

# **Análisis y diagnóstico de las fallas en el sector La Mucubanga entre Jají – San Juan De Lagunillas, estado Mérida: Un enfoque basado en la inversión de esfuerzos**

## **Structural characterization through kinematic elements of the "Las Cruces - El Joque" sector, Campo Elías municipality, Mérida state**

**Bongiorno-Ponzo, Francisco Ignacio<sup>1\*</sup>; Alviz-Guerrero, Eyllin Gladimar<sup>2</sup>; Rodríguez-Rojas, María Fernanda<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Geomecánica, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. C.P. 5101.

<sup>2</sup>Graduados, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. C.P. 5101.

\*bongiornofco@gmail.com, frabon@ula.ve

### **Resumen**

*La presente investigación tiene como objetivo principal determinar las fallas neoformadas y reactivadas en el sector La Mucubanga entre las poblaciones de Jají – San Juan de Lagunillas, estado Mérida, aplicando el Método de Inversión de Esfuerzo y el Modelo de Deslizamiento para determinar si el sector en estudio está sometido a un único o varios sistemas de esfuerzos principales. La metodología utilizada consiste en la toma de datos como rumbo y buzamientos de la superficie de fallas, y a las estrías de fallas contenidas en ellas se midió el ángulo pitch para diagnosticar su cinemática, las mismas se encuentran en afloramientos rocosos de las Formaciones Capacho, La Luna, Colón y La Quinta. Se utiliza el software Stereo 32 para determinar la orientación e inclinación de los esfuerzos principales ingresando los datos de las superficies de falla, basado en el Método de los Diedros Rectos y el Modelo de Anderson, esto con el fin de conocer el tensor de esfuerzo actuante en el área de estudio. Como resultado se obtuvo una dirección de vergencia de la zona S 59 E, la cual corresponde con la vergencia andina SE-NW. Con la información obtenida de las estrías de falla, se determina el estado actual de las fallas encontradas, a través del diagrama C/B del Modelo de Deslizamiento, el cual da como resultado un 53,33% de fallas Neoformadas y 46,66% de fallas Reactivadas. Con toda la información analizada y verificada, se generó un modelo geológico estructural representado en un mapa a una escala a 1:30.000, en donde se muestra el régimen tectónico que rige a la zona de estudio actualmente.*

**Palabras clave:** Esfuerzos principales, neoformadas, reactivadas, vergencia, fallas, orientación, inclinación.

### **Abstract**

*The main objective of this research is to determine the newly formed and reactivated faults in the La Mucubanga sector between the towns of Jají - San Juan de Lagunillas, Mérida state, applying the Stress Inversion Method and the Slip Model to determine if the sector under study is subjected to a single or several principal stress systems. The methodology used consists of taking data such as the strike and dip of the fault surface, and the pitch angle of the fault striations contained in them is measured to diagnose their kinematics, these are found in rock outcrops of the Capacho, La Luna, Colón and La Quinta Formations. The Stereo 32 software is used to determine the orientation and inclination of the principal stresses by entering the data of the fault surfaces, based on the Right Dihedral Method and the Anderson Model, in order to know the stress tensor acting in the study area. As a result, a vergence direction of the S 59 E zone was obtained, which corresponds to the SE-NW Andean vergence. With the information obtained from the fault striations, the current state of the faults found is determined, through the C/B diagram of the Landslide Model, which results in 53.33% of Neoformed faults*

and 46.66% of Reactivated faults. With all the information analyzed and verified, a structural geological model was generated represented on a map at a scale of 1:30,000, where the tectonic regime that currently governs the study area is shown.

**Keywords:** Principal stresses, neoformed, reactivated, vergence, faults, orientation, inclination.

## 1 Introducción

En la cordillera de Los Andes, se logra apreciar diferentes trazas correspondientes a la Falla de Boconó, manifestándose en un conjunto de fallas menores o locales. Esta falla genera una zona de fractura que se sitúa casi en posición axial a la cordillera andina, aprovechada por grandes ríos para entallar sus valles, lo que hace que sea claramente demarcada.

La cordillera de Mérida es un bloque estructuralmente polideformado y policomponente que se caracteriza por un gran levantamiento vertical en el Terciario y un alto nivel de sismicidad (Case, J. E., Shagam, R., Giegengack, R. F., 1.990), ésta se caracteriza por muchas fallas con tendencia noreste. La Cordillera se separa de la Cordillera Oriental por la depresión del Táchira, la cual probablemente es una zona de corrimiento que las desacopla.

La estructura de la Cordillera de Mérida más estudiada es la falla sísmicamente activa de Boconó, que probablemente tiene desplazamiento lateral derecho, así como componentes verticales locales de desplazamiento y pequeñas cuencas de separación asociadas.

Los grabens mesozoicos se invirtieron estructuralmente durante el Neógeno, llevando a la posición actual de la Sierra de Perijá, la Cordillera de Mérida y la Cordillera Oriental. Las diferencias deformacionales, tasas de levantamiento y hundimiento de la cuenca son el resultado de la compleja interacción de las placas y bloques de Sudamérica, Nazca, Caribe, Panamá y Bonaire.

El área de estudio se localiza sobre la carretera que comunica las poblaciones de San Juan de Lagunillas y Jají, comprendido en los municipios Sucre y Campo Elías del estado Mérida.

Los objetivos están centrados principalmente en obtener los esfuerzos principales actuantes y la estimación de fallas neoformadas y reactivadas, a través del Método de los Diedros y software Stereo 32, estos datos se hallan en el proceso exploratorio de superficie, apoyado en los análisis morfológicos, estratigráficos y estructurales con el propósito de actualizar el mapa geológico estructural y diagnosticar cuál es la influencia de estas estructuras en la morfología y topografía de la zona.

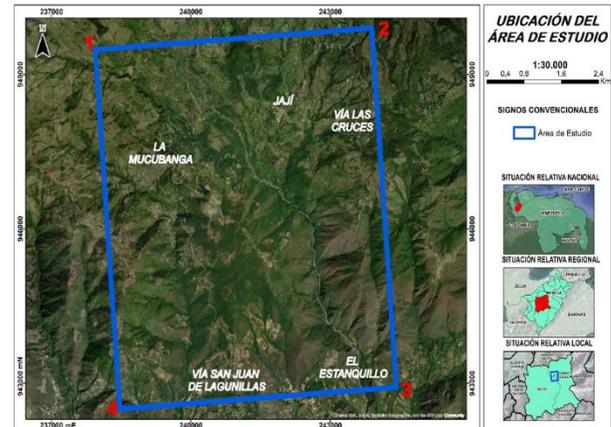


Fig. 1 Ubicación del área de estudio Jají-San Juan de Lagunillas.

## 2 Marco Referencial

Para esta investigación fueron aplicados los siguientes métodos para el análisis y procesamientos de las estrías de fallas:

El Modelo de Anderson se aplicó a las proyecciones estereográficas obtenidas a través del software Stereo 32 para asignar la ubicación de los esfuerzos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , cumpliendo así con las siguientes condiciones: los tres ejes principales de los esfuerzos son perpendiculares entre sí, la línea de intersección de los círculos mayores que representan a las fallas conjugadas es  $\sigma_2$ , el plano perpendicular a  $\sigma_2$  es denominado plano de movimiento, y contiene  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ ,  $\sigma_1$  es la bisectriz del ángulo agudo formado por las dos fallas conjugadas, y  $\sigma_3$  del ángulo obtuso.

El Método de Inversión de Esfuerzos se utilizó para determinar los esfuerzos principales mediante el software Stereo32, en donde está implícito el método de los diedros rectos.

El Modelo de Deslizamiento determinó si las fallas son neoformadas o reactivadas a través de los datos de campo como buzamiento de las superficies de fallas, el cabeceo y cinemática de las estrías de falla.

### 2.1 Modelo de Anderson

El Modelo de Anderson consiste en la relación entre el estado de esfuerzos, la simetría y la orientación de las fracturas de las rocas basándose

en el criterio de fracturación de Navier – Coulomb (Bongiorno, F., Úcar, R., & Belandria, N. 2.011).

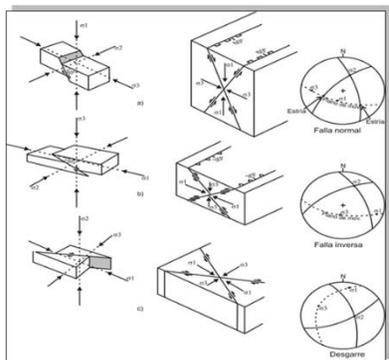


Fig. 2. Modelo de Anderson para fallas conjugadas con movimiento. Bloque diagrama y estereograma resultante para cada tipo de falla. Fuente: Babín, R., & Gómez, D. (2.010).

Primero se obtienen las proyecciones estereográficas generadas por el programa Stereo32 a través de los datos tomados en campo. Segundo, a cada resultado se le aplica las condiciones establecidas por el modelo y así asignar la ubicación de los esfuerzos principales.

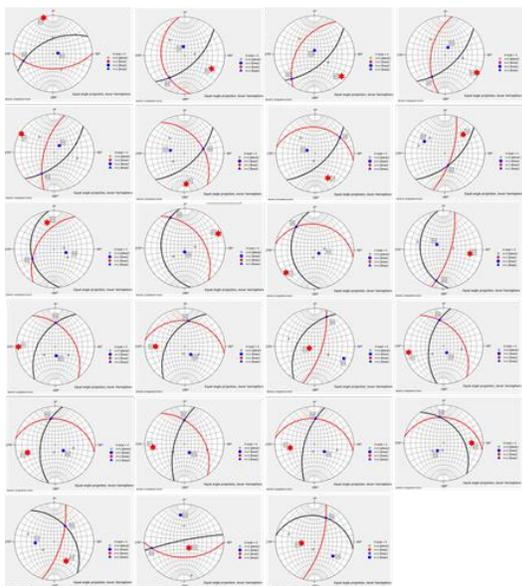


Fig. 3. Resultados de las proyecciones estereográficas del Stereo32.

Una vez comparado el Modelo de Anderson (Figura 2) con los resultados del programa, se obtuvo las 23 simulaciones en donde se ubican correctamente los esfuerzos principales (Figura 3).

### 2.2 Método de Inversión de Esfuerzos

Este método permite obtener las orientaciones y las magnitudes relativas del tensor de esfuerzos asociado al movimiento de una población de fallas, pero también la fricción media bajo la cual se produjo el deslizamiento (Figura 11). Se basa en la Ecuación de Bott y en el criterio de rotura de Navier-Coulomb.

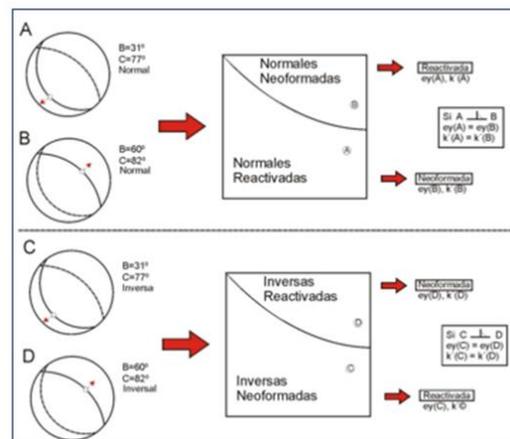


Fig. 4. Aplicación del Modelo de Deslizamiento. Fuente: Angelier, J. (1.994).

Este método fue aplicado por medio del programa Stereo 32, en donde se encuentra implícito el Método de los Diedros Rectos, el cual se fundamenta en el concepto de plano nodal y de mecanismo focal (Figura 5), es uno de los métodos gráficos más utilizados que fue concebido por Pegoraro, P. (1.972) y difundido y aplicado mediante ordenador por Angelier, J., & Mechler, P. (1.977).

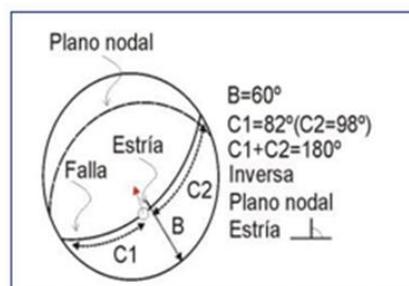
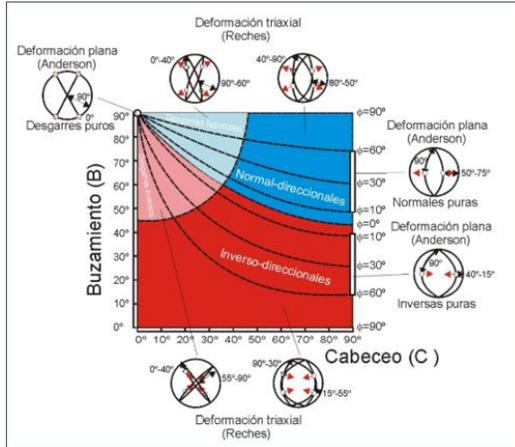


Fig. 5. Método de los Diedros Rectos. Fuente: Angelier, J., & Mechler, P. (1.977).

### 2.3 Modelo de deslizamiento

Este modelo explica la geometría obtenida al deformar una roca bajo condiciones triaxiales, a partir del criterio de fractura de Navier-Coulomb. De Vicente (1.988), establece una serie de ecuaciones que relacionan el elipsoide de

deformación ( $k'$ ) y el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ), con los valores angulares de las fallas medidas en campo: sentido de buzamiento, buzamiento (B) y cabeceo (C) (Figura 6), asumiendo que uno de los ejes principales del tensor deformación se encuentra en la vertical, algo que suele ser muy común (Angelier, 1.994).



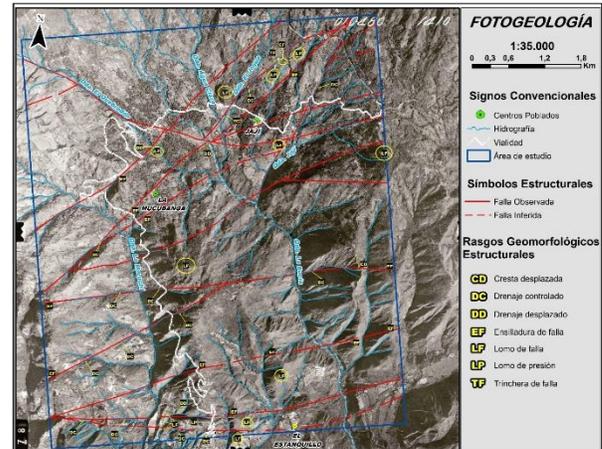
**Fig. 6.** Modelo de Deslizamiento. Dibujo de las ecuaciones que relacionan  $K'$  y  $\phi$ , con los valores angulares de las fallas medidas en campo: sentido de buzamiento (D), buzamiento (B) y cabeceo de la estría (C), asumiendo que uno de los ejes principales del tensor deformación se encuentra en la vertical. Fuente: Angelier, J. (1.994).

### 3. Análisis de los resultados

#### 3.1 Análisis fotogeológico

El estudio se centra en los sectores de Jají – San de Lagunillas en el estado Mérida, donde se analizan las características estructurales, geológicas, geomorfológicas y antrópicas más relevantes para la investigación. En la zona norte del área de estudio, el relieve presenta un perfil acolinado y suavizado, con vegetación de tipo bosque húmedo. La textura del suelo es rugosa, lo que indica la presencia de lutitas, y se observan cambios de tonalidades que reflejan diferentes litologías. Este patrón se complementa con un drenaje dendrítico, destacándose cuatro quebradas importantes: El Joque, Agua Clara, La Sucia, y El Quebradon, siendo la quebrada La Sucia el drenaje principal. Se identifica un claro cambio litológico en la zona, donde el bloque al sur del frente del corrimiento de Mesa Bolívar (Formación La Quinta) se eleva sobre el bloque norte de las rocas de la secuencia cretácica (Formaciones Capacho, La Luna y Colón). Este cambio se evidencia en la textura y rugosidad, ya que la Formación La Quinta es más

resistente a la meteorización y erosión. Además, se observa un cambio de tonalidades que va del gris oscuro en la zona norte a gris claro hacia el sur. Entre los rasgos geológicos estructurales, se destacan los lomos de fallas, las crestas de falla y las ensilladuras, evidenciando las fallas que afectan la zona y que han desplazado ciertos drenajes de su cauce principal, con un total de nueve fallas identificadas. En la zona sur, el relieve presenta pendientes abruptas y una vegetación escasa debido al clima árido. La textura del suelo es lisa, dominada por areniscas, y el drenaje es de tipo paralelo, influenciado por la erosión y controles estructurales. Este tipo de drenaje se deriva del sistema dendrítico, y se reconocen abundantes rasgos geomorfológicos estructurales, incluyendo ocho fallas, como ensilladuras y lomos de falla, que afectan el comportamiento del agua en la región. Finalmente, en el análisis de los factores antrópicos, se mencionan los poblados de Jají y La Mucubanga en la zona norte, así como El Estanquillo y San Juan de Lagunillas en la zona sur, resaltando la influencia humana en el paisaje y la geología del área (Figura 7).



**Fig. 7.** Análisis Fotogeológico, sector Jají-San Juan de Lagunillas

#### 3.2 Análisis estructural

El análisis de la zona norte del mapa geológico estructural (Figura 8) identifica diecisiete fallas, de las cuales seis son inferidas y once observadas. Tres nuevas fallas son localizadas, destacando la F1, que presenta características geomorfológicas como trincheras de falla y lomos de presión. La F2 se caracteriza por una ensilladura de falla, mientras que la F3 controla un drenaje específico.

Una importante ciénaga de falla corrobora la F1, que afecta la Quebrada El Joque. Las evidencias geomorfológicas sugieren un régimen transtensivo en el área. En campo, se verifican diversas evidencias geológicas, y se observa formación de un valle tectónico. La saturación del suelo y los eventos tectónicos provocan deslizamientos que afectan las vías de acceso. En el centro del mapa, una falla está evidenciada por el alineamiento de drenajes y ensilladuras de fallas, mientras que la F3 se relaciona con drenajes alineados en la Quebrada La Murachí, donde también se observa vegetación semiárida. En la parte sur del mapa, el punto quince está controlado por una alineación de ensilladuras de fallas que va en dirección W – E, asociada a un lomo de falla cerca del Centro Penitenciario Región Andina. Se observan dos fallas inferidas vinculadas a la Falla de Boconó, donde se evidencian drenajes controlados y lomos de fallas que emergen de un depósito aluvial, sugiriendo un comportamiento transcurrente.

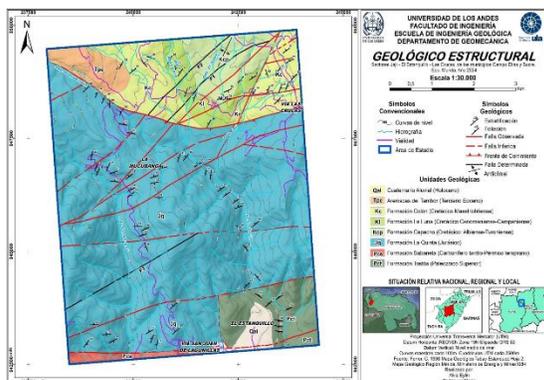


Fig. 8. Mapa geológico estructural sector Jají-San Juan de Lagunillas análisis estructural.

Además, el corrimiento de Mesa Bolívar superpone unidades jurásicas sobre cretácicas, permitiendo la observación de litologías más antiguas. Esta estructura presenta cinemática tanto vertical como de transurrencia, respaldada por el movimiento de estrías de falla. El área de estudio está bajo un sistema de fallas imbricadas, con fallas sub-paralelas y buzamientos similares en dirección SE a NW, que se reflejan en el mapa geológico estructural de la zona. En la Figura 9 se representa en el sector Jají municipio Campo Elías del estado Mérida, los perfiles geológicos A-A' el cual abarca cuatro unidades litológicas, y el corte B-B' abarca tres unidades litológicas, estas se ubican a una elevación aproximada de 1.800 a 1.600 m.s.n.m., estos perfiles están en dirección NW-SE.

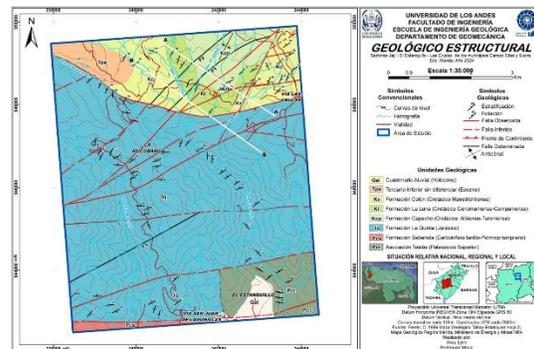


Fig. 9. Mapa geológico estructural sector Jají-San Juan de Lagunillas indicando los perfiles geológicos.

El perfil geológico estructural A-A' abarca las unidades litológicas del cretácico (Formaciones Capacho, La Luna y Colón) y del jurásico (Formación La Quinta). Al NW, se observa un contacto entre la Formación Colón y La Luna con buzamientos bajos, así como un contacto concordante y por falla entre La Luna y Capacho, afectadas por la falla F2 con cinemática inversa-sinistral. La Formación Capacho se superpone a La Luna, mostrando buzamientos opuestos. La falla F1, en dirección NW, presenta un movimiento sinistral-inverso. Además, dos fallas afectan a la Formación Capacho: la F11 con movimiento inverso y la FN1 con movimiento normal, lo que provoca un cambio en el buzamiento de las capas. La falla FN2, con cinemática normal, se localiza en la Quebrada de Jají y corta las unidades litológicas Capacho, La Luna y Colón. Finalmente, el corrimiento de Mesa Bolívar muestra una cinemática inversa de bajo ángulo, causando el cabalgamiento de la Formación La Quinta sobre las unidades del cretácico (Figura 10).

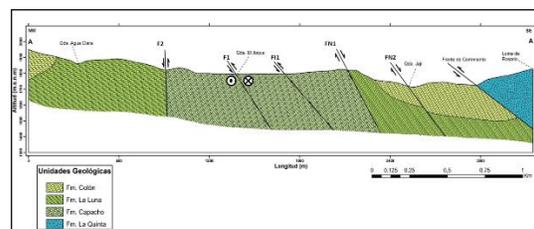


Fig. 10. Perfil geológico estructural dirección A-A'.

El perfil geológico estructural B-B' incluye tres unidades litológicas: dos del cretácico (Formaciones La Luna y Colón) y una del jurásico (Formación La Quinta). Al NW, se encuentra la Formación Colón, donde se observan dos fallas: la F2 con movimiento inverso-sinistral y la F1 con cinemática sinistral-inversa. Las capas de

lasformaciones cretácicas están plegadas debido al esfuerzo compresivo del corrimiento de Mesa Bolívar, que es el primer evento tectónico relacionado con las fallas FI1 (movimiento inverso, ubicada en la Quebrada Agua Clara) y FN1 (movimiento normal, en la Formación La Luna). Al SE, el frente de corrimiento muestra un contacto discordante entre La Quinta y La Luna, donde el jurásico se superpone al cretácico, evidenciando cambios marcados de buzamiento en la Formación La Quinta debido al movimiento de las fallas normales en la cresta del cabalgamiento, truncadas por el corrimiento de Mesa Bolívar (Figura 11)

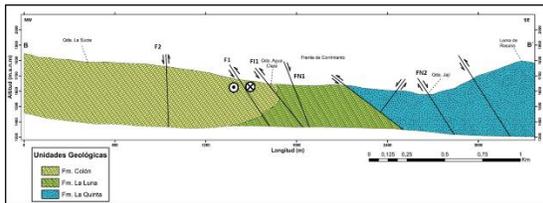


Fig. 11. Perfil geológico estructural dirección B-B'.

En los dos perfiles geológicos estructurales descritos, se observa que la zona de estudio se comporta como un sistema de fallas imbricadas las cuales van hacia el NW. Correspondiendo a un modelo estructural de fallas con dirección de SE a NW como la vergencia andina.

**3.3 Procesamiento de datos de superficies y estrías de falla**

En el campo se localizaron quince juegos de estrías de falla, de los cuales se registraron datos como el rumbo y buzamiento de las superficies de falla, el pitch y la cinemática asociada a las estrías (Tabla 1). Estas estrías se encuentran en diversas formaciones geológicas: las tres primeras pertenecen a la Formación Capacho en la Quebrada El Joque, dos a la Formación La Luna en la Quebrada Agua Clara, cuatro en el Quebradón de la Formación Colón, y las últimas seis a la Formación La Quinta (rocas rojizas y blancuecinas). La cinemática predominante en estas estrías es de transcurrencia, evidenciada por ángulos de pitch que generalmente son menores a 45°. En cuanto a los buzamientos de las superficies de falla, la mayoría se inclinan aproximadamente a 54° en dirección NW. En el siguiente ejemplo se presenta el análisis cinemático de las estrías generadas por el movimiento de las fallas estudiadas en campo (Figura 12).

Tabla 1. Datos tomados en campo de superficies y estrías de falla (E)

Punto	Estría	SUPERFICIE DE FALLA		ESTRIAS DE FALLA	
		Rumbo	Buzamiento	Pitch	Cinemática
1	E1	N 63 E	43 NW	49 NW	Falla Inversa con componente sinistral
1	E2	N 63 E	43 NW	88 SW	Falla Normal
2	E3	N 47 E	57 SE	37 NE	Falla transcurrenente sinistral con componente inversa
3	E4	N 82 E	88 SE	63 SE	Falla Normal con componente dextral
4	E5	N 35 W	68 NE	84 NE	Falla Inversa con componente sinistral
5	E6	N 69 E	79 SE	48 NW	Falla normal con componente dextral
6	E7	N 25 E	88 NW	60 SW	Falla normal con componente sinistral
7	E8	N 8 W	50 SW	32 SW	Falla transcurrenente dextral con componente inversa
7	E9	N 8 W	50 SW	15 NE	Falla transcurrenente dextral con componente normal
8	E10	N 32 E	44 NW	38 NW	Falla transcurrenente sinistral con componente normal
9	E11	N 10 E	50 NW	23 NW	Falla transcurrenente dextral con componente normal
10	E12	N 15 E	62 NW	19 NE	Falla transcurrenente dextral con componente normal
11	E13	N 36 W	39 NE	18 NE	Falla transcurrenente sinistral con componente normal
12	E14	N 78 E	83 NW	48 NW	Falla Normal con componente dextral
13	E15	E - W	56 S	45 NE	Falla normal con componente dextral
14	E16	N 80 W	22 NE	35 SE	falla transcurrenente sinistral con componente inversa
15	E17	N 17 E	69 SE	36 SE	Falla transcurrenente dextral con componente normal

Tiene un rumbo E - W y buzamiento de 47 S en la Formación La Quinta, ubicada antes del sector El Estanquillo y la población de San Juan de Lagunillas, que contiene a la estría E15 como evidencia de un tipo de tectoglifo llamado escalones (en color blanco) el cual es un indicador de movimiento, con un pitch de 45 NE y una cinemática observada normal con componente dextral representada con flechas en color rojo.

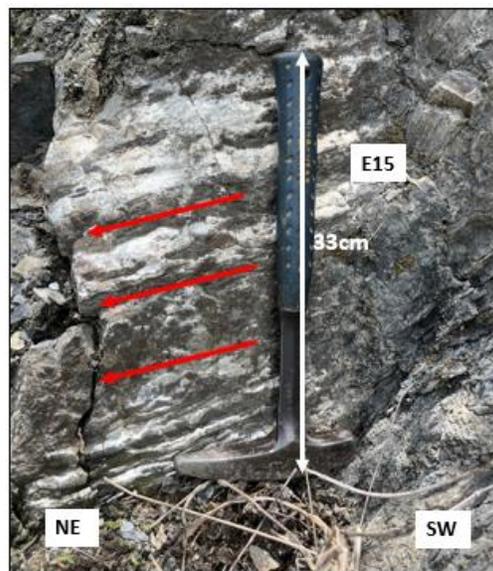


Fig.12. Superficie de falla 13, nótese la dirección de la estría E15 en la Formación La Quinta roca de coloración blanco.

### 3.4 Cálculo de los esfuerzos principales a través del programa Stereo 32

Una vez recolectados los datos de la Tabla 2, se procesan en el software Stereo 32, el cual aplica el Modelo de Anderson y el Método de los Diedros Rectos, donde se requieren de dos superficies de falla deben ser sus conjugadas para poder representarlas en las estereofalsillas de Wulff, y así determinar la inclinación y dirección de los esfuerzos principales. Se hace una evaluación descartando las que no cumplan con los siguientes criterios, primero ambas fallas deben tener en común el primer componente cinemático, segundo que el  $\sigma_1$  se ubique en el ángulo agudo,  $\sigma_2$  en la intersección de ambas fallas, y  $\sigma_3$  en el ángulo obtuso.

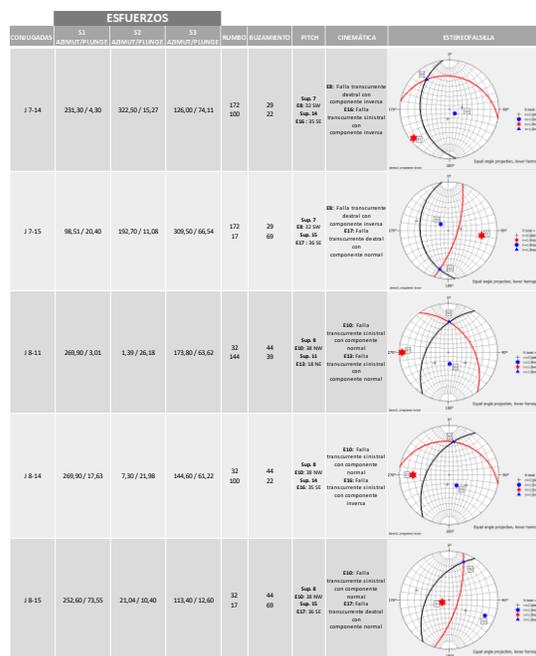
**Tabla 2.** Datos tomados en campo para el cálculo de los esfuerzos principales con el Stereo 32

Punto	Estría	Rumbo	Buzamiento	Cinemática
1	E2	N 63 E	43 NW	Falla Inversa con componente sinistral
2	E3	N 47 E	57 SE	Falla transcurrente sinistral con componente inversa
7	E8	N 8 W	50 SW	Falla transcurrente dextral con componente inversa
8	E10	N 32 E	44 NW	Falla transcurrente sinistral con componente normal
9	E11	N 10 E	50 NW	Falla transcurrente dextral con componente normal
10	E12	N 15 E	62 NW	Falla transcurrente dextral con componente normal
11	E13	N 36 W	39 NE	Falla transcurrente sinistral con componente normal
12	E14	N 78 E	83 NW	Falla Normal con componente dextral
13	E15	E - W	56 S	Falla normal con componente dextral
14	E16	N 80 W	22 NE	falla transcurrente sinistral con componente inversa
15	E17	N 17 E	69 SE	Falla transcurrente dextral con componente normal

En las figuras 13-14-15-16 y 17 se presentan todas las superficies de fallas conjugadas clasificadas, donde la proyección de color negro es la falla principal y la de color rojo es la conjugada para cada juego, dentro de los resultados se tienen la dirección (azimut) y la inclinación (plunge) para cada esfuerzo. De acuerdo con los resultados presentados mediante las 23 simulaciones realizadas por el software Stereo 32, se obtuvo los valores y ubicación de los esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  los cuales cumplen con la condición de ser ortogonales entre ellos como lo establece el Modelo de Anderson (Tabla 3).



**Fig. 13.** Resultados de las superficies de falla conjugadas del J 1-13 al J 2-10 con el Stereo 32



**Fig. 14.** Resultados de las superficies de falla conjugadas del J 2-11 al J 7-11 con el Stereo 32.

El  $\sigma_1$  se distribuye principalmente en los cuadrantes II y IV (Figura 18) de la proyección estereográfica. Para calcular su promedio, se polariza en el cuadrante IV, ajustando los valores de los otros cuadrantes sumando o restando  $180^\circ$ . Este proceso también se aplica a los esfuerzos  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , cuyos resultados se presentan en la tabla.

CONJUGADAS	ESFUERZOS			RUMBO	DESPLAZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA	ESTEREOGRAFALIA
	S1 ADMUT/PLUNGE	S2 ADMUT/PLUNGE	S3 ADMUT/PLUNGE					
J 7-14	231,30 / 4,30	322,50 / 53,27	126,00 / 74,11	172	29	22	E8: Falla transcurrente dextral con componente inversa E9: Falla transcurrente sinistral con componente normal E10: Falla transcurrente dextral con componente normal	
J 7-15	98,51 / 20,40	102,70 / 11,08	309,50 / 66,54	172	29	69	E8: Falla transcurrente dextral con componente inversa E9: Falla transcurrente sinistral con componente normal E10: Falla transcurrente dextral con componente normal	
J 8-11	269,90 / 3,01	1,39 / 26,18	173,80 / 63,62	32	44	39	E9: Falla transcurrente sinistral con componente normal E10: Falla transcurrente sinistral con componente normal E11: Falla transcurrente sinistral con componente normal	
J 8-14	269,90 / 17,63	7,30 / 21,98	144,60 / 61,22	32	44	22	E9: Falla transcurrente sinistral con componente normal E10: Falla transcurrente sinistral con componente normal E11: Falla transcurrente sinistral con componente normal	
J 8-15	252,40 / 73,55	21,04 / 10,40	113,40 / 12,60	32	44	69	E9: Falla transcurrente sinistral con componente normal E10: Falla transcurrente sinistral con componente normal E11: Falla transcurrente sinistral con componente normal	

Fig. 15. Resultados de las superficies de falla conjugadas del J 7-14 al J 8-15 con el Stereo 32

CONJUGADAS	ESFUERZOS			RUMBO	DESPLAZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA	ESTEREOGRAFALIA
	S1 ADMUT/PLUNGE	S2 ADMUT/PLUNGE	S3 ADMUT/PLUNGE					
J 9-11	259,40 / 5,97	351,70 / 20,38	154,00 / 68,49	10	50	144	E11: Falla transcurrente dextral con componente normal E12: Falla transcurrente sinistral con componente normal E13: Falla transcurrente sinistral con componente normal	
J 9-14	253,90 / 18,44	351,30 / 20,94	126,10 / 61,49	10	50	22	E9: Falla transcurrente dextral con componente normal E10: Falla transcurrente sinistral con componente normal E11: Falla transcurrente sinistral con componente normal	
J 10-11	264,10 / 12,66	0,25 / 25,59	150,10 / 61,03	15	62	39	E12: Falla transcurrente dextral con componente normal E13: Falla transcurrente sinistral con componente normal E14: Falla transcurrente sinistral con componente normal	
J 10-14	261,30 / 26,24	2,70 / 21,94	127,20 / 54,70	15	62	22	E12: Falla transcurrente dextral con componente normal E13: Falla transcurrente sinistral con componente normal E14: Falla transcurrente sinistral con componente normal	
J 11-14	89,87 / 18,67	352,40 / 21,06	217,90 / 61,23	144	39	21	E11: Falla transcurrente sinistral con componente normal E12: Falla transcurrente sinistral con componente normal E13: Falla transcurrente sinistral con componente normal	

Fig. 16. Resultados de las superficies de falla conjugadas del J 9-11 al J 11-14 con el Stereo 32.

El esfuerzo principal  $\sigma_1$  tiene una forma oblicua respecto a las superficies de falla del área de estudio, lo que implica que tiene una componente

tangencial y normal al plano. Al descomponer vectorialmente  $\sigma_1$ , coincide con el movimiento de las estrías de falla observadas en campo, en donde la mayoría de los pitch predominan ángulos menores a  $45^\circ$  lo que indica que son transcurrentes dominando el movimiento horizontal sobre el vertical (Tabla 1), siendo este el principal movimiento que origina la deformación estructural de la zona (Figura 19).

CONJUGADAS	ESFUERZOS			RUMBO	DESPLAZAMIENTO	PITCH	CINEMÁTICA	ESTEREOGRAFALIA
	S1 ADMUT/PLUNGE	S2 ADMUT/PLUNGE	S3 ADMUT/PLUNGE					
J 11-15	148,20 / 29,22	33,98 / 37,27	266,00 / 38,94	144	39	69	E11: Falla transcurrente dextral con componente normal E12: Falla transcurrente sinistral con componente normal E13: Falla transcurrente dextral con componente normal	
J 12-11	138,30 / 68,53	259,40 / 11,17	353,10 / 18,09	78	83	47	E12: Falla normal con componente dextral E13: Falla normal con componente dextral E14: Falla normal con componente dextral	
J 14-15	264,30 / 53,17	25,59 / 21,26	127,80 / 28,50	100	22	69	E11: Falla transcurrente sinistral con componente normal E12: Falla transcurrente sinistral con componente normal E13: Falla transcurrente dextral con componente normal	

Fig. 17. Resultados de las superficies de falla conjugadas del J 11-15 al J 14-15 con el Stereo 32.

Tabla 3. Promedios de los esfuerzos principales

Promedio	Azímüt	Plunge
$\sigma_1$	121,3	20,002
$\sigma_2$	30,2	21,69
$\sigma_3$	223,2	56,43

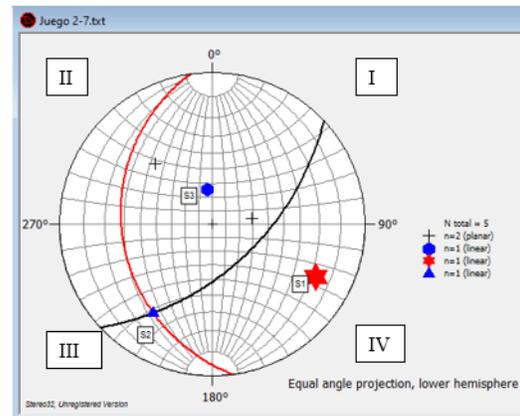


Fig. 18. Proyección estereográfica del juego J 2-7 con esfuerzos principales.

### 3.5 Aplicación del Modelo de Deslizamiento para determinar fallas neoformadas o reactivadas

Se relacionó la información de la tabla 4 (datos de buzamientos, cabeceos y cinemática de las estrías de falla) con el fin de clasificar cada falla como neoformada o reactivada. Una vez ubicado el punto C/B se compara la cinemática de la estría de falla tomada en campo con la de la leyenda del diagrama, si coinciden con la primera componente de ambas se clasifica como Neoformada, de lo contrario sería Reactivada.

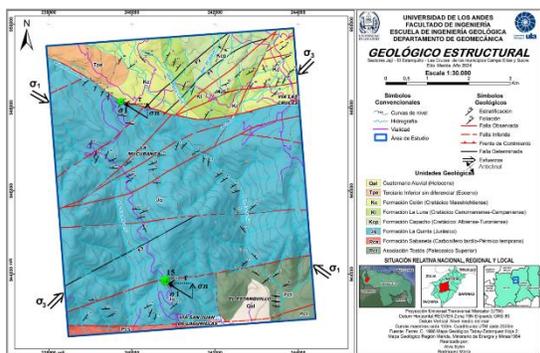


Fig. 19. Mapa geológico estructural sector Jají-San Juan de Lagunillas con la representación de los esfuerzos principales.

Tabla 4. Datos para el análisis del Modelo de Deslizamiento

Punto	Estría	SUPERFICIE DE FALLA		Cinemática
		Buzamiento	Pitch	
1	E1	43 NW	49 NW	Falla Inversa con componente sinistral
1	E2	43 NW	88 SW	Falla Normal
2	E3	57 SE	37 NE	Falla transcurrente sinistral con componente inversa
3	E4	88 SE	63 SE	Falla Normal con componente dextral
4	E5	68 NE	84 NE	Falla Inversa con componente sinistral
7	E8	50 SW	32 SW	Falla transcurrente dextral con componente inversa
7	E9	50 SW	15 NE	Falla transcurrente dextral con componente normal
8	E10	44 NW	38 NW	Falla transcurrente sinistral con componente normal
9	E11	50 NW	23 NW	Falla transcurrente dextral con componente normal
10	E12	62 NW	19 NE	Falla transcurrente dextral con componente normal
11	E13	39 NE	18 NE	Falla transcurrente sinistral con componente normal
12	E14	83 NW	48 NW	Falla Normal con componente dextral
13	E15	56 S	45 NE	Falla normal con componente dextral
14	E16	22 NE	35 SE	Falla transcurrente sinistral con componente inversa
15	E17	69 SE	36 SE	Falla transcurrente dextral con componente normal

Una vez evaluado el comportamiento cinemático de los puntos a través del Modelo de Deslizamiento, se observa que un 53,33% de las fallas son Neoformadas, estando estas ubicadas en el cretácico los puntos 1-3-7, y en la Formación La Quinta los puntos 9-10-12-13-15, indicando que dichas fallas son producto de un solo evento

tectónico y por ello están sometidos al tensor de esfuerzos original (un solo movimiento), dominando este comportamiento sobre las Reactivadas (más de un movimiento) con un 46,66% ubicadas en los puntos correspondiente a las formaciones del cretácico 1-2-4-7-8, y en la Formación La Quinta los puntos 11 y 14 (Figura 20). En la Tabla 5 se observa el cambio de movimiento al comparar la cinemática tomada en campo con el diagrama C/B, lo que representa una reorientación de los esfuerzos principales (Figura 21).

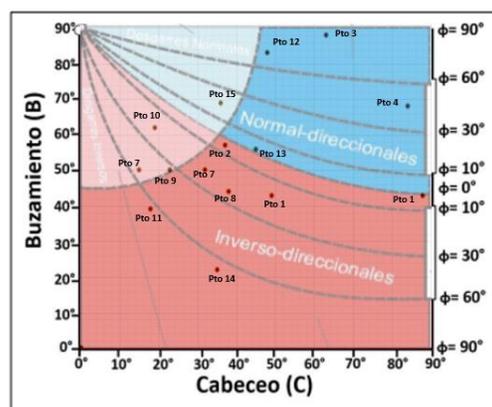


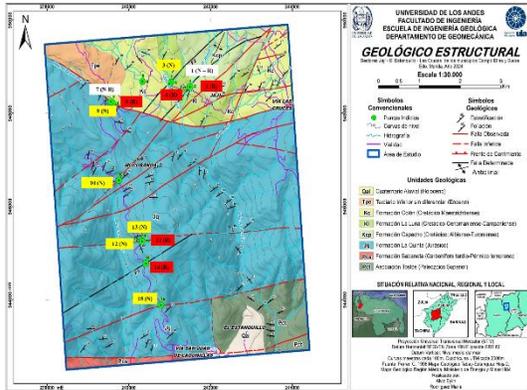
Fig. 20. Diagrama del Modelo de Deslizamiento con datos.

Tabla 5. Resultado del comportamiento cinemático de las fallas con el Modelo de Deslizamiento

Punto	Estría	SUPERFICIE DE FALLA		Cinemática	Diagrama C/B	Comportamiento de la falla
		Buzamiento	Pitch			
1	E1	43 NW	49 NW	Falla Inversa con componente sinistral	Inverso-Direccional	NEOFORMADA
1	E2	43 NW	88 SW	Falla Normal	Inverso-Direccional	REACTIVADA
2	E3	57 SE	37 NE	Falla transcurrente sinistral con componente inversa	Inverso-Direccional	REACTIVADA
3	E4	88 SE	63 SE	Falla Normal con componente dextral	Normal-Direccional	NEOFORMADA
4	E5	68 NE	84 NE	Falla Inversa con componente sinistral	Normal-Direccional	REACTIVADA
7	E8	50 SW	32 SW	Falla transcurrente dextral con componente inversa	Inverso-Direccional	REACTIVADA
7	E9	50 SW	15 NE	Falla transcurrente dextral con componente normal	Desgarre-Inverso	NEOFORMADA
8	E10	44 NW	38 NW	Falla transcurrente sinistral con componente normal	Inverso-Direccional	REACTIVADA
9	E11	50 NW	23 NW	Falla transcurrente dextral con componente normal	Desgarre-Inverso	NEOFORMADA
10	E12	62 NW	19 NE	Falla transcurrente dextral con componente normal	Desgarre-Inverso	NEOFORMADA
11	E13	39 NE	18 NE	Falla transcurrente sinistral con componente normal	Inverso-Direccional	REACTIVADA
12	E14	83 NW	48 NW	Falla Normal con componente dextral	Normal-Direccional	NEOFORMADA
13	E15	56 S	45 NE	Falla normal con componente dextral	Normal-Direccional	NEOFORMADA
14	E16	22 NE	35 SE	Falla transcurrente sinistral con componente inversa	Inverso-Direccional	REACTIVADA
15	E17	69 SE	36 SE	Falla transcurrente dextral con componente normal	Desgarre-Normal	NEOFORMADA

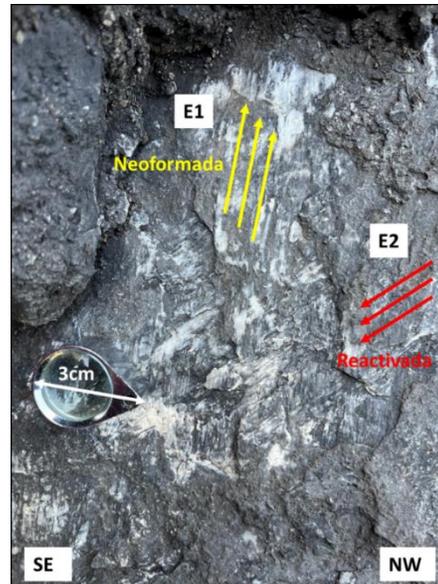
El corrimiento de Mesa Bolívar es una falla inversa de bajo ángulo que se superpone (Formación La Quinta) sobre las formaciones más recientes (Formaciones Colón, La Luna y Capacho), formando un plegamiento que da lugar a fallas nuevas en su cresta, siendo estas las neoformadas

ya que es el movimiento más reciente, como consecuencia del empuje del corrimiento se genera en el frente de corrimiento fallas reactivadas, las cuales son más antiguas que el corrimiento

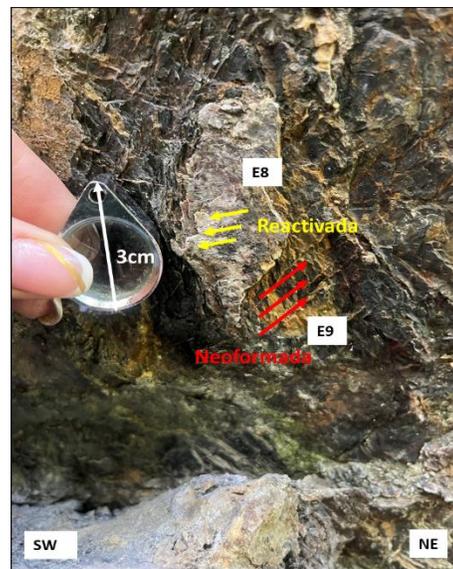


**Fig. 21.** Ubicación de fallas neoformadas y reactivadas en mapa geológico estructural.

El corrimiento de Mesa Bolívar es una falla inversa de bajo ángulo que se superpone (Formación La Quinta) sobre las formaciones más recientes (Formaciones Colón, La Luna y Capacho), formando un plegamiento que da lugar a fallas nuevas en su cresta, siendo estas las neoformadas ya que es el movimiento más reciente, como consecuencia del empuje del corrimiento se genera en el frente de corrimiento fallas reactivadas, las cuales son más antiguas que el corrimiento. El corrimiento no tiene una cinemática netamente vertical (inversa), sino también una componente de transcurrencia observada en la descomposición de los esfuerzos principales sobre él (Figura 19), dicha componente se corrobora con la dirección de los esfuerzos y con las estrías de falla y su cinemática, siendo estas en su mayoría de transcurrencia. Se verifica la efectividad del modelo, en el punto 1 (Figura 22) dos estrías de fallas (E1 flechas amarillas y E2 flechas rojas) contenidas en la misma superficie de falla, donde se observa una diferencia de movimiento entre ellas, ya que E2 superpone a E1, la E1 se rige por el tensor de esfuerzo original cuyo movimiento es inversa-sinistral, mientras que E2 representa el segundo evento tectónico reactivándose con un movimiento normal reorientando los esfuerzos originales. Ya que en efecto E2 coincide con lo observado en campo (Tabla 4) y con el resultado del diagrama C/B (Tabla 5) siendo Reactivada, de la misma manera E1 da como resultado una falla Neoformada.



**Fig. 22.** Punto 1, nótese la dirección de las estrías E1 y E2, en la Formación Capacho



**Fig. 23.** Punto 7, nótese la dirección de las estrías E8 y E9 en la Formación Colón.

La segunda evidencia de reactivación es el punto 7 (Figura 23), cuya superficie contiene la E8 (flechas amarillas) que superpone a E9 (flechas rojas), donde se observa una diferencia de movimiento entre ellas, la E9 se rige por el tensor de esfuerzo original cuyo movimiento es dextral-normal, mientras que E8 representa el segundo evento tectónico reactivándose con un movimiento dextral-inverso reorientando los esfuerzos originales. El resultado del Modelo de Deslizamiento confirma esta segunda evidencia

corroborando su efectividad, la cual es E8 una falla reactivada y E9 neoformada. Por lo antes expuesto, esta metodología sugerida, esgrime una aproximación real sobre el sistema de fallas reactivadas y neoformadas, por ello, es recomendable su uso, para determinar la geología estructural de un área extensa.

#### 4. Conclusiones

Finalizada la investigación se plantean puntualidades que se describen como conclusiones del estudio: El análisis fotogeológico del sector "La Mucubanga," entre Jají y San Juan de Lagunillas en el estado Mérida, muestra un dominio del control estructural con la presencia de rasgos geomorfológicos como lomos de presión, trincheras de falla y plegamientos. Hay diecisiete fallas que afectan la zona, desplazando ciertos drenajes. La hidrografía incluye cuatro quebradas principales, siendo la quebrada La Sucia el drenaje principal. Se observa un cambio litológico en el frente de corrimiento, con variaciones de areniscas a calizas y lutitas, y un relieve que va de acolinado a abrupto, con vegetación variada. Los datos de campo indican una tendencia general de comportamiento cinemático de transcurrencia con ángulos pitch menores a 45° y buzamientos inclinados aproximadamente 54° NW. El esfuerzo principal  $\sigma_1$  tiene una dirección promedio S 59 E, coincidiendo con la vergencia de Los Andes. Este esfuerzo tiene una componente tangencial y otra normal al plano de falla, dominando el movimiento horizontal. El modelo de deslizamiento muestra un 53,33% de fallas neoformadas y un 46,66% reactivadas, con fallas nuevas en la cresta y las reactivadas en el frente de corrimiento. La mayoría de las fallas tienen un movimiento de transcurrencia. Se identificaron y verificaron diecisiete fallas, con tres (F1, F2, y F3) como aportes clave. F1 muestra cinemática vertical, F2 dextral, y F3 sinistral. Análisis mediante software confirma la dirección SE-NW de la vergencia de Los Andes, que es la responsable de la deformación de las rocas que se ubicaron en el área de estudio, con  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  ortogonales entre sí. El modelo geológico estructural presenta un sistema de fallas imbricadas y sub-paralelas, producto del esfuerzo compresivo de la zona, consistente con modelos tectónicos previos.

#### 5. Referencias

- Angelier, J. (1994). *Análisis de deslizamiento de fallas y reconstrucción de paleoestrés*. En: Hancock, PL, Ed., Continental Deformation, Pergamon Press, Oxford, 53-100. p.101, p.120.
- Angelier, J., & Mechler, P. (1977). *Sur Le Méthode grafique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des diédres droits*. Bull, Soc. Geol. France, 1309-1318.
- Babín, R., & Gómez, D. (2010). *Problemas de Geología Estructural 8. Fallas*. Reduca (Geología). Serie Geología Estructural. 2 (1): 124-147.
- Bongiorno, F., Belandria, N., y Úcar, R. (2011). *Determinación de la dirección de los esfuerzos principales a través de análisis numérico y proyecciones estereográficas de la falla de Boconó en el sector Yacambú estado Lara*. Revista Ciencia e Ingeniería, Facultad de Ingeniería. ULA.
- Case, E., Shagam, R., & Giegengack, F. (1990). *Geology of the northern Andes: an overview*. GSA Bulletin, 76: 567-589.
- De Vicente, G. (1988). *Análisis Poblacional de Fallas*. El sector de enlace Sistema Central-Cordillera Ibérica. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 317 pp
- Pegoraro, P. (1972). *Uso del Método de los diedros rectos: Implicaciones a partir del modelo de deslizamiento del análisis poblacional de fallas*.

**Francisco Ignacio Bongiorno Ponzó:** Doctor en Gerencia Avanzada, Magister en Matemáticas Aplicadas a la Ingeniería. Ingeniero Geólogo. Profesor Titular de la Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería Mérida Venezuela. Laboratorio de Geología Estructural y Geotecnia.

<https://orcid.org/0000-0001-7508-2408>

**Eylín Gladymar Alviz Guerrero:** Ingeniero Geólogo, Graduada en la Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: [alvizeylin@gmail.com](mailto:alvizeylin@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0007-0785-3582>

**María Fernanda Rodríguez Rojas:** Ingeniero Geólogo, Graduada en la Universidad de Los

*Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico:*  
*mariaferrodriguezr@gmail.com*  
 <https://orcid.org/0009-0002-5819-511>