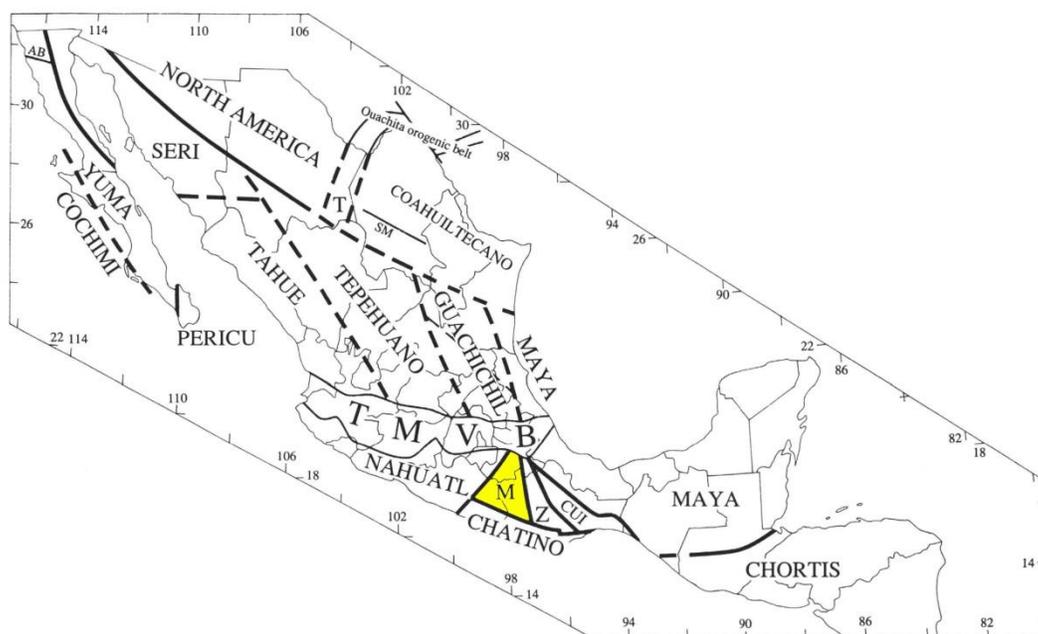


Figura 3. Mapa de Terrenos en México y Centroamérica. Las líneas resaltadas son los límites inferidos de cada Terreno. Abreviaciones CUI=Cuicateco, M=Mixteco, Z=Zapoteco, T=Tarahumara, AB=Falla de Agua Blanca (Baja California), SM=Falla San Marcos (Coahuila), TMVB= Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. Tomado de Sedlock et al. (1993).

La zona de estudio se encuentra dentro de la Cuenca Ayuquila, en la cual afloran litologías metamórficas, ígneas y sedimentarias continentales y marinas. En la zona están expuesta la Formación Solano; la cual tiene contactos por falla con las formaciones La Mora, Ayuquila, Tecamazúchil y Diquiyú. La Cuenca Ayuquila se encuentra delimitada al Poniente por un Sistema formado por las fallas El Sabino y Texcalapa, ambas con un rumbo nor-noroeste, estas fallas presenta una zona de relevo en el área de San José Chapultepec (Campos-Madrigal et al., 2013). Al oriente, la Cuenca Ayuquila se encuentra limitada por la falla Huajuapán-Petlalcingo (Martiny, 2008).

La Cuenca Ayuquila es relativamente pequeña, asimétrica con orientación general NNW-SSE, sus dimensiones son de aproximadamente 60 km de largo por 13 km de ancho. Se estima que dio origen a la formación de la Cuenca Ayuquila en el Bajoniano-Bathoniano, asociado a la exhumación del Complejo Ayú. Esto de acuerdo a una extensión con un sentido SSE-NNW, asociado a la ruptura de Pangea (Campos-Madrigal et al., 2013; De la Torre, 2019). Tecamazúchil y Solano. Campos-

Madrigal (2013) propone que las condiciones de depósito de la Formación Ayuquila y la Formación Tecomazúchil no fueron las mismas debido a que en la primera la morfología era más prominente y con poca probabilidad de ser meteorizada. En el caso de la Tecomazúchil en ese momento el relieve en general era más plano con una menor probabilidad de que la fuente fuera meteorizada, lo cual generó el enriquecimiento de componentes más estables, es por ello que su composición es más cuarzosa. Además de indicarnos que el ambiente de formación fue más húmedo y tal vez en una ubicación meridional. Posteriormente, la región sufrió una transgresión en el Jurásico Tardío, durante la cual se depositaron las sucesiones marinas.

Por otro lado, en la región se reconocen las fallas de Río Salado y Las Peñas, la Falla de Río Salado se ubica al SW de Huajuapán de León, Oaxaca. Se tiene una aproximación de su longitud de 25 km, puede ser fácilmente identificada por medio de uso de imágenes satelitales y fotografías aéreas. La Falla de Río Salado de rumbo general ESE-WNW y que disloca al Complejo Acatlán, se ha interpretado como una falla lateral izquierda que cesó su mayor actividad antes del Oligoceno (Martiny *et al.*, 2012). De acuerdo a Martiny *et al.* (2012), la Falla Las Peñas se reconoce al SW de Huajuapán de León, como un rasgo estructural con una longitud aproximada de 18 km, con un buzamiento subvertical con orientación N-S, además de yuxtaponer sucesiones continentales Jurásicas con sucesiones marinas de la misma edad. La falla corta lavas y rocas volcanoclásticas del Oligoceno con un desplazamiento lateral izquierdo (Martiny *et al.*, 2012).

3. ESTRATIGRAFÍA

La sucesión estratigráfica del área se encuentra constituida por las formaciones La Mora, Diquiyú, Ayuquila, Tecomazúchil y Solano, columna estratigráfica que sobreyace al basamento representado por el Complejo Acatlán. Por otra parte, la formación Solano se correlaciona con las formaciones Mapache y Chimeco, ya que se depositaron al mismo tiempo, independientemente de pertenecer a facies diferentes. Están expuestas al norte del área de estudio. (Figura 4).

Complejo Acatlán

Nombre propuesto por Ortega-Gutiérrez (1978) para designar a un conjunto de rocas metamórficas expuestas entre los poblados de Petlalcingo y Chila de las Flores; las cuales las describe en dos subgrupos (Petlalcingo y Acateco) por las características que presentan.

El subgrupo Petlalcingo se compone de tres formaciones:

Migmatita Magdalena, con una composición tonalítica-diorítica; Formación Chazumba, conformado por un esquisto pelítico, que contiene micas biotitas, feldespatos y cuarcitas. Por otra parte se encuentra la Formación Cosoltepec conformada por esquistos, rocas verdes y metapedernal.

De acuerdo a las características que presentan las rocas que componen a este subgrupo, se puede inferir que los protolitos corresponden a una sucesión marina, probablemente pelágica de grauvacas, lutitas, pedernales y en menor proporción carbonatos.

El subgrupo Acateco consiste en dos formaciones:

La Formación Xayacatlán que está compuesta por serpentinitas, metagabros, anfibolitas, eclogitas y esquistos verdes, atribuidos a una secuencia ofiolítica; mientras que, la segunda que es la Formación Tecomate contiene psamitas, semipelitas, metagrauvacas, metacaliza y algunos restos fósiles. Esto indica que sus protolitos se acumularon en una zona de plataforma somera.

Granitoide Esperanza está constituido por rocas graníticas, pegmatíticas y milonitizadas en distintos grados, se encuentra en contacto con el subgrupo Acateco. En algunas zonas aparece con un contacto tectónico y otros como una aparente intrusión.

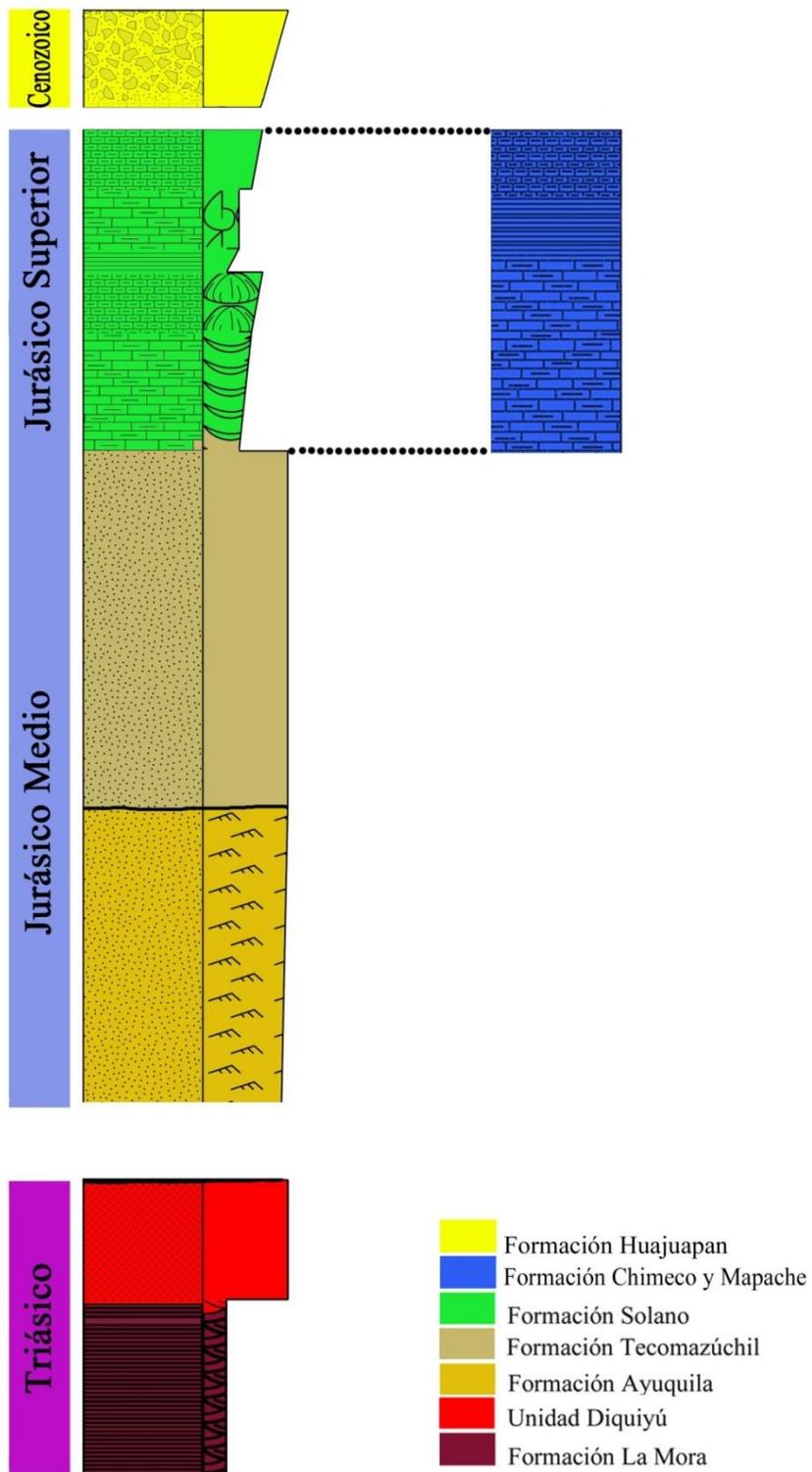


Figura 4. Columna estratigráfica esquemática del área de estudio.

Formación La Mora

La Formación La Mora está constituida por una sucesión de estratos delgados de limolita, lodolita y arenisca con algunos lentes de grava (Silva-Romo *et al.*, 2015). La unidad presenta dos áreas de afloramiento, la correspondiente a este estudio y otra en las cercanías de Chilixtlahuaca, Oax. Está cubierta discordantemente por la Formación Ayuquila. Al norte, en el afloramiento entre San José Chapultepec y Chilixtlahuaca se encuentra altamente deformada por un acortamiento, generando sistemas de pliegues apretados, ahí se encuentra el contacto con el Litodema de Chilixtlahuaca, un cuerpo intrusivo de tipo granodiorítico (Campos-Madrigal *et al.*, 2013).

Formación Diquiyú

La Formación Diquiyú fue descrita por González-Torres (1989) al sur de Huajuapán de León, esta conformada por flujos andesíticos-basálticos con una textura porfídica en la que se encuentra una matriz fina con fenocristales de plagioclasa (andesina-oligoclasa), presenta amígdalas de cuarzo y piroxenos alterados. Por otra parte la litología que se presenta son riolitas con estructuras de flujo. (Schmitter in Ochoterena, 1981). La Formación Diquiyú consiste en cuerpos volcánicos que se encuentran sobreyaciendo a la Formación La Mora (Silva-Romo *et al.*, 2015). La Formación Diquiyú tiene una composición andesítica; sin embargo, se pueden encontrar algunos flujos volcánicos riolíticos, varios fragmentos de rocas de composición andesíticos-basálticos; además de que en algunas zonas se encuentra alterado hidrotermalmente, en algunas otras zonas se encuentra con deformación cataclástica. (Morán-Zenteno, 1983).

Formación Ayuquila

Campos-Madrigal *et al.* (2013) subdivide a la Formación Tecomazúchil descrita por Morán-Zenteno *et al.* (1993) por sus características litológicas y por la presencia de una discordancia angular mayor. Así, Campos-Madrigal *et al.* (2013) denominan como Formación Ayuquila (Ortega-Gutiérrez, 1978b) a la unidad debajo de la discordancia angular. La Formación Ayuquila está constituida en la base por conglomerados monomícticos y oligomícticos con fragmentos del tamaño de guijarros, los clastos se encuentran compuestos por fragmentos de rocas sedimentarias, esquistos provenientes del

Complejo Acatlán y fragmentos de cuarzo, la matriz que los contiene es una arena gruesa. Los clastos sedimentarios son de arenisca de grano fino a medio, tienen procedencia de la Formación La Mora; el color rojizo es característico de esta formación (Campos *et al.*, 2013). Los fragmentos de rocas metamórficas y de cuarzo corresponden a los complejos metamórficos cercanos; sin embargo, predominan los guijarros de cuarzo metamórfico sobre los guijarros de roca metamórfica (esquisto).

Formación Tecmazúchil

Denominada originalmente por Pérez-Ibargüengoitia *et al.* (1965) caracterizada por su coloración de café amarillento a café crema, se encuentra constituida en la base por arcosas conglomeráticas no rítmicas a lito arenitas, que regularmente tienen estratificaciones y laminaciones cruzadas, con algunos restos de plantas fósiles (Caballero-Miranda, 1990). Además de incluir conglomerados arenosos, limolitas y limolitas arenosas (Morán-Zenteno *et al.*, 1993). Se caracteriza por presentar algunos estratos lenticulares con granulometrías gruesas (Morán-Zenteno *et al.*, 1993). Tecmazúchil en términos generales se encuentra constituida por cuarzo (38%) con un origen metamórfico, feldespatos en una proporción del 16 al 33%, fragmentos líticos en su mayoría provenientes de rocas metamórficas (8% al 23%). Micas con 2.5%, minerales pesados como hematita con un promedio del 5% y finalmente con materia orgánica que se encuentra en un orden del 3%. (Morán-Zenteno *et al.*, 1993). La Formación Tecmazúchil se presenta en estratos muy gruesos, lo cual hace una diferencia con respecto a la Formación Ayuquila, el contacto que tienen ambas formaciones es discordante. Se encuentra subyaciendo a la Formación Chimeco mediante un contacto concordante y transicional (Campos-Madrigal *et al.*, 2013). De acuerdo a este autor, la edad de la Formación Tecmazúchil corresponde al Jurásico Medio con base en el análisis de circones detríticos analizados por el método isotópico de U-Pb que arrojaron una edad máxima de depósito de 174 ± 2 Ma.

Formación Solano

Conformada por rocas calcáreas, con presencia de laminaciones de lutitas calcáreas. Algunos estratos presentan cambios de coloración de gris claro a oscuro, con esto se confirma su alto contenido de materia orgánica (López-Ticha, 1985). Cabe señalar que algunas muestras de mano tienen Gilsonita, es un tipo de resina carbonosa de color negra con un lustre ceroso a vítreo. (Schlumberger, 2018). La unidad presenta estratos con un espesor de 1.5 metros en las localidades estudiadas y laminaciones que oscilan de entre los 3 a 5 cm, en las partes con mayor contenido de terrígenos se encuentra más deformada (Caballero-Miranda, 1990), y es más deleznable. Por lo general la Formación Solano presenta una matriz micrítica, en la cual se observan intraclastos y bioclastos (de equinodermos), en ocasiones con laminación e incluye nódulos pequeños de óxido de hierro. De acuerdo a la clasificación de Dunham

(1962), la Formación Solano consiste en mudstone y wackestone (Ver Apéndice petrográfico), son frecuentes vetillas de calcita con distintas orientaciones. En la Localidad 1. Se observan restos fósiles entre otros, valvas de pelecípodos y radiolas, este contenido fósil sugiera un ambiente de depósito somero. (Figura 5); sin embargo, se han reportado amonites *Virgatosphinctes sp.* y *Substeueroceras sp.* (Caballero-Miranda, 1990), con lo que infiere una zona de mayor profundidad; aunado a esto se han documentado nódulos de óxidos de hierro (hematita). Caballero-Miranda (1990) con base en el contenido de *Virgatosphinctes sp.* y *Substeueroceras sp.* (Figura 6), ubica a la Formación Solano en el Jurásico Tardío e infiere un ambiente de depósito de mar abierto. En la localidad 1, la unidad se encuentra cubierta por los conglomerados calcáreos de la Formación Huajuapán del Paleógeno.

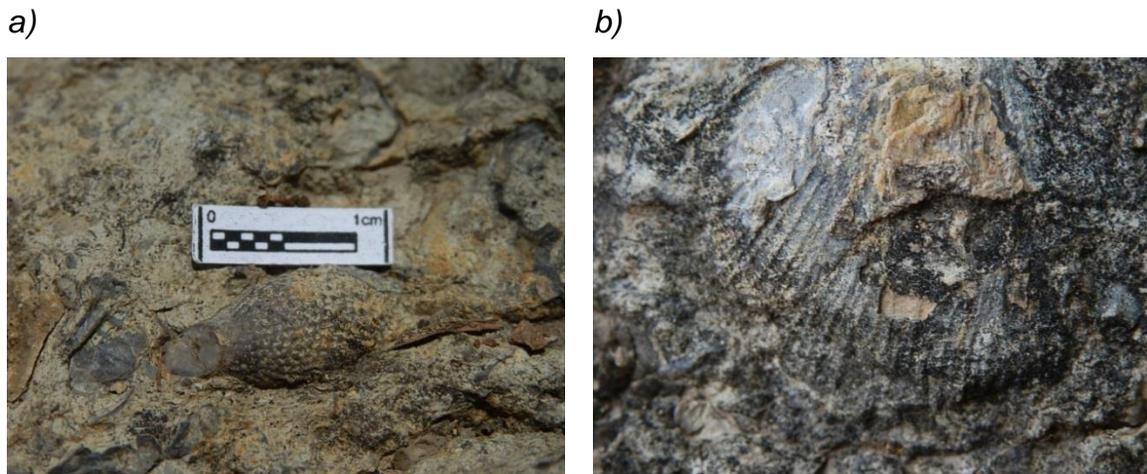


Figura 5. Más adelante de la Localidad 2 en la carretera Huajuapán de León- Juxtlahuaca, se encontró un banco fosilífero. **a)** Restos de radiolas de equinodermos. **b)** Fragmento de un bivalvo.



Figura 6. Amonite colectado en la Localidad 1 Carretera a Mariscal, los especímenes que se han encontrado están deformados, incompletos en su mayoría.

Formaciones Chimeco y Mapache

Las formaciones Chimeco y Mapache afloran en el norte de la Cuenca Ayuquila, se asume que hacia el sur, en el área estudio, se correlacionan con la Formación Solano por las relaciones espacio-tiempo y sus facies en las que van aflorando. La Formación Chimeco está compuesta por calizas arenosas, areniscas calcáreas y oosparita; esto en la parte inferior, mientras que en la parte superior se encuentran calizas arenosas y calizas arcillosas con presencia de equinoides, pelecípodos y pistas de gusanos (Pérez-Ibargüengoitia et al., 1965). La Formación Chimeco tiene un espesor de aproximadamente 100 m, subyace concordantemente a la Formación Mapache. Mientras que su contacto con la Formación Tecomazúchil en el área de El Limón se encuentra con una discordancia angular. Hacia el sur en Santiago Chilixtlahuaca desaparece producto de erosión (Caballero-Miranda, 1990). El ambiente de formación inicialmente se atribuye a una zona litoral de alta energía, con aportes de corrientes fluviales, donde se formaron lutitas y limolitas. Posteriormente con un decremento en la energía se dio paso a una sedimentación lenta, con influencia de aguas dulces; es por ello que se encuentran equinodermos (Caballero-Miranda, 1990).

La Formación Mapache está constituida por una sucesión calcáreo-arcillosa. Se encuentra sobreyaciendo concordantemente a la Formación Chimeco, compuesta por calizas arcillosas con biomirrita, en las partes medias de la Formación se encuentran horizontes de lutita calcárea. En estas rocas se han encontrado fósiles de pelecípodos, braquiópodos, gasterópodos, corales y amonitas. Al encontrar los fósiles antes mencionados se cree que el ambiente de formación fue somero en una laguna con intermitentes conexiones con el mar.

Formación Huajuapán

Constituida por un conglomerado cementado por carbonatos de calcio, contiene clastos redondeados a subredondeados. Se encuentra expuesta en el entorno de Huajuapán de León, Oax. En el área de Ayuquila está constituida por una arena conglomerática, con tonos rojizos, bien cementada, con fragmentos líticos correspondientes a esquistos, areniscas, conglomerado y cuarzo; mientras que, en el área de Zapotitlán-Palmas-Hujuapán, el conglomerado está compuesto por fragmentos líticos subredondeados a redondeados de caliza, pedernal, cuarzo y calcedonia. Se estima que tiene un

espesor aproximado de 250 m. En el área de estudio, la Formación Huajuapán se encuentra dispuesta subhorizontalmente con una ligera inclinación de 5° al noroeste.

4. Sistema de Fallas Las Peñas

De acuerdo las relaciones de campo, la Formación Solano presenta un área de afloramiento burdamente en forma triangular, delimitada por dos fallas convergentes hacia el sur, la occidental con rumbo general N-NW – S-SE y la oriental con rumbo Norte-Sur. En adelante, en este trabajo se hace referencia a ambas fallas como el Sistema de Fallas Las Peñas. (Figura 7). Así, la Formación Solano presenta límites estructurales, al poniente con las formaciones Tecomazúchil y Ayuquila. Al oriente se encuentra en contacto con las formaciones Ayuquila y La Mora. Para establecer la cinemática y cronología en la deformación, en este trabajo se estudiaron dos localidades en la falla poniente y una en la falla oriental (ver la Figura 7). En las zonas de falla se obtuvieron datos estructurales para caracterizar las superficies de falla y los pliegues menores definidos en las rocas de falla, se identificaron y registraron indicadores cinemáticos. Se obtuvieron datos de planos de estratificación y de cruceo. Los datos estructurales colectados en campo, se procesaron mediante los softwares Stereo32®, Stereonet y Dips. Se realizó el cálculo del plano axial teórico, dato que fue comparado con el dato estructural medido en campo, además se realizaron cálculos del ángulo entre flancos para clasificar los pliegues. Los diagramas que resultaron, se redibujaron con asistencia en software vectorial AutoCad®.



Figura 7. Localidades con análisis estructural en los contactos por falla:

- 1) entre las formaciones Tecamazúchil y Solano
- 2) entre las formaciones La Mora y Solano
- 3) entre las formaciones Ayuquila y Solano.

Para identificar las unidades involucradas consultar Figura 1.

Indicadores cinemáticos

Para identificar el sentido del desplazamiento en las superficies de falla, se aplicaron los indicadores cinemáticos de Doblas (1998). En su tabla de compilación, Doblas (1998) ilustra 61 indicadores cinemáticos, clasificados en 11 grupos mayores de acuerdo a sus características geométricas y morfológicas. Esos criterios cinemáticos se califican de acuerdo su grado de confianza como buenos, neutros y pobres; de acuerdo a Doblas (1998) un criterio es bueno cuando fue citado en la literatura como tal y se reconoce en investigaciones recientes; un criterio neutro cuando ha sido citado pero no fue comprobado en la naturaleza y finalmente un criterio pobre es aquel cuya aplicación conduce a resultados contradictorios tanto en publicaciones, como en afloramientos. En la tabla se presentan las tres localidades que exponen los indicadores cinemáticos tipo TM, IS y ST (Figura 8). Los más frecuentes son los TM material por acarreo que los tenemos presentes en las tres áreas de estudio, seguidos a estos, se encuentran los ST que son escalones con crecimiento de cristales que fueron observados en la falla entre las formaciones Solano y Ayuquila en la localidad 3; finalmente los indicadores IS fueron los menos frecuentes; sin embargo, ofrecen una noción clara del sentido de movimiento entre las formaciones Solano y La Mora en la localidad 2. A continuación se presentan



Figura 9. Plano de falla donde se pueden apreciar estrías, a menor distancia se aprecia el acarreo de material. TM-03.
Localidad 1 Formación Tecomazúchil, Área de contacto estructural entre las formaciones Tecomazúchil y Solano.

Indicador ST Escalones

Los escalonamientos suelen encontrarse normales al plano de falla con respecto al desplazamiento de la misma y son sub-perpendiculares a las estrías de la falla. Esto es aplicable para las rocas que presentan crecimiento de cristales en las zonas de “sombra” y también se aplica para milonitas que se encuentran muy deformadas con rasgos SC y que muestran una gran cantidad de rasgos de escalonamiento. Los rasgos SC se forman en deformaciones dúctiles, el desplazamiento de los planos de la cizalla generan estructuras sigmoidales (S), y los planos o estructuras paralelas a la cizalla reciben el nombre de C.

El indicador observado en los afloramientos de la Formación Solano es de tipo ST-03 (escalonado con crecimiento de cristales) (Figura 10). Se conoce que el crecimiento de cristales es de los mejores indicadores que existen ya que nos muestra el sentido de desplazamiento, además de que estos suelen crecer en las zonas de sombra de los escalones (Doblas, 1998).

a)



b)



Figura 10. Los indicadores ST-03 se encuentran presentes en fracturas y en los planos de falla. a) Fractura rellena de cristales euhedrales de calcita variedad diente de perro Localidad 3. b) Crecimiento de cristales de calcita en plano de falla. Localidad 3.

Indicadores Arreglo de Estructuras Planas Inclinas (IS)

Este tipo de indicadores es de gran ayuda ya que nos muestra una serie de estructuras escalonadas sobre un plano hacia el movimiento del bloque opuesto. Doblas (1998) divide a los Arreglo de Estructuras Planas Inclinas en seis indicadores de este tipo, de acuerdo a sus geometrías en sección. En este caso, en campo pudimos comprobar indicadores cinemáticos que corresponden a este grupo, en el que vimos los IS-01, geometrías tipo-SC que son aquellos que forman sigmoides en formas de “S” y planos se observan de corte “C” (Figura 8), se encuentran en rocas altamente deformadas por zonas de falla, en ambiente dúctiles.

Estructuras analizadas

Estructuras en la Localidad 1 Contacto formaciones Tecomazúchil y Solano

Se analizó el contacto estructural entre las formaciones Solano y Tecomazúchil (Falla occidental) y los pliegues menores que presenta la Formación Solano (Figura 11). En el plano de falla está emplazado un dique de composición andesítica. Al norte de la localidad, se observa el contacto discordante de las sucesiones jurásicas con la Formación Huajuapán; que está aflorando con una inclinación de 5° al noroeste. En la proyección de la falla, la losa no se aprecia dislocada.

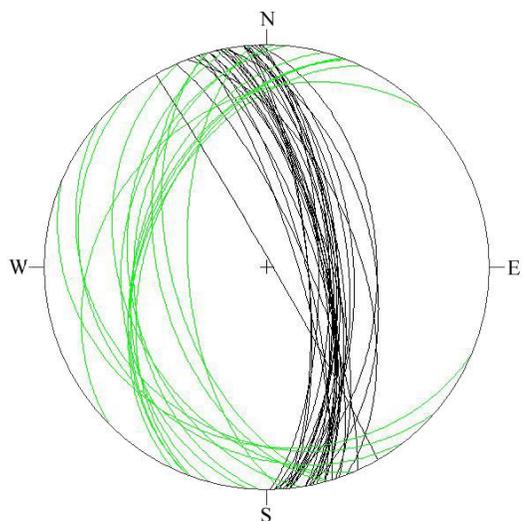


Figura 11. Estereodiagrama que ilustra las relaciones estructurales en el contacto entre las formaciones Tecomazúchil y Solano. Localidad 1. Simbología Traza en color negro= superficie de estratificación. Traza en color verde= superficie de cruce en la Formación Solano. Proyección de Schmidt, Hemisferio Inferior.

En el banco de material contiguo a la falla occidental, se obtuvieron datos estructurales de pliegues menores (flancos, plano axial y línea de charnela) desarrollados en la Formación Solano (Figura 12). Se observaron pliegues, que de acuerdo su geometría y ángulo se clasificaron por su ángulo entre flancos como cerrados y abiertos, por la orientación del plano axial recumbentes y por la tipo chevron. Los pliegues que más abundan son de tipo cerrados (Tablas 1 y 2 Apéndice estructural), los planos axiales tienen una orientación NNW-SSE. Los amonites hallados se encuentran deformados, establecieron un nuevo indicador cinemático para la localidad.



Figura 12. *Pliques estructurales menores que presenta la Formación Solano en la Localidad 1 (Banco de material en la carretera Huajuapán de León-Mariscala). Vista hacia el sector Oriental del afloramiento.*

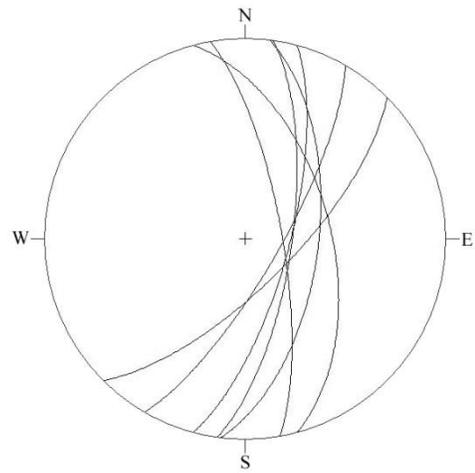
Estructuras en la Localidad 2 Contacto entre las formaciones La Mora y Solano.

Se analizó la zona de falla entre las formaciones La Mora y Solano (Figura 7). En las rocas de falla se observan pliegues menores, de los cuales se obtuvieron datos de flancos, planos axiales y charnelas. Estos pliegues presentan charnelas subverticales a verticales, además de estar apretados. En ese afloramiento se obtuvieron datos de estratificación, datos de estrías y se caracterizaron algunos indicadores cinemáticos, el indicador que hallamos es tipo IS y coincide con el desplazamiento del movimiento de tipo lateral, en consecuencia rotaron los pliegues, indicadores hallados permite, inferir más de una etapa de deformación asociada a desplazamientos laterales (Figuras 13 y 14).

a)



b)



c)



d)



Figura 13. Localidad 2 Límite estructural entre las formaciones La Mora y Solano. a) Toma de datos de pliegues (planos axiales, charnelas y flancos) e indicadores cinemáticos en las rocas de falla. b) Estereograma de las superficies de falla entre ambas formaciones. Proyección de Schmidt/ Hemisferio Inferior. c y d) Pliegues menores con superficies axiales subverticales.

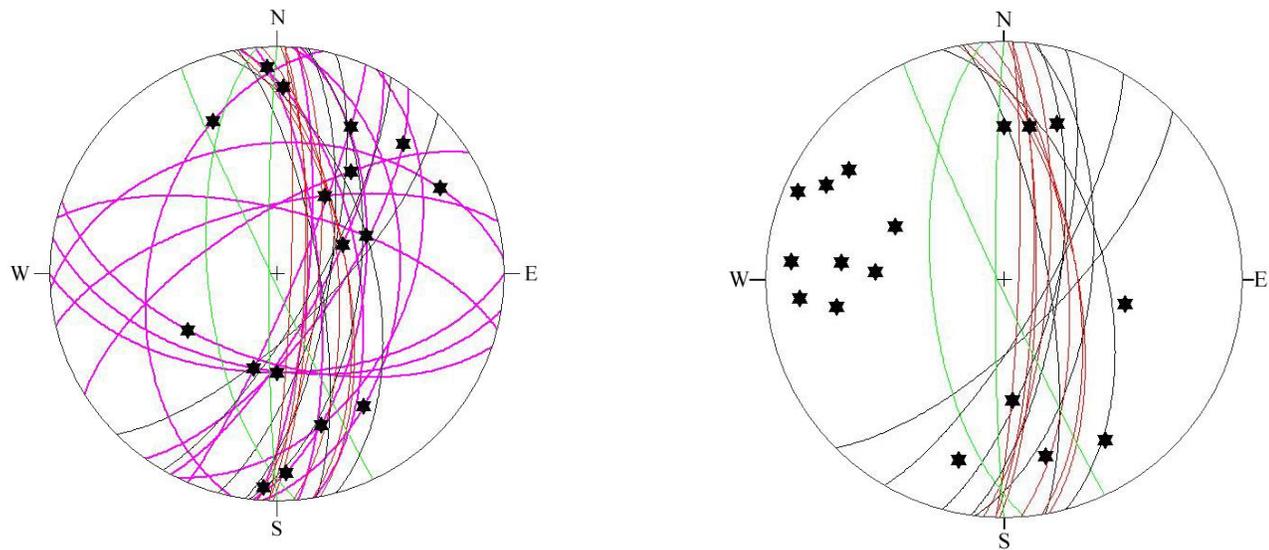


Figura 14. Rasgos estructurales en la Localidad 2. Izquierda Estereograma que ilustra la posición de las superficies de estratificación (traza roja), planos de falla (traza negra), planos axiales calculados de los pliegues en las rocas de falla (traza rosa), crucero (traza verde) y charnela calculada (estrella). **Derecha.** Estereograma que expresa los polos de los planos axiales calculados (estrella), superficie de estratificación (traza roja), fallas (traza negra) y crucero (verde). Proyección Schmidt, Hemisferio Inferior.

Estructuras en la Localidad 3 Contacto entre las formaciones Ayuquila y Solano

Se observa el contacto estructural entre la Formación Ayuquila y la Formación Solano (Falla occidental) (Figura 15), aquí el levantamiento estructural consistió en la toma de datos de estratificación, fracturas, fallas, cruceros y la caracterización de la falla entre ambas formaciones. Se aprovechó que en la segunda visita a esta área se había realizado un nuevo corte a la terracería, y se obtuvieron datos muy claros de la estratificación, estos fueron graficados en un estereograma de crucero y superficies de estratificación. El crucero en esta localidad se encuentra dispuesto casi perpendicular a la estratificación (Figura 16). La estratificación tiene datos muy similares a los planos de falla, con orientaciones NNW-SSE (Tabla 5 Anexo Estructural).

En la Figura 17 se presenta la síntesis de los rasgos estructurales recabado en el Sistema de Fallas Las Peñas.

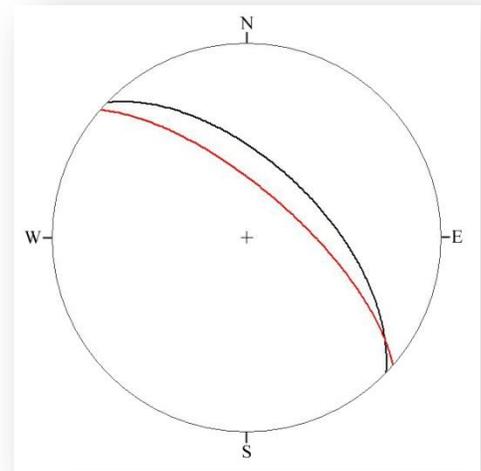


Figura 15., que ilustra el plano de falla (traza roja) entre la Formación Ayuquila y la Formación Solano, la estratificación (traza negra) que presenta la Formación Solano en el contacto. Localidad 3 Proyección Schmidt, hemisferio inferior.

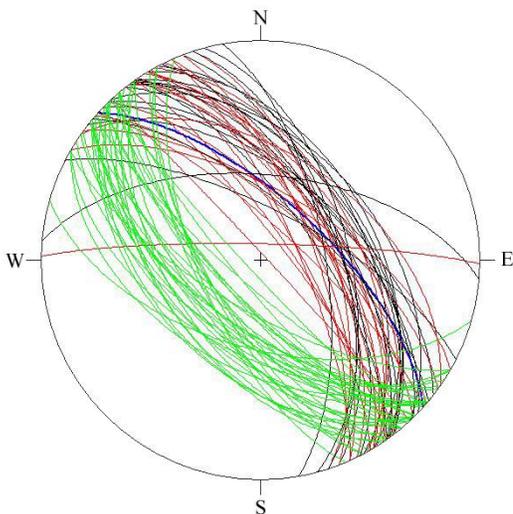
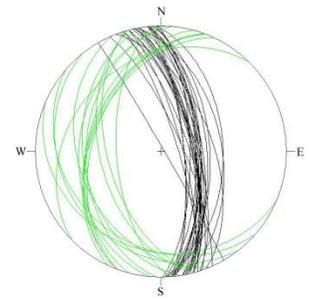


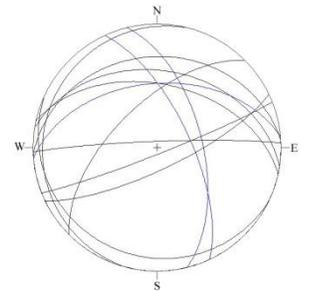
Figura 16. Estereodiagrama que ilustra las relaciones estructurales en el contacto entre las formaciones Ayuquila y Solano. Localidad 3. Simbología Traza en rojo = superficies de falla. Traza en azul = superficie de la falla occidental. Traza en color negro= superficie de estratificación. Traza en color verde= superficie de cruceo en la Formación Solano. Proyección de Schmidt, hemisferio inferior.



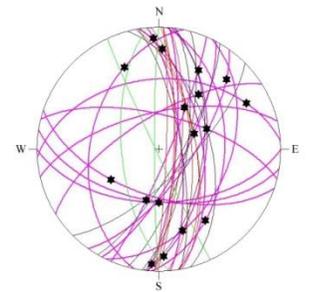
1a)



1b)



2)



3)

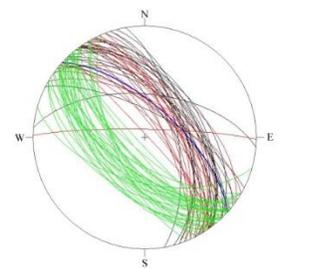


Figura 17. Rasgos estructurales observados en el Sistema de Fallas Las Peñas. **1a)** Localidad 1 Crucero (traza verde) y estratificación (traza negra) en la Formación Solano, **1b)** Localidad 1 Estereograma que presenta los datos del promedio de los planos axiales (negro) calculados de los sistemas de pliegues con respecto a los datos de la zona de falla (azul) que tienen las formaciones Solano y Tecamazúchil. **2)** Localidad 2 contiene datos de planos de estratificación (rojo), planos de falla (negro), planos axiales calculados de los pliegues (rosa), crucero (verde) y líneas de charnela calculadas (estrella). Contacto entre Solano y La Mora. **3)** Localidad 3. Crucero (traza verde), estratificación (traza negra), superficies de falla (traza roja) y Falla principal entre las formaciones Ayuquila y Solano (azul).

5. ANÁLISIS DE DATOS Y DISCUSIÓN

En la Localidad 1 en la zona de la Falla Occidental, se reconocieron rasgos de deformación en las dos unidades litoestratigráficas en contacto estructural. Por un lado, la Formación Solano presenta deformación penetrativa a manera de crucero con un rumbo semejante al propio de la estratificación. (Figura 19b). Por el otro lado, la Formación Tecomazúchil presenta deformación frágil a discontinuidades con un arreglo compatible con desplazamiento lateral derecho. En tanto que el crucero desarrollado en la Formación Solano sugiere un desplazamiento normal entre los bloques, con bloque de techo al oriente. En el banco de material labrado en la Formación Solano al oriente de la Falla, en unas fallas menores de rumbo general NNW-SSE se reconocieron indicadores cinemáticos de tipo IS-01, TM-03, que documentan desplazamiento lateral derecho. En cambio, los pliegues menores caracterizados en este trabajo tienen un arreglo que no es concluyente para considerarlos como pliegues sin-tectónicos. Estos pliegues tienen características más afines a pliegues sin-sedimentarios formados por deslizamiento gravitatorio, durante la acumulación de la Formación Solano. Los pliegues infieren la paleo-pendiente de la cuenca.

En la Localidad 2 se observa el contacto tectónico entre las Formaciones Solano y La Mora, en trabajos previos esta última formación se consideraba como parte de la Formación Tecomazúchil (Caballero-Miranda, 1990; Morán-Zenteno et al. 1993). De tal forma, se asumía una relación estratigráfica en ese, ahora descrito como Falla oriental con un rumbo general norte-sur y subvertical (Figura 17). En este afloramiento, las charnelas de los pliegues menores desarrollados en las rocas deformadas de la formación Solano, se asume que están asociados al plano subvertical de la falla.

Una vez que fueron recalculados los datos de charnelas y plano axial, y con base en los datos de los flancos, los pliegues menores se pueden agrupar en tres familias que sugieren, cada una, un sentido de desplazamiento en particular para la Falla Oriental. 1) Una familia de pliegues con charnela subhorizontal y superficie axial con rumbo general al norte e inclinada el oriente, sugiere un desplazamiento por falla inversa con bloque de techo en el oriente (Figura 18). 2) Una familia de pliegues con charnela sub-vertical y superficie axial sub-vertical y con rumbo general Sureste-Noroeste, la cual es compatible con un desplazamiento lateral derecho. 3) Otra familia también con charnelas y superficies axiales sub-verticales, y éstas superficies con rumbo suroeste-noreste, lo que sugiere un desplazamiento lateral izquierdo para la Falla Oriental, tal como lo propusieron Martiny et

al. (2012), quienes lo reconocieron desplazamiento lateral para la Falla Las Peñas que afecta incluso a las rocas volcánicas del Oligoceno.

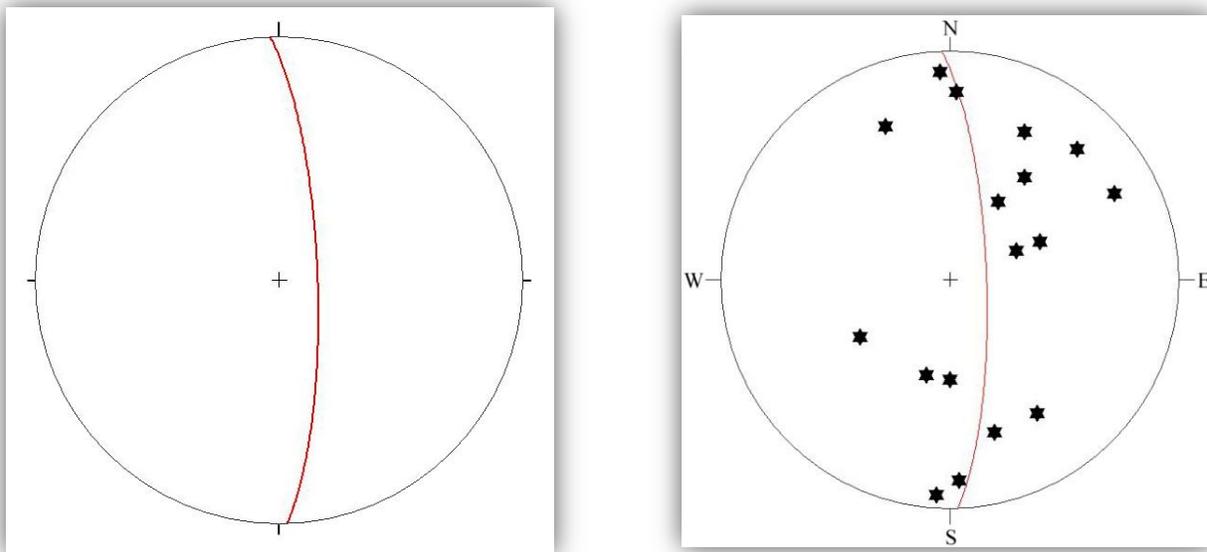


Figura 17 Representa la traza de la Falla Oriental entre las formaciones Solano y La Mora. En la Localidad 2. b). Traza de la falla Oriental y charnelas (estrella) de los pliegues en la zona de falla. Proyección de Schmidt, hemisferio inferior.

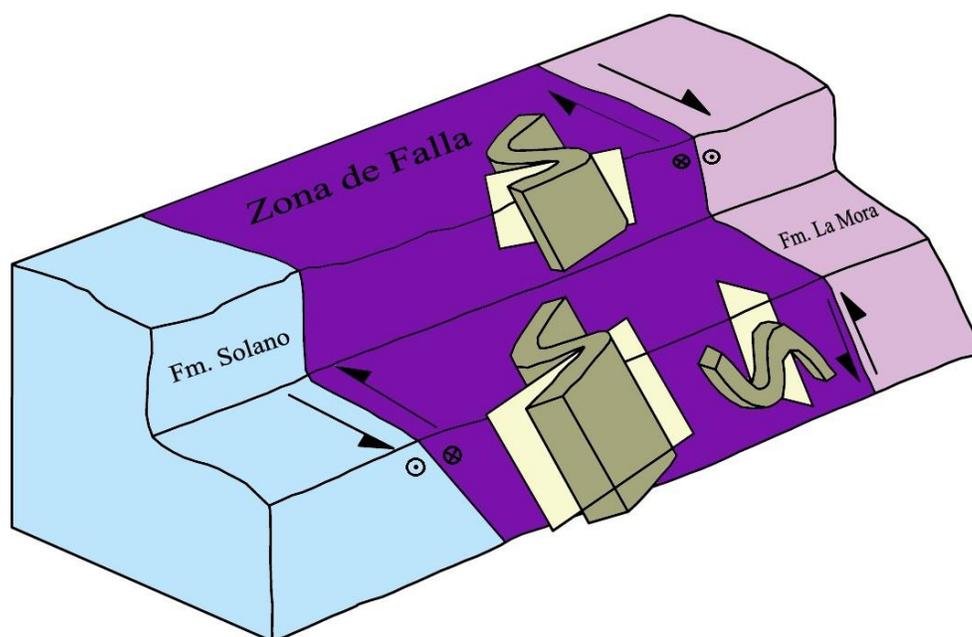


Figura 18. Esquema que muestra la cinemática inferida en este trabajo con base en la disposición de las charnelas y superficies axiales recalculadas de los pliegues menores desarrollados en las rocas de falla en la Localidad 2. **a)** Desplazamiento lateral derecho sugerido por los pliegues con charnela sub-vertical y plano axial con rumbo general suroeste-noreste. **b)** Desplazamiento lateral izquierdo expresado por los pliegues con charnela sub-vertical y plano axial con rumbo general sureste-noroeste **c)** Desplazamiento inverso sugerido por los pliegues con charnela sub-horizontal y plano axial con rumbo general suroeste-noreste.

Se tienen dos arreglos en la formación Solano, uno en el que se presentan las superficies de estratificación y la superficie de falla, y la segunda que hace referencia al crucero con un ángulo agudo de aproximadamente 60° . Lo cual sugiere una fase de deformación de acuerdo a fallamiento normal con bloque caído al oriente. Así se explica el desarrollo de crucero en los estratos calcáreo-arcillosos de la Formación Solano (Figura 19), sin descartar que previamente pudiera ocurrir una fase de desplazamiento lateral como lo sugiere la geometría general del afloramiento de la Formación Solano.

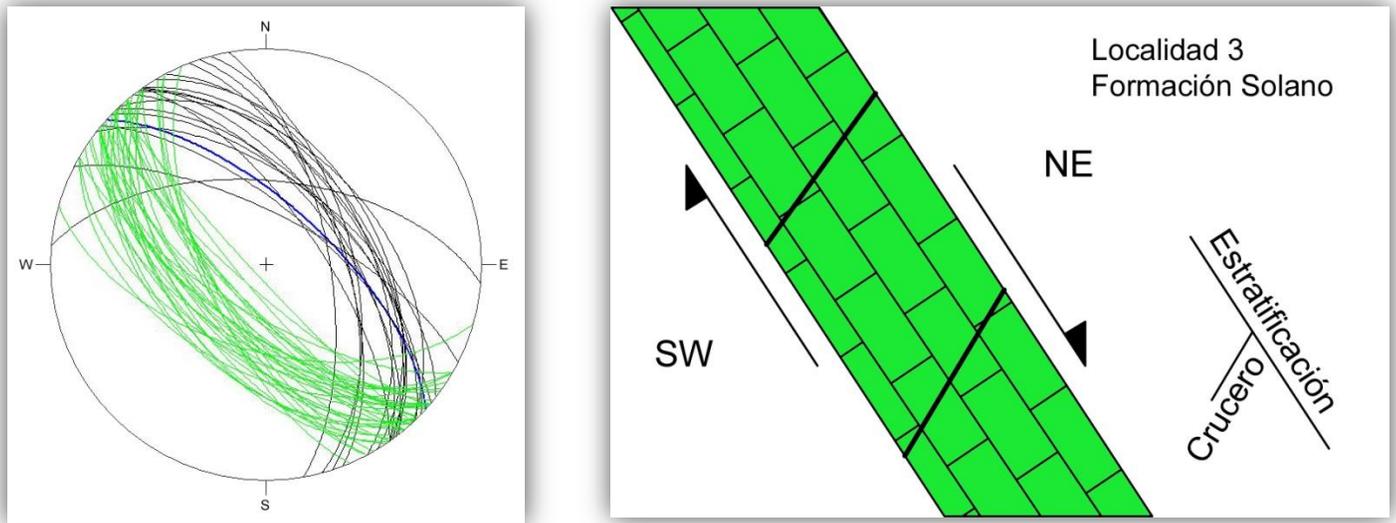


Figura 19. a) Estereograma de la relación de cruceiro, estratificación y falla principal entre las formaciones Solano y Ayuquila en la Localidad 3. Proyección de Schmidt, hemisferio inferior. b) Esquema que ilustra la cinemática reconocida entre las formaciones Ayuquila y Solano en la Localidad 3.

En trabajos anteriores se infería que la Formación Solano era parte de un sinclinal llamado Acatlima-Solano-Yosocuta (Caballero-Miranda, 1990); sin embargo, las relaciones espaciales y estructurales de la Formación Solano con las unidades litoestratigráficas con las que tienen contacto, son diferentes a las reconocidas para proponer la estructura sinclinal. Ya que en ese modelo no se contemplaban a otras formaciones que se encuentran en contacto con la Formación Solano, como es el caso de La Mora y no se contemplaba dentro de la estructura a la Formación Diquiyú. Además en el modelo en cuestión se disponen a las formaciones involucradas en forma especular, con la Formación Solano en el núcleo y a la Formación Tecamazuchil en los flancos. En este trabajo se identificaron las unidades litoestratigráficas reportadas en el área por de De la Torre-González (2019) (Figura 20). Con base en las relaciones espaciales y estructurales que se reportan en este trabajo, se propone que la formación Solano se encuentra comprendida entre dos fallas de vida larga.

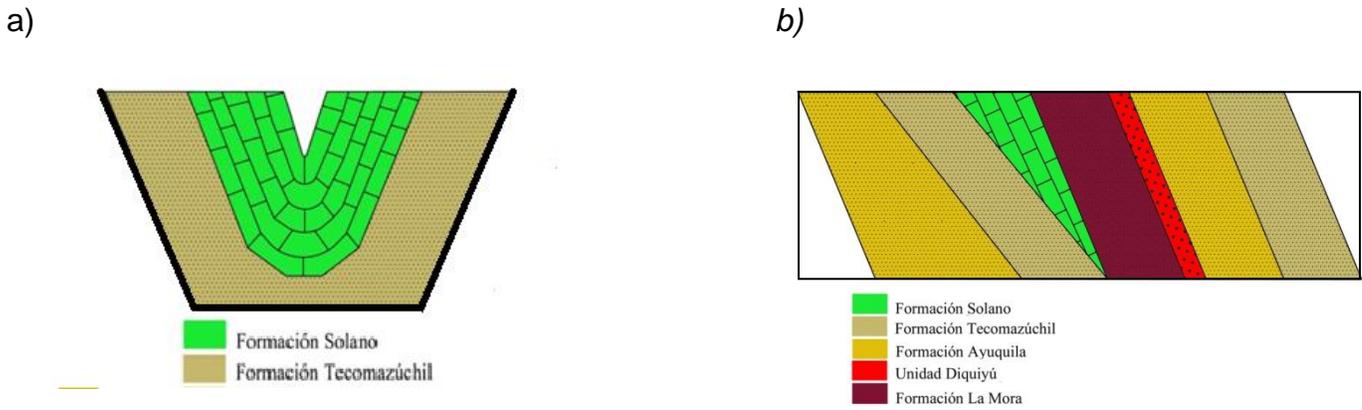


Figura 20. Interpretación estructural del área de estudio, a) Formación Solano en el núcleo de un sinclinal al considerar expuesta, en el sector oriental, a la Formación Tecamazúchil (en sentido amplio) (Caballero-Miranda, 1990). b) Relaciones espaciales de la Formación Solano por Fallas laterales reconocida en este trabajo, con base en la columna estratigráfica propuesta por de De la Torre-González, (2019).

6. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en el análisis estructural de la Falla Las Peñas y las fallas reconocidas en la Formación Solano, concluimos lo siguiente:

1. Al sur de Huajuapán de León, Oaxaca, se reconoce al Sistema de Falla Las Peñas el cual consiste en dos fallas laterales de rumbo general Norte-Sur, cuyas trazas convergen hacia el sur.
2. Entre las fallas del sistema se reconoce un afloramiento burdamente triangular de la Formación Solano, la cual está compuesta de caliza arcillosa y marga, con presencia de amonitas del Jurásico Tardío.
3. La Falla occidental yuxtapone a la Formación Solano con la Formación Ayuquila.
4. La Falla oriental pone en contacto tectónico a la Formación Solano con las formaciones Diquiyú y La Mora.
5. La cinemática del sistema se determinó con base en indicadores cinemáticos confiables como escalones por relleno de minerales neoformados (ST) y material acarreado (TM) y pliegues menores sintectónicos.
6. En la Falla oriental; entre las formaciones Solano y La Mora, las rocas de falla se presentan laminadas y definen pliegues centimétricos, por lo general del tipo cerrado o apretado. Se reconocieron tres familias de pliegues, una con charnela subhorizontal y con superficie axial inclinada hacia el oriente. Esta familia de pliegues en las rocas de falla es compatible con una cinemática de falla inversa. En tanto que, las otras dos familias de pliegues presentan charnelas subverticales y son compatibles con desplazamiento lateral izquierdo en aquellas con superficies axiales con rumbo noreste; y derecho la familia con superficies axiales con rumbo noroeste.
7. En el sector sur de la Falla occidental, la Formación Solano presenta superficies de estratificación subparalelas a la falla y se caracteriza por una deformación penetrativa a manera de crucero que es compatible con deslizamiento de falla normal.

Dadas las relaciones estructurales de la Formación Solano con las otras unidades litoestratigráficas en el Sistema de fallas, se descarta que la Formación Solano se encuentre en el núcleo de una estructura sinclinal y se proponen que sus límites corresponden con fallas de larga vida.

El Sistema de Fallas Las Peñas es un arreglo estructural de larga vida, que ha experimentado cinemática lateral derecha e inversa (muy probablemente en el Cretácico) y ha tenido reactivación como falla normal y lateral izquierda en el Oligoceno.

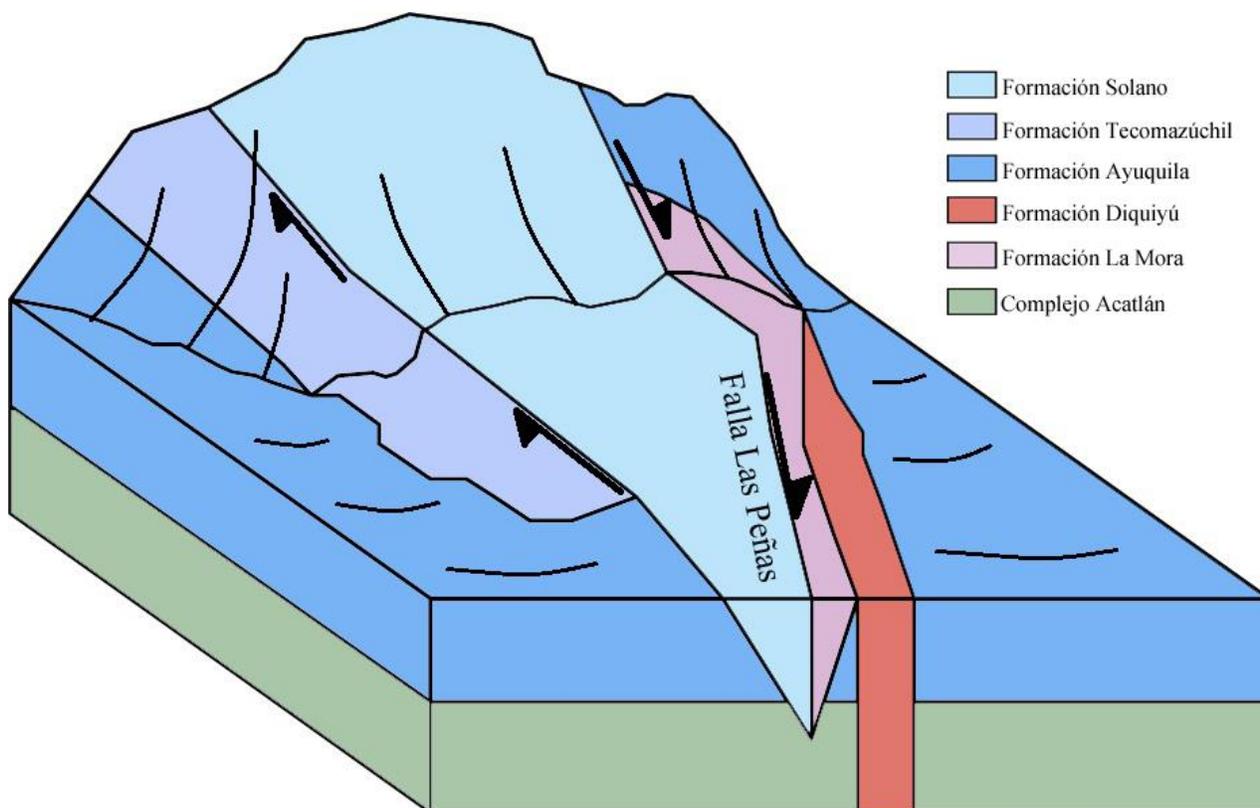


Figura 21. Bloque diagramático que ilustra la cinemática reconocida para el Sistema de Falla Las Peñas.

7. Referencias bibliográficas

Adams, A.E., MacKenzie, W.S., Guilford, C. Atlas de Rocas Sedimentarias. Masson Ed. 106p.

Boggs, S. 2009 Petrology Of Sedimentary Rocks. Cambridge Ed. , Second Edition, 600p.

Caballero-Miranda, C.I. 1990 Geología y Anisotropía Magnética del Jurásico Continental del Área de Huajuapán de León-Petlalingo, Estados de Oaxaca y Puebla. Tesis de Maestría Universidad Nacional Autónoma de México.

Campos-Madrugal, E., Centeno-García, E., Mendoza-Rosales, C.C., Silva-Romo, G. 2013. Sedimentología, reconstrucción paleoambiental y significado tectónico de las sucesiones clásticas del Jurásico Medio en el área de Texcalapa, Puebla-Huajuapán de León, Oaxaca: Revisión de las formaciones Ayuquila y Tecmazúchil. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 30, 24-50p.

De Sitter, L.U. 1970. Geología Estructural. Omega Ed. España.

Doblas, M., 1998, Slickenside kinematic indicators, Tectonophysics 295, 187-197p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) Carta Topográfica 1:50000 E14-D14 Huajuapán de León, Oaxaca.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) Carta Topográfica 1:50000 E14-D24 Tezoatlán de Luna y Segura, Oaxaca. INEGI

López-Ticha, O., 1985 Revisión de la estratigrafía y potencial petrolero de la Cuenca de Tlaxiaco. 37:1, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. 49-92p.

Martiny, B.M., Morán-Zenteno, D.J., Tolson, G., Silva-Romo, G., López-Martínez, M. 2010. The Salado River fault: reactivation of an Early Jurassic fault in a transfer zone during Laramide deformation in southern Mexico, International Geology Review, 54:2, 144-164p.

Morán-Zenteno, D.J., Caballero-Miranda, C.I., Silva-Romo, G., Ortega-Guerrero, B., González-Torres, E. 1993. Jurassic-Cretaceous paleogeographic evolution of the northern Mixteca Terrane, southern México, Geofísica Internacional 32:3, 453-473p.

Ortega-Gutiérrez, F., 1978a. Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, estados de Puebla y Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Revista 2: 2,112-131p.

Ortega-Gutiérrez, F., 1978b, Notas sobre la Geología del área entre Santa Cruz y Ayuquila, Edos. de Puebla y Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 44:2, 17-26p.

Pérez-Ibarguengoitia, J.M., Hokuto-Castillo, A. y Cserna, Z. de, 1965. Estratigrafía y paleontología del Jurásico Superior de la parte centro-meridional del Estado de Puebla. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 21, 5-22p.

Sedlock, R.L., Ortega-Gutierrez, F., Speed, R.C.. 1993. Tectonostratigraphic Terranes and Tectonic Evolution of Mexico. Vol. 278 Geological Society of America Special Paper.

Salinas-Rodríguez, J.M., García-González, J.F. 1999 Servicio Geológico Mexicano. Carta Geológica-Minera 1:50000 E14-D14 Huajuapán de León, Oaxaca. Tercera Edición.

Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C.C., Campos-Madrugal, E., Centeno-García, E., 2011. Formación La Mora, Unidad estratigráfica nueva del Triásico en el Terreno Mixteca (Noroeste de Huajuapán de León, Oax., México). Sedimentología y su significado: Simposium en Honor del Dr. Zoltan De Czerna, Distrito Federal, México, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 114-115p.

Silva-Romo, G., Mendoza-Rosales, C.C., Campos-Madrugal, E., Centeno-García, E., Peralta-Salazar, R. 2015. Early Mesozoic Southern Mexico-Amazonian connection based on U-Pb ages from detrital zircons: The La Mora Paleo-River in the Mixteca Terrane and its paleogeographic and tectonic implications. Gondwana Research 28:2,689-701p.

Schlumberger 2018. Oilfield Glossary. USA. <http://www.glossary.oilfield.slb.com>

Ture, V. Atlas ilustrado de los fósiles. Susaeta Ed. Madrid 283.

APÉNDICE ESTRUCTURAL

Pliegues menores

Localidad 1

Número	Flancos	Plano Axial	Línea de Charnela	Ángulo entre Flancos	Clasificación del pliegue
1	222°/70° 326°/66°	006°/71°	004°/67°	103°	Abierto
2	046°/76° 225°/18°	226°/77°	050°/16°	5°	Apretado
3	225°/18° 085°/35°	142°/81°	050°/13°	135°	Suave
4	065°/69° 064°/82°	064°/50°	089°/17°	3°	Apretado
5	285°/37° 035°/30°	089°/46°	096°/22°	70°	Cerrado
6	106°/47° 090°/57°	061°/61°	084°/28°	17°	Apretado
7	310°/70° 080°/70°	069°/82°		129°	Suave
8	112°/34° 090°/50°	067°/43°		23°	Apretado
9	142°/61° 051°/47°	087°/51°		89°	Abierto
10	075°/51° 279°/43°	060°/73°		24°	Apretado
Falla	S2= 075°/73°				

Tabla 1. Características y clasificación de los pliegues menores identificados en la Formación Solano en el banco de material al oriente de la Localidad 1 (14Q 624059 mE 1968534 mN).

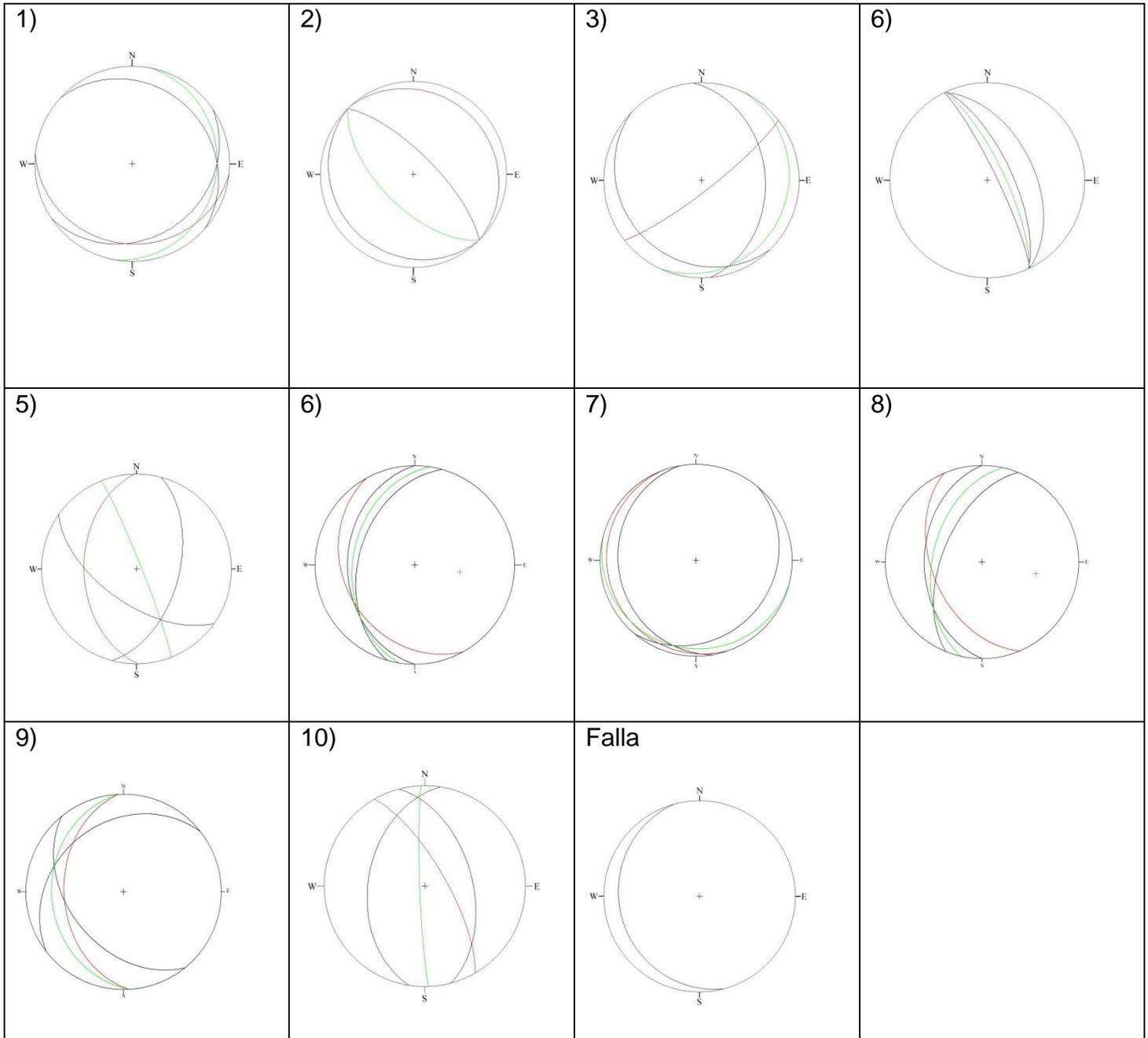


Tabla 2. Estereogramas de los pliegues menores caracterizados en Formación Solano. Localidad 1. Simbología. Traza roja = plano axial tomado en campo, Traza verde = plano axial calculado con el software. Traza negra flancos del pliegue, (Proyección de Schmidt, hemisferio inferior).

Número	Flancos	Plano Axial	Línea de Charnela	Ángulo entre flancos	Clasificación de Pliegue
1	245°/66° 290°/46°	016°/36°	110°/21°	137°	Suave
2	350°/31° 009°/64°	325°/36°	064°/39°	20°	Apretado
3	020°/31° 065°/35°	035°/75°	028°/22°	45°	Cerrado
4	275°/71° 110°/20°	045°/85°	050°/310°	17°	Apretado
5	055°/34° 080°/25°	029°/46°		25°	Apretado
6	042°/75° 075°/54°	105°/90°	042°/18°	34°	Cerrado
7	325°/15° 100°/32°	290°/87°	082°/15°	50°	Cerrado
8	110°/35° 240°/65°	160°/30°		129°	Suave

Tabla 3 Características y clasificación de los pliegues menores en la Formación Solano. Sector oriental del Banco de Material. Localidad 1. En la tabla 4 se presentan los estereodiagramas y las ilustraciones de los pliegues.

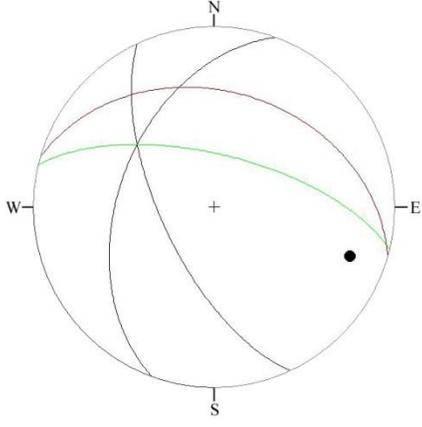
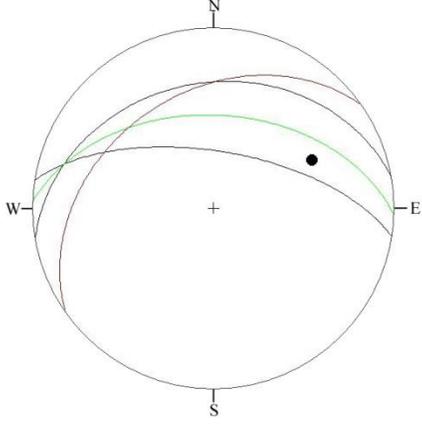
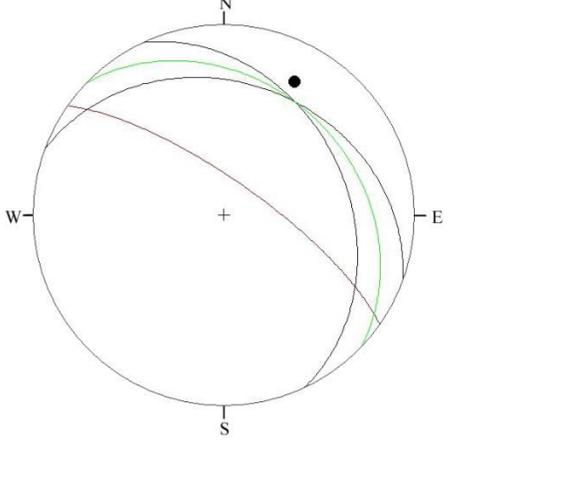
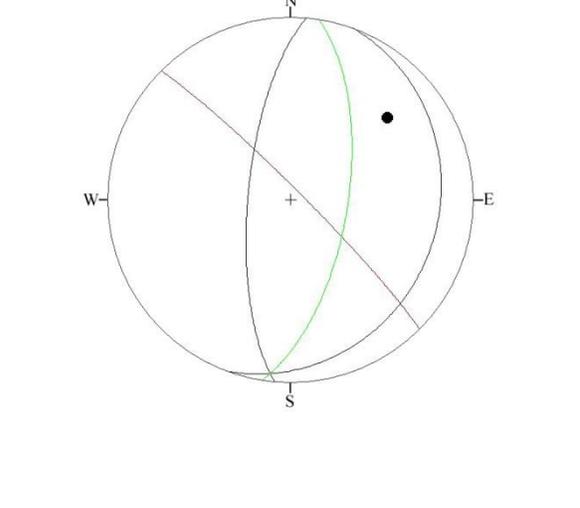
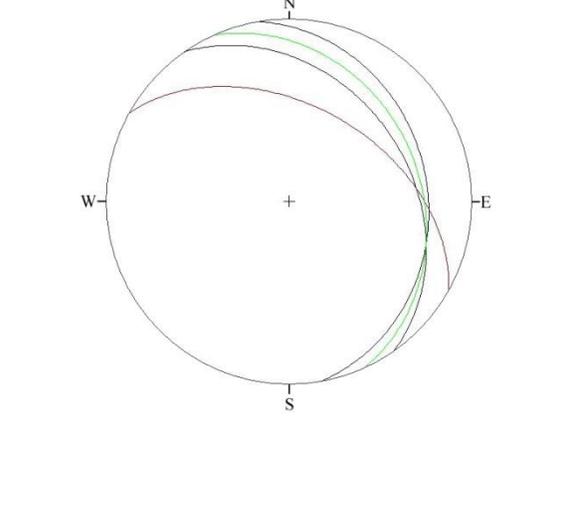
	<p>1)</p> 
	<p>2)</p> 

Tabla 4. Columna Izquierda. Estereogramas de los pliegues menores caracterizados en la Formaciones Solano Localidad 1. Simbología. Traza roja = plano axial tomado en campo, Traza verde = plano axial calculado con el software. Traza negra flancos del pliegue, Punto = la línea de charnela medida en campo). (Proyección de Schmidt, hemisferio inferior). Derecha. Fotografía de campo del pliegue en cuestión.

	<p>3)</p> 
	<p>4)</p> 
	<p>5)</p> 
<p>Tabla 4. Continuación...</p>	

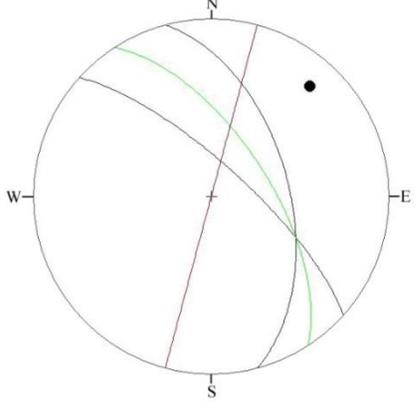
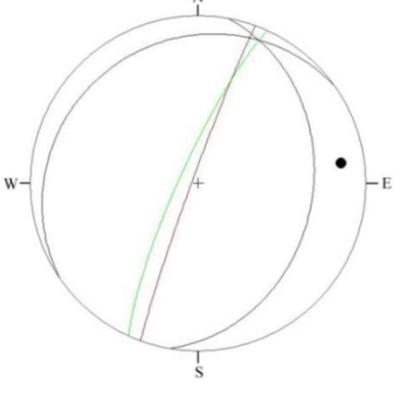
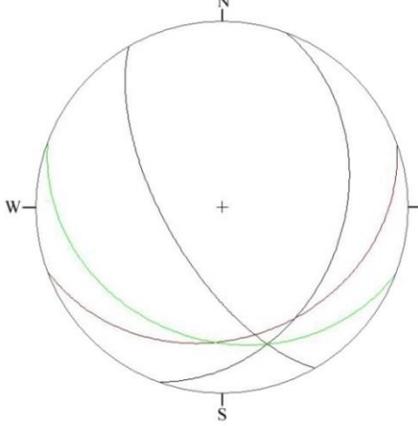
 <p>A circular Wright diagram with cardinal directions N, S, E, and W. It shows several great circles representing fault slip vectors. A green shaded region highlights a specific area. A black dot is located in the upper right quadrant.</p>	<p>6)</p>  <p>A field photograph showing a fault exposure. A red pencil is placed on the rock surface for scale. The fault shows clear displacement of rock layers.</p>
 <p>A circular Wright diagram with cardinal directions N, S, E, and W. It shows several great circles representing fault slip vectors. A green shaded region highlights a specific area. A black dot is located in the middle right quadrant.</p>	<p>7)</p>  <p>A field photograph showing a fault exposure. A red pencil is placed on the rock surface for scale. The fault shows clear displacement of rock layers.</p>
 <p>A circular Wright diagram with cardinal directions N, S, E, and W. It shows several great circles representing fault slip vectors. A green shaded region highlights a specific area. A black dot is located in the center.</p>	<p>8)</p>  <p>A field photograph showing a fault exposure. A black circular object is placed on the rock surface for scale. The fault shows clear displacement of rock layers.</p>

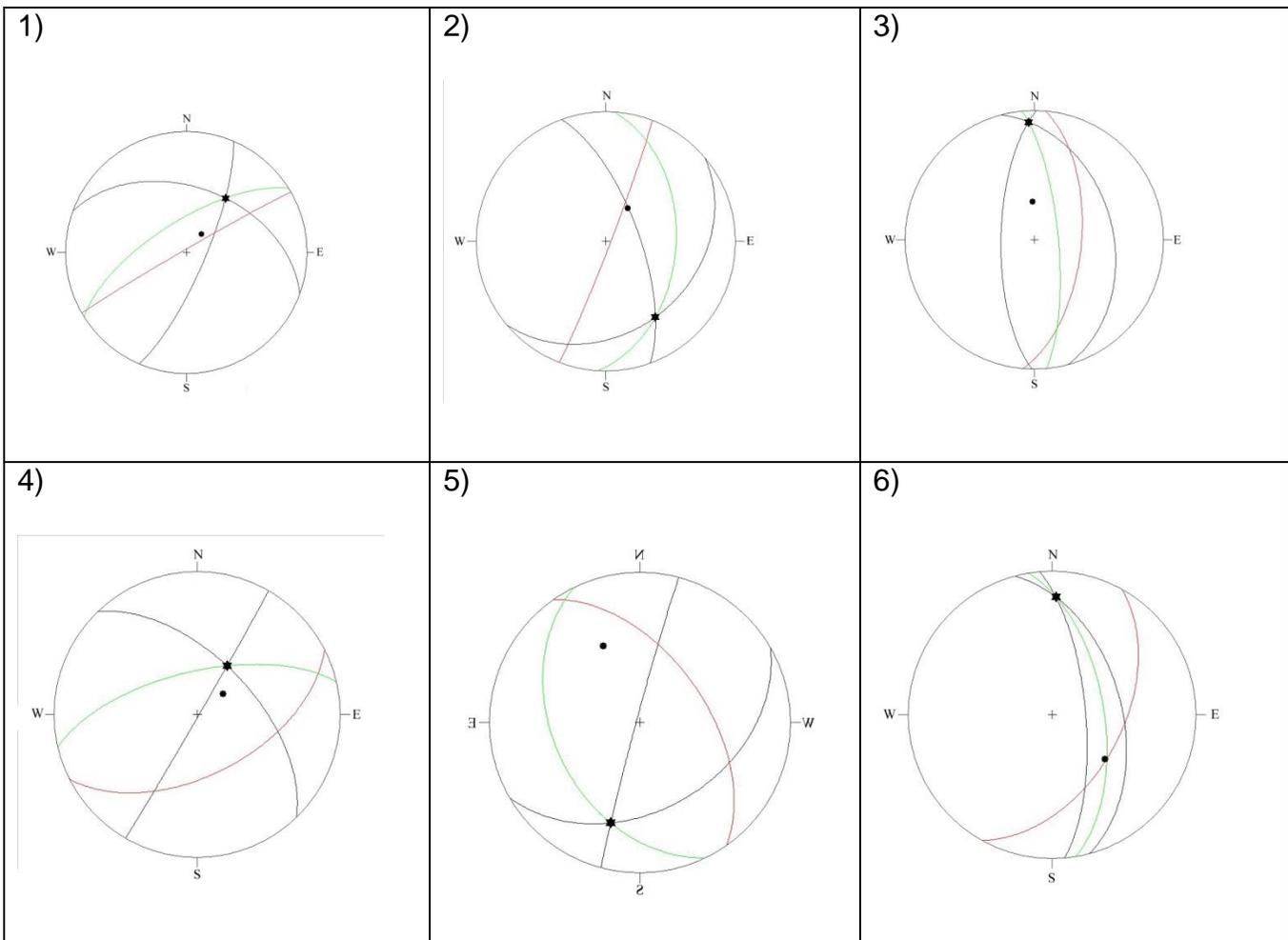
Tabla 4. Continuación...

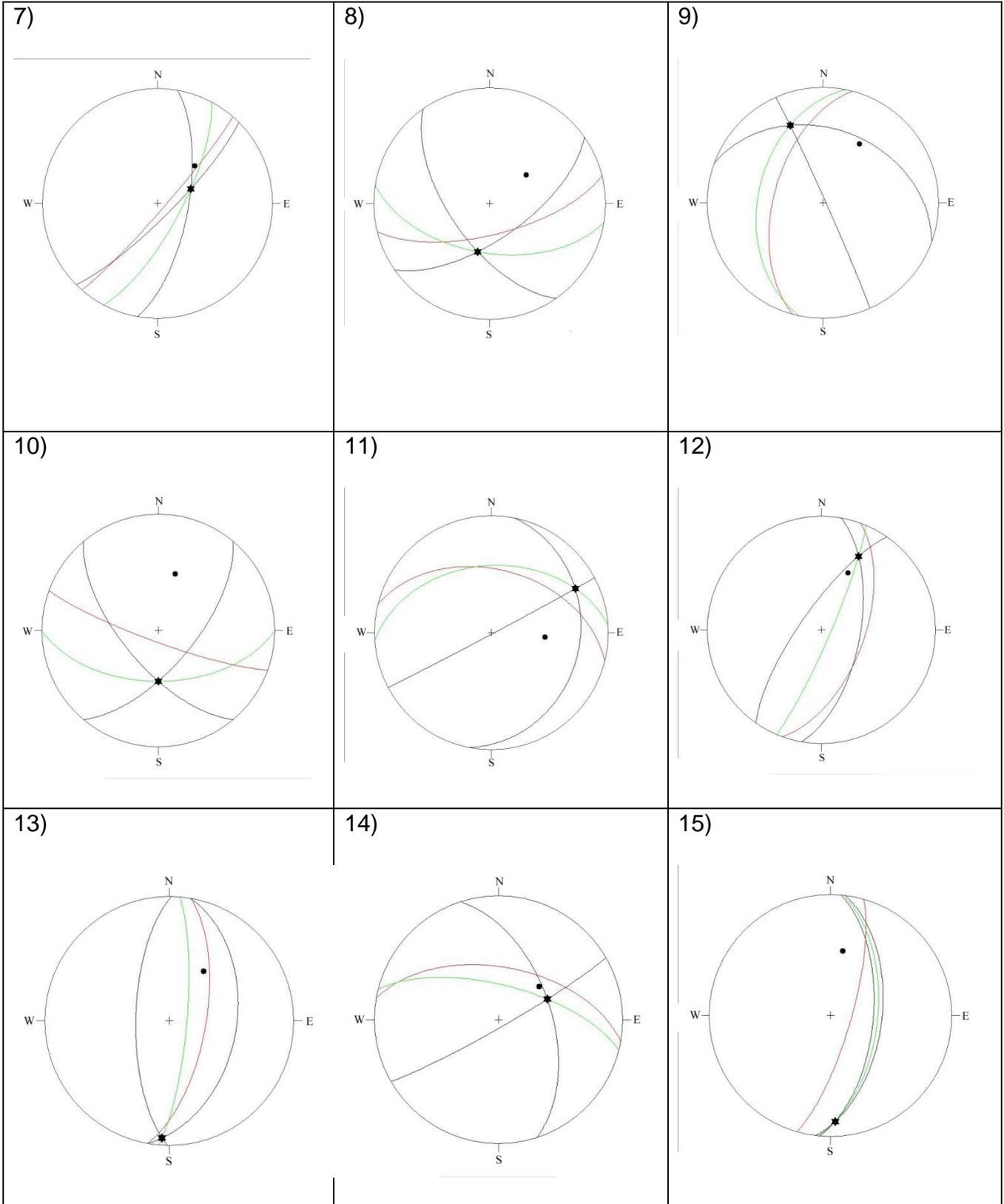
Localidad 2

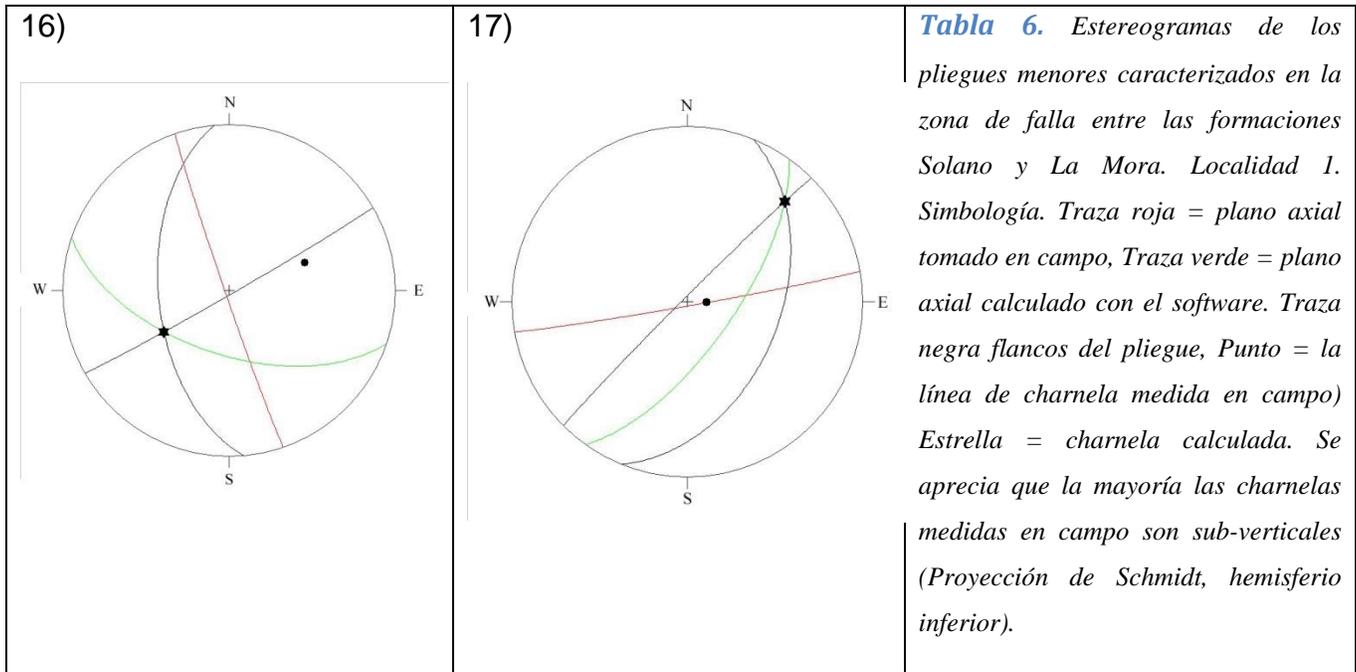
No.	Flancos	Plano Axial	Charnela	Ángulo entre Flancos	Clasificación del Pliegue
1	023°,77° SE 290°,45° NE	240°,80° NW	74° al 040	89.2°	Abierto
2	340°,69°NE 050°,31° SE	021°,87° SE	65° al 034	70°	Cerrado
3	345°,39° NE 181°,69° NE	005°,60° SE	66° al 358	16°	Apretado
4	030°,89° SE 316°,58° NE	243°,55° NW	71° al 052	106°	Abierto
5	345°,88° NE 120°,41° SW	215°,54° NW	43° al 026	135°	Suave
6	345°,50° NE 175°,71° NE	029°,50° SE	50° al 130	10°	Apretado
7	198°, 60° SE 045°, 80° SE	041°,85° SE	52° al 045	35°	Cerrado
8	145°,62° SW 055°, 65° SE	076°, 68° SE	57° al 052	90°	Abierto
9	336°, 88° NE 290°, 36°	195°, 55° NW	40° al 032	135°	Suave
10	220°, 65° SE 140°, 65° SW	110°, 82° SW	48° al 017	100°	Abierto
11	062°, 89° SE 011°, 25° SE	284°, 45° NE	52° al 095	128°	Suave
12	010°, 62° SE 215°, 75° NW	020°, 59° SE	44° al 025	26°	Apretado
13	181°, 68° NW 010°, 45° SE	010°, 66° SE	50° al 035	10°	Apretado
14	060°, 85° SE 162°, 55° NE	280°, 55° NE	55° al 051	103°	Abierto

15	185°, 61° W 007°, 55° SE	016°, 76° SE	45° al 011	3°	Apretado
16	060°, 88° SE 175°, 55° SW	095°, 88° SE	50° al 070	115°	Abierto
17	022°, 46° SE 225°, 88° NW	080°, 88° SE	81° al 072	24°	Apretado

Tabla 5. Características y clasificación de los pliegues menores identificados en la zona de falla entre las formaciones Solano y La Mora (Localidad 2) (14 Q 626,632 mE, 1964,095 mN).







Fallas y crucero

Localidad 3

Tabla 5 Datos estructurales que involucran superficies de falla y planos de estratificación, se involucran algunos rasgos observados como lo es el caso de estrías, indicadores cinemáticos.

Estratificación	Datos estructurales
S0=	332°/64°
S0=	336°/60°
S0=	330°/57°

No.	Estratificación (S ₀)	Fallas (S ₂)	Pitch de las Estrías	Indicador cinemático	Observaciones
1	314°/59°	311°/70°	117°	ST-03	
2		317°/77°			
3		140°/80°			
4	316°/58°	139°/86°			

5		330°/76°			
6		140°/90°			Superficie del Sigmoide 1)317°/88° 2)106°/57° 3)137°/85°
7		329°/63°	103° (inversa)	ST-03	Par conjunto
8		329°/67°	106° (inversa)	IS-01	Conjunto de estructuras poco inclinadas
F1		078°/87°			Falla normal, 2 etapas de deformación. 1 inversa y 1 normal.
9		324°/63°			
10		323°/56°			
11		305°/50°			
12		331°/54°			

APÉNDICE PETROGRÁFICO

En las áreas de estudio se tomaron muestras de mano de aproximadamente 25cmx15cmx15cm. Todas ellas se referenciaron. Las áreas muestreadas comprenden a dos afloramientos la lámina CC-01, carretera de Huajuapán de León-Mariscala las demás láminas (CC-03, CC-04.1, CC-04.1 pliegue, CC-04.3) corresponden a la terracería que se encuentra camino a la Presa de Yosocuta, Oeste de San Pedro Yodoyuxi, Oaxaca. En esta zona se muestreo más debido a que encontramos los rasgos e indicadores del contacto por falla que tiene la Formación Solano con la Formación Ayuquila, el contacto es visible; además de encontrar rocas que nos muestran indicadores cinemáticos que pueden ser relacionados de escala microscópica a gran escala.

Muestra CC-01

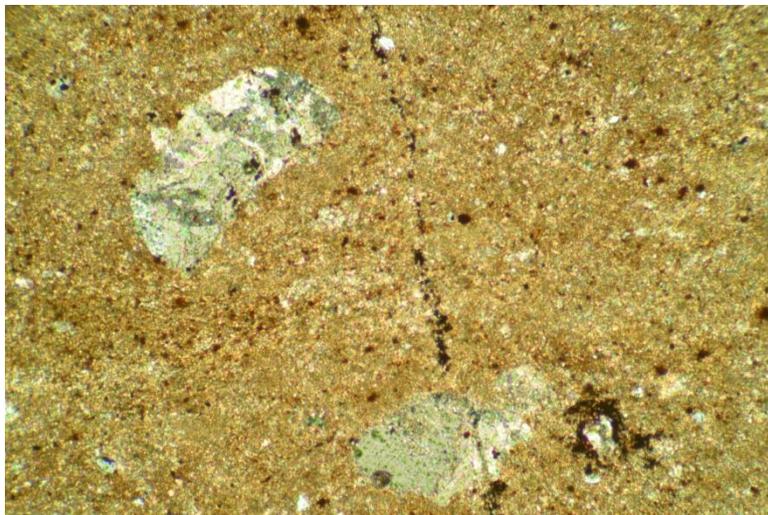


Figura 27 Lamina delgada muestra CC-01 del Afloramiento de Rancho de Jesús, carretera Huajuapán de León-Mariscala (nicoles cruzados) (Objetivo de 4x).

La roca en esta zona presenta una matriz más gruesa con un contenido de micrita, espatita; además de encontrar cristales de calcita subhedral, hay presencia de intraclastos. Presenta una porosidad primaria interpartícula y una secundaria de tipo intrapartícula, se llegan a encontrar vetillas rellenas de calcita. Como secundarios se encuentran óxidos de fierro, posiblemente provenientes de los nódulos que contiene la Formación Solano en esta localidad. De acuerdo a la clasificación de Dunham (1962) coincide con una caliza tipo wackestone.

Muestra CC-03



Figura 28 Lámina delgada de la muestra CC-03 tomada con nicoles cruzados. Muestra en el contacto de la Fm Solano y la Fm Ayuquila, Oeste de San Pedro Yodoyuxi, Oax. (Objetivo de 4x)

La muestra en esta zona presenta una matriz micrítica, lineación mineral que contiene cristales de calcita elongados. Se pueden observar vetas de calcita que primeramente rellenaron fracturas y posteriormente fueron falladas. La muestra contiene porosidad secundaria consecuencia de las fracturas presentadas. De acuerdo a Dunham(1962) puede clasificarse esta roca como un mudstone.

En el aspecto estructural se cuenta con un par de familias de fracturas. Las primeras se encuentran rellenas de calcita, que posteriormente al sufrir un fallamiento la roca se ven dislocadas y desplazadas, perpendicular a su dirección se generan fracturas que a su vez se rellenan y forman cristales elongados, infiriendo en que rellenaron las oquedades con una geometría lenticular consecuencia de ese desplazamiento. La segunda familia de fracturas que se encuentran sin rellenas, que están dando pie a la generación de la porosidad secundaria por fractura.

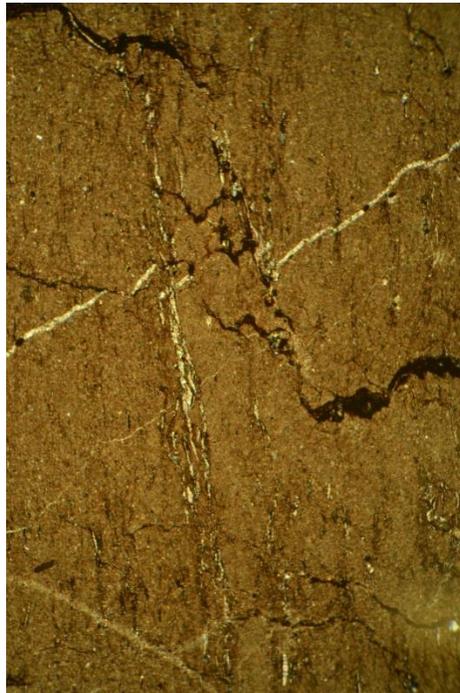


Figura 29 Lamina delgada nicoles cruzados muestra CC-03, cristales elongados de Calcita y desplazamiento de vetas rellenas de calcita. (Objetivo de 4x)

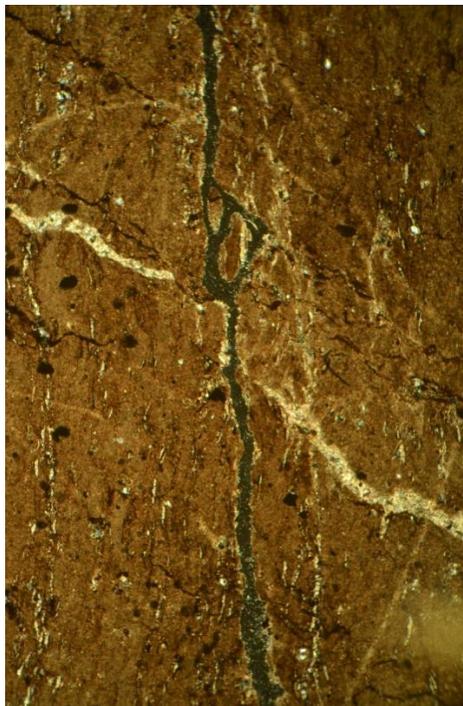


Figura 30 Lamina delgada nicoles cruzados muestra CC-03, otra área donde se puede ver la laminación, los rellenos de calcita paralelos a la laminación y la vetilla de calcita desplazada y trunca por una fractura sin relleno. (Objetivo de 4x)

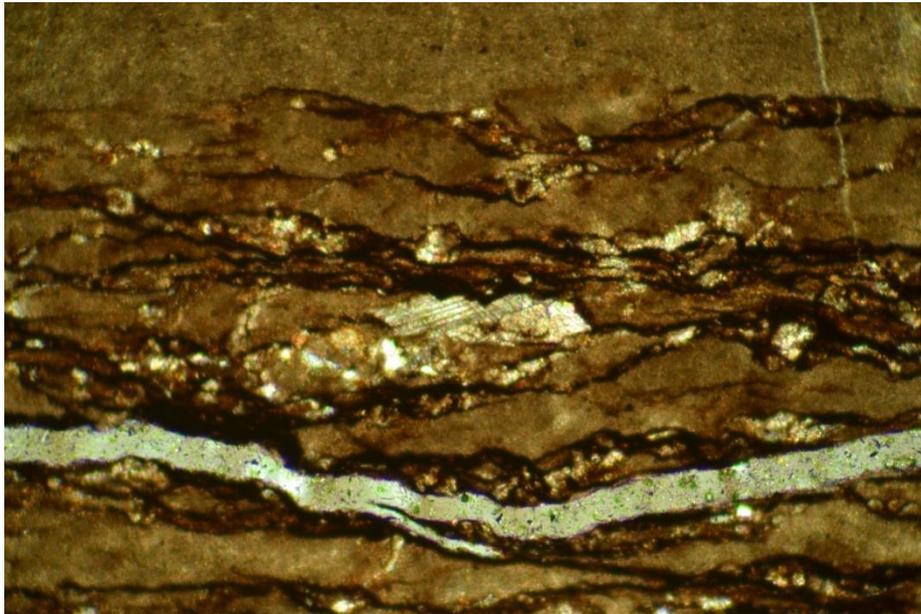
Muestra CC-04.1

Figura 31 Lamina delgada nicoles cruzados muestra CC-04.2 corresponde al área de la terracería hacia la presa de Yosocuta (Oeste de San Pedro Yodoyuxi). (Objetivo de 4x)

La muestra CC-04.2 se tomó del mismo afloramiento que la CC-03, es la zona en la que la Formación Solano se encuentra en contacto con la Formación Ayuquila, esta muestra corresponde a la parte Norte del afloramiento (distal al contacto). En esta muestra se puede apreciar una matriz fina de micrita con laminación, además de encontrar bioclastos (equinodermos) estructuras que tienen una geometría esférica reemplazada por espatita. Se pueden apreciar vetillas de calcita y algunos cristales euhedrales de calcita. La muestra presenta una porosidad secundaria por fracturamiento. Con lo que respecta a la parte estructural se pueden apreciar desplazamientos laterales derechos en la lamina usando como indicador el cristal de calcita (Figura 31), además de observar la laminación de forma elongada con geometrías SC en la figura 32. La muestra corresponde a una caliza tipo mudstone de acuerdo a la clasificación de Dunham (1962).

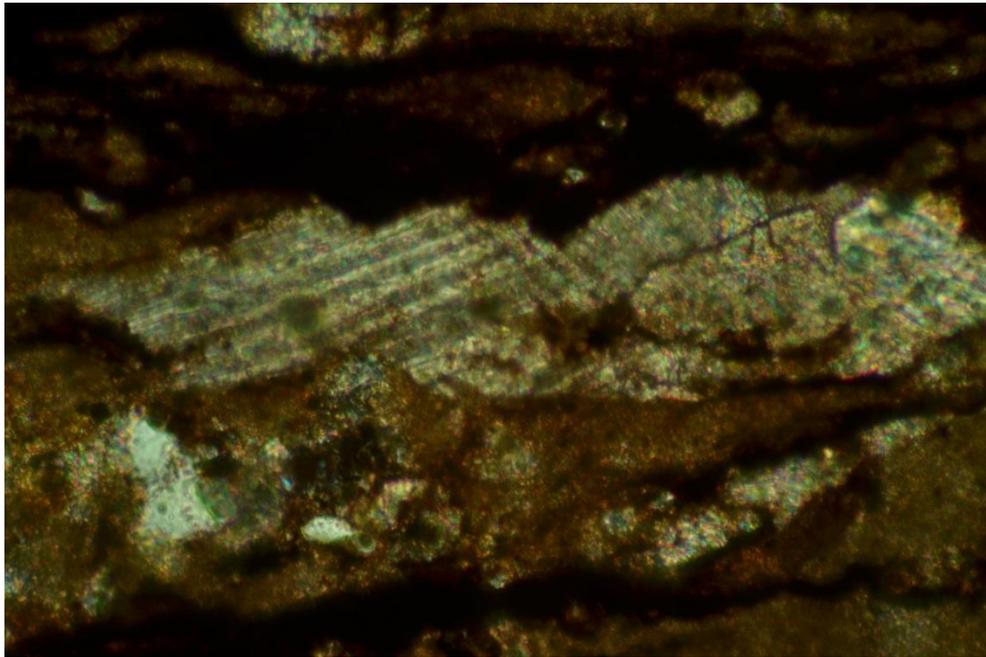


Figura 32 Calcita euهدral, fallada sobre su crucero, lamina CC-04. (Objetivo de 10x, nicoles cruzados)

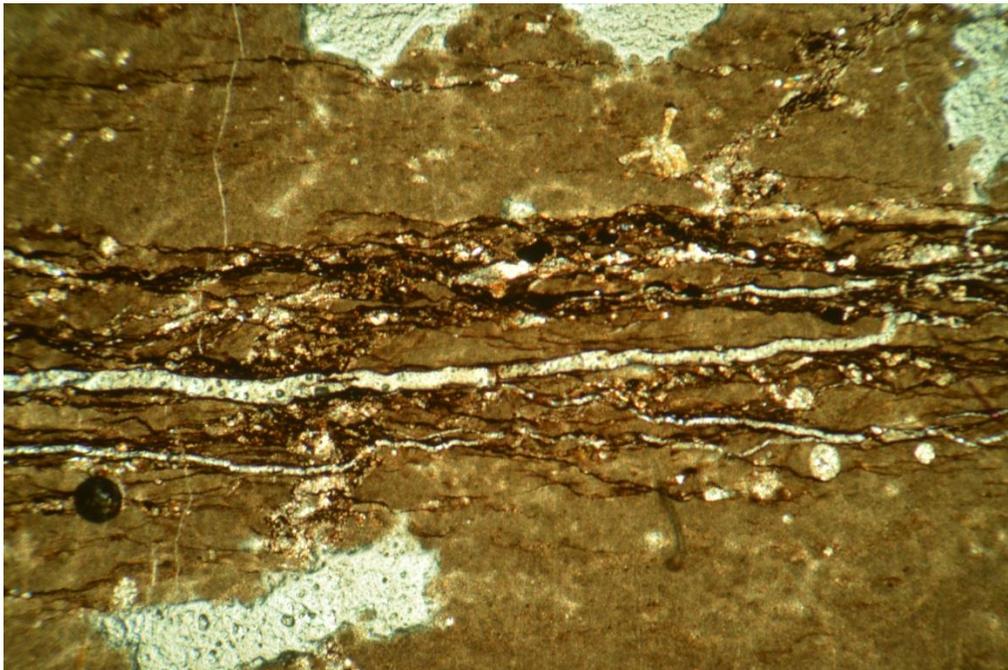
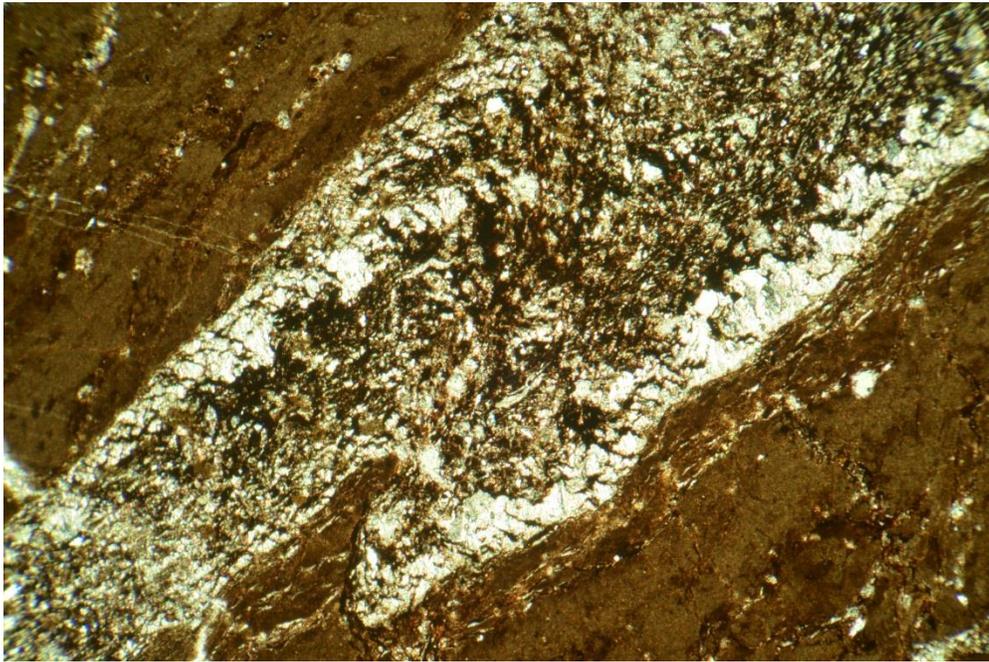


Figura 33 Lamina CC-04.1 vetillas rellenas de Calcita. (Objetivo de 4x y nicoles cruzados)

Muestra CC-04.1 Pliegue



*Figura 34 Lámina delgada con nicoles cruzados, se observa una cizalla con un desplazamiento lateral derecho.
(objetivo de 10x)*

Esta muestra contiene una matriz muy fina micritica, con algunos cristales de calcita e intraclastos, se puede observar que tienen una porosidad secundaria de tipo intrapartícula sin embargo no es predominante. Contiene vetas de calcita, un rasgo que es muy visible es un pliegue que se está generando con un sentido lateral derecho, dicha deformación se ve plasmada en los cristales de calcita. La forma del pliegue es de tipo Z.

Muestra CC-04.3

Muestra que tiene una matriz muy fina micrítica, además de contener cristales de calcita anhedrales, bioclastos, fracturas rellenas de calcita. La roca tienen una porosidad primaria muy baja en un orden del 2%, la porosidad secundaria se encuentra en un orden mayor debido a que se origina por fracturas, con respecto a los bioclastos se encuentran reemplazados por calcita, pertenecen a equinodermos. Muy cercano a las fracturas se aprecian estructuras tipo SC, la muestra presenta dos familias de fracturas la primera es aquella que se encuentra rellena y la segunda son las fracturas sin relleno. Los rellenos de calcita van asociados a un indicador tipo ST-08.

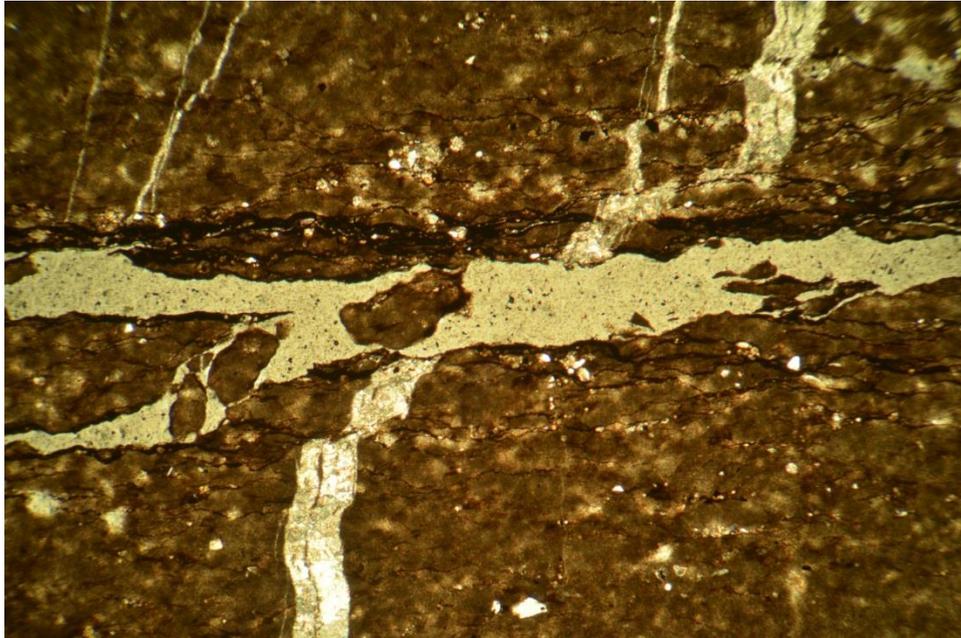


Figura 35 Lámina delgada muestra CC-4.3 se observan las dos familias de fracturas, una rellena de calcita y la otra se encuentra sin relleno. Además se observan fragmentos de la misma roca en la fractura con forma de SC.

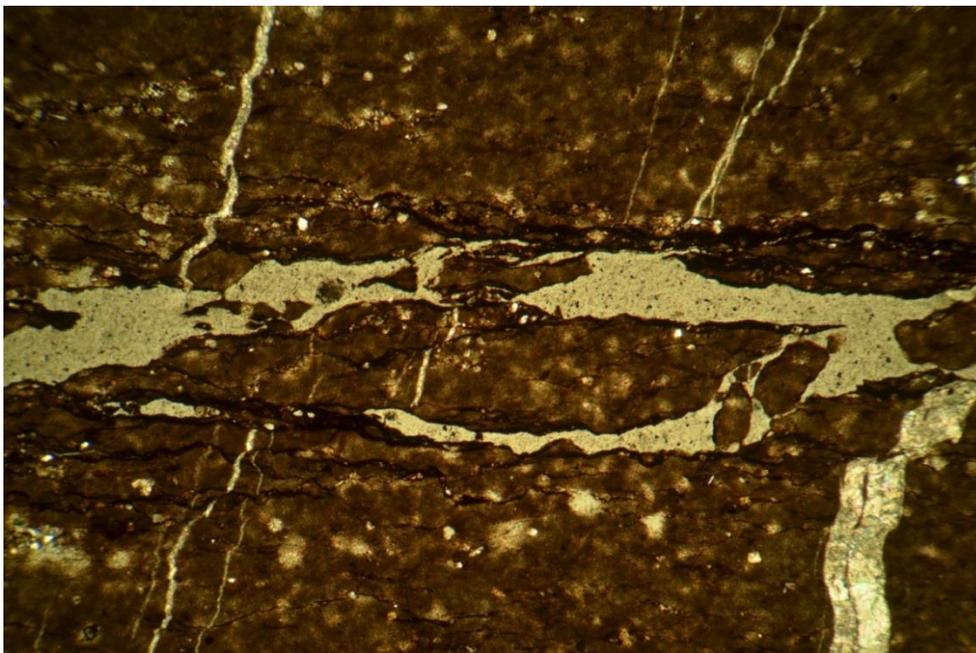


Figura 36 Lámina delgada muestra CC-04.3 se aprecian estructuras tipo SC, dentro del plano de la fractura sin relleno. (Objetivo 10X y nicoles cruzados)

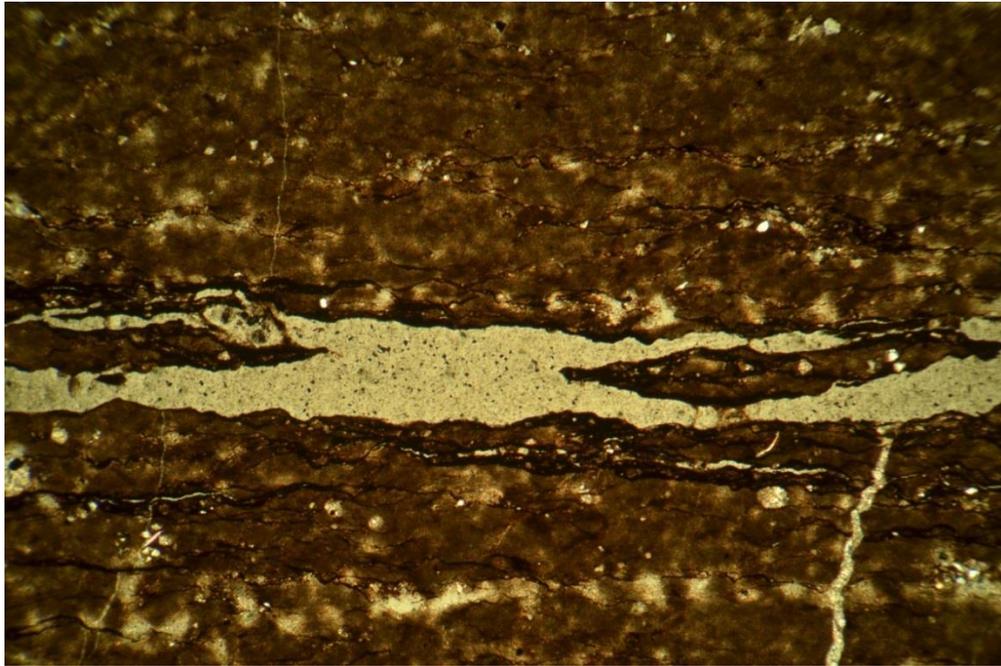


Figura 37 Lamina delgada muestra CC-04.3 Nícoles cruzados, fragmentos elongados entre el plano de la fractura sin relleno, generando formas tipo SC. (Objetivo 10x).

Para clasificar las rocas de la Formación Solano se usaron las tablas de clasificación de Dunham (1962).