

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**



**TESIS PROFESIONAL**

**ESTUDIO DE INFLUENCIA MICROTECTÓNICA DE LA FALLA  
CAJAMARCA EN LA ZONA NOROESTE DEL DISTRITO DE  
LLACANORA. CAJAMARCA – PERÚ**

**Para optar el Título Profesional de:  
INGENIERO GEÓLOGO**

**Presentado por:  
Bach. JHONY WILSON VARGAS BARBOZA**

**Asesor:  
Dr. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE**

**Cajamarca – Perú**

**- 2018 -**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi Alma Mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, y una mención importante a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica, por albergarme en sus aulas durante 5 años en las cuales adquirí los conocimientos que ahora me hace sentir orgulloso de pertenecerá este centro de estudios.

A las personas que me apoyaron en la elaboración y ejecución de la presente Tesis, en primer lugar, a mi Asesor Ing. Alejandro Lagos Manrique por su apoyo y compromiso y guiarme en los detalles de la elaboración de la Tesis; así mismo a los miembros quienes son los Ingenieros, Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado, Crispín Zenón Quispe Mamami, Roberto Severino Gonzales Yana, y Victor Ausberto Arapa Vilca, quienes fueron también mis docentes y me compartieron sus conocimientos.

A Crithian Mendoza, Juan Manuel Huaccha quienes fueron mis compañeros de aula y me apoyaron en las salidas de campo y a todos los amigos que con su aliento me incentivaron a culminar uno de mis objetivos en mi vida profesional.

## **DEDICATORIA**

En Primer lugar, Dios por haber dado la vida y guiar mis pasos, a mis padres Gregorio Vargas Díaz y Estefanía Barboza Hernández, quienes hicieron todos los sacrificios y modos posibles para darme una educación y ser una persona de bien, a mis Hermanas quienes me brindaron sus consejos y apoyo constante e incondicional, gracias por la confianza y ayudar a cumplir con mis objetivos.

**El Autor**

## ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO II .....	3
MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Antecedentes teóricos de la investigación .....	3
2.2 Bases Teóricas .....	4
2.2.1 Geología estructural y microtectónica .....	4
2.2.2 Microtectónica .....	4
2.3 Definición de términos básicos .....	20
CAPÍTULO III .....	22
MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
3.1 Ubicación .....	22
3.1.1 Accesibilidad .....	22
3.2 Clima y Vegetación .....	23
3.3 Geografía .....	23
3.4 Unidades Geomorfológicas .....	23
3.4.1 Valle .....	23
3.5 Geología Local .....	24
3.5.1 Grupo Goyllarisquizga .....	25
3.5.1.1 Formación Carhuáz (Ki-ca) .....	25
3.5.1.2 Formación Farrat (Ki-fa) .....	25
3.6 Geología Estructural .....	26
3.6.1 Generalidades .....	26
3.6.2 Corredor Estructural Chicama- Yanacocha .....	27
3.6.3 Interpretación estructural regional .....	28
3.7 Procedimiento .....	31
3.7.1 Métodos y Materiales .....	31
3.7.1.1 Etapa I .....	31
3.7.1.2 Etapa II .....	33

	Pág.
3.7.1.3 Etapa III .....	36
3.7.1.4 Etapa IV .....	37
3.8 Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados .....	37
3.8.1 Análisis estadístico .....	38
3.8.2 Análisis descriptivo .....	38
3.8.3 Análisis microscópico.....	89
CAPÍTULO IV .....	94
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	94
CAPÍTULO V. ....	104
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	104
5.1 CONCLUSIONES.....	104
5.2 RECOMENDACIONES .....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Relación entre los procesos y el ambiente. (Hancock 1985). .....	5
<b>Figura 2.</b> Forma de granos según el tipo de deformación. La primera figura muestra una deformación cualquiera la cual puede calcularse infinitesimalmente; la segunda figura muestra una deformación ideal. (Davies 2002). .....	7
<b>Figura 3.</b> Fases tectónicas en relación con las inclusiones minerales. (Bastida 2004). .....	8
<b>Figura 4.</b> Formación de estilolitos a consecuencia de esfuerzos compresivos. (Gómez 2010). .....	10
<b>Figura 5.</b> a) Relaciones angulares entre las fallas maestra, secundarias y grietas de tensión. b) clivaje de falla desarrollado entre dos planos de falla. c), d), e) y f) criterios de indicadores cinemáticos. (Petit 1987). .....	12
<b>Figura 6.</b> Formación de lentes o estructuras sigmoidales por la rotación de fallas secundarias R, R' y P. (Mercier y Vergely 1992). .....	14
<b>Figura 7.</b> Algunos criterios cinemáticos adicionales en fallas frágiles. (a) Fibras de relleno. (b) Fábrica sigmoidal en salbanda. (c) Clivaje en rocas carbonatadas. (d) Saltos rellenos con material fibroso. (e) Marcas de clastos. (Petit 1987). .....	15
<b>Figura 8.</b> Tres tipos de fallas: normal, de rumbo e inversa. (a) Fallas conjugadas y orientación de los stresses principales. (b) Representación de sistemas de fallas conjugadas en Red de Schmidt, hemisferio inferior. Las flechas indican el sentido de los rechazos. (Laurent 1987). .....	15
<b>Figura 9.</b> Criterios para la nomenclatura de fallas con base en el ángulo del pitch de las estrías. Fuente (Páez 2010). .....	17
<b>Figura 10.</b> Deformación de una muestra de roca, indicando ejes de extensión y acortamiento, la posterior formación de un plano de falla con un ángulo de 45° con respecto a la fuerza F constituye el plano nodal 1, a 90° se grafica un plano auxiliar que constituye el segundo plano nodal, los planos nodales definen los campos de extensión (T) y acortamiento (P). (Cox y Bryan 1986). .....	17
<b>Figura 11.</b> Metodología de Allmendinger. Determinación de las direcciones de acortamiento y extensión para el caso de una falla normal con componente lateral. (Páez 2010). .....	19

<b>Figura 12.</b> Construcción de la gráfica de mecanismo focal (P&T), típica de falla inversa utilizando la esfera focal, con la definición de los campos de extensión (T) y acortamiento (P). En la figura b) se ilustra la gráfica típica de falla normal con componente lateral indicada por las estrías. (Cox y Bryan 1986).....	20
<b>Figura 13.</b> Mapa Paleogeográfico del Perú durante el Jurásico superior (MALM), donde se observa la configuración de dos cuencas una Occidental y otra Oriental. (Dalmayrac, et al 1978). .....	27
<b>Figura 14.</b> Corredor Estructural Chicama Yanacocha, cerca del cual se encuentra la zona de estudio. (Quiroz 2007). .....	28
<b>Figura 15.</b> Corredor Estructural Chicama Yanacocha cerca del cual se encuentra la zona de trabajo. (Quiroz 2007).....	30
<b>Figura 16.</b> Gráfico de conversión de datos. ....	31
<b>Figura 17.</b> Método de la regla de la mano derecha. (Casas 1990).....	32
<b>Figura 18.</b> Forma de medir la estría de una falla pitch o rake ( $\lambda$ ), inmersión o plunge ( $\beta$ ) y rumbo o trend ( $\epsilon$ ). (Casas 1990). ....	32
<b>Figura 19.</b> Block diagrama de Parámetros de un plano de falla. Casas 1990). ....	33
<b>Figura 20.</b> Análisis estadístico de la orientación con tendencia NW-SE de planos de fallas. ....	38
<b>Figura 21.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 1 .....	40
<b>Figura 22.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 2 .....	41
<b>Figura 23.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 2.1 .....	42
<b>Figura 24.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 3 .....	43
<b>Figura 25.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 3.1 .....	45
<b>Figura 26.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 3.2 .....	46
<b>Figura 27.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 4 .....	48
<b>Figura 28.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 5 .....	50
<b>Figura 29.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 6 .....	51
<b>Figura 30.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 7 .....	53
<b>Figura 31.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 7.1 .....	54
<b>Figura 32.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 8 .....	56
<b>Figura 33.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 9 .....	57
<b>Figura 34.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 10 .....	59
<b>Figura 35.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 11 .....	61

	Pág.
<b>Figura 36.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 12 .....	63
<b>Figura 37.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 13 .....	65
<b>Figura 38.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 14 .....	66
<b>Figura 39.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 15 .....	68
<b>Figura 40.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 16 .....	70
<b>Figura 41.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 17 .....	71
<b>Figura 42.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 18 .....	73
<b>Figura 43.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 19 .....	75
<b>Figura 44.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 20 .....	77
<b>Figura 45.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 21 .....	78
<b>Figura 46.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 22 .....	80
<b>Figura 47.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 23 .....	82
<b>Figura 48.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 24 .....	84
<b>Figura N° 49.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 25.....	86
<b>Figura 50.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 26 .....	88
<b>Figura 51.</b> Análisis de resultados dirección de esfuerzos versus rumbo de falla, estación N° 1 – estación N° 5 .....	96
<b>Figura 52.</b> Análisis de resultados dirección de esfuerzos versus rumbo de falla, estación N° 6 – estación N° 12 .....	97
<b>Figura 53.</b> Análisis de resultados dirección de esfuerzos versus rumbo de falla, estación N° 13 – estación N° 20 .....	98
<b>Figura 54.</b> Análisis de resultados dirección de esfuerzos versus rumbo de falla, estación N° 21 – estación N° 26 .....	99
<b>Figura 55.</b> Resultados de dirección de esfuerzos de fallas normales y conceptos teóricos de Anderson, 1905.....	101
<b>Figura 56.</b> Resultados de dirección de esfuerzos de fallas inversas y conceptos teóricos de Anderson, 1905.....	101
<b>Figura 57.</b> Resultados de dirección de esfuerzos de fallas de rumbo y conceptos teóricos de Anderson, 1905.....	102
<b>Figura 58.</b> Resultado final de dirección de esfuerzos de la Falla Cajamarca y concepto teórico de Anderson, 1905.....	103



## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Coordenadas UTM del área.....	22
<b>Tabla 2.</b> Vías de acceso al área de investigación.....	22
<b>Tabla 3.</b> Tabla de datos recopilados en campo.....	36

## ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
<b>Foto 1.</b> Geoforma valle en U del área de investigación.....	24
<b>Foto 2.</b> Geoforma abrupta sobre rocas areniscas de la Formación. Farrat y Carhuáz.....	24
<b>Foto 3.</b> Afloramiento de la Formación Carhuáz en el acceso Baños del Inca – Llacanora	25
<b>Foto 4.</b> Afloramiento de areniscas de la Formación Farrat.....	26
<b>Foto 5.</b> Instrumentos usados en campo .....	34
<b>Foto 6.</b> Toma de datos en campo .....	35
<b>Foto 7.</b> Microscópico óptico para estudio petrográfico – microtectónico .....	37
<b>Foto 8.</b> Interpretación microtectonica estación N° 1.....	39
<b>Foto 9.</b> Interpretación microtectonica estación N° 3.....	43
<b>Foto 10.</b> Interpretación microtectonica estación N° 3.1.....	44
<b>Foto 11.</b> Interpretación microtectonica estación N° 3.2.....	45
<b>Foto 12.</b> Interpretación microtectonica estación N° 4.....	47
<b>Foto 13.</b> Interpretación microtectonica estación N° 5.....	49
<b>Foto 14.</b> Interpretación microtectonica estación N° 6.....	51
<b>Foto 15.</b> Interpretación microtectonica estación N° 7.....	52
<b>Foto 16.</b> Interpretación microtectonica estación N° 7.1.....	54
<b>Foto 17.</b> Interpretación microtectonica estación N° 8.....	55
<b>Foto 18.</b> Interpretación microtectonica estación N° 9.....	57
<b>Foto 19.</b> Interpretación microtectonica estación N° 10.....	58
<b>Foto 20.</b> Interpretación microtectonica estación N° 11.....	60
<b>Foto 21.</b> Interpretación microtectonica estación N° 12.....	62
<b>Foto 22.</b> Interpretación microtectonica estación N° 13.....	64
<b>Foto 23.</b> Interpretación microtectonica estación N° 14.....	66
<b>Foto 24.</b> Interpretación microtectonica estación N° 15.....	67
<b>Foto 25.</b> Interpretación microtectonica estación N° 16.....	69
<b>Foto 26.</b> Interpretación microtectonica estación N° 17.....	71
<b>Foto 27.</b> Interpretación microtectonica estación N° 18.....	72
<b>Foto 28.</b> Interpretación microtectonica estación N° 19.....	74
<b>Foto 29.</b> Interpretación microtectonica estación N° 20.....	76
<b>Foto 30.</b> Interpretación microtectonica estación N° 21.....	78
<b>Foto 31.</b> Interpretación microtectonica estación N° 22.....	79
<b>Foto 32.</b> Interpretación microtectonica estación N° 23.....	81

	Pág.
<b>Foto 33.</b> Interpretación microtectónica estación N° 24.....	83
<b>Foto 34.</b> Interpretación microtectónica estación N° 25.....	85
<b>Foto 35.</b> Interpretación microtectónica estación N° 26.....	87
<b>Foto 36.</b> Interpretación de dirección de esfuerzos en fractura de tensión.....	89
<b>Foto 37.</b> Microfotografía de sección delgada escala 500um, propiedades ópticas a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 1 - vista 1.....	89
<b>Foto 38.</b> Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 1 – vista 2. ....	90
<b>Foto 39.</b> Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 2 – vista 1 .....	91
<b>Foto 40.</b> Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestras N°2 – vista 2. ....	91
<b>Foto 41.</b> Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 3 – vista 1 .....	92
<b>Foto 42.</b> Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas de a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 3 – vista 2. ....	92
<b>Foto 43.</b> Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas de a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 4 – vista 1 .....	93
<b>Foto 44.</b> Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas de a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 4 – vista 2 .....	93

## RESUMEN

La falla Cajamarca es una estructura regional de tipo inversa dextral que se extiende en dirección NW-SE y se encuentra aflorando cerca de la localidad de Llacanora y Los Baños del Inca, que afecta a rocas detríticas del Cretácico inferior tales como la Formación Farrat y Formación Carhuáz. En esta investigación se busca determinar la influencia microtectónica de la falla Cajamarca en la zona noroeste del distrito de Llacanora, utilizando imágenes satelitales se realizó una interpretación macroestructural de la falla, que permitió proponer la geometría de deformación y algunas características cinemáticas, conocimiento que, juntos a datos geográficos, morfológicos y estratigráficos, fueron básico para la elección de zonas de interés microtectónico. En la etapa de campo se realizó las mediciones de estructuras planas y lineales como son las fallas, diaclasas, superficies de estratificación y estrías de falla; que se procesaron en el software estructural FaultKin 6 definiendo un régimen de esfuerzo compresivo de la Falla Cajamarca; generando estructuras secundarias como fallas normales, inversas y de rumbo, las cuales son de influencia local y de acuerdo al análisis poblacional de dichas estructuras secundarias y de secciones delgadas presentan tendencia de rumbo similar a la falla principal (Falla Cajamarca) que es NW-SE.

Palabras claves: caracterización microtectónica, análisis cinemático, estrías de falla.

## **ABSTRACT**

The Cajamarca fault is a regional structure of the inverse type that extends in the NW-SE direction and is emerging near the town of Llacanora and Los Baños del Inca, which affects detrital rocks of the Lower Cretaceous such as the Farrat Formation and Formation Carhuáz. We seek to determine the microtectonic influence of the Cajamarca fault in the northwest area of the district of Llacanora, using satellite images a macrostructural interpretation of the fault was made, which allowed to propose the geometry of deformation and some kinematic characteristics, knowledge that, together with geographic data, morphological and stratigraphic, were basic for the election of zones of microtectonic interest. In the field stage, measurements were made of flat and linear structures such as faults, diaclases, stratification surfaces and fault grooves; that were processed in the FaultKin 6 structural software defining a compression effort regime of the Cajamarca Falla; generating secondary structures such as normal, inverse and heading faults, which are of local influence and according to the population analysis of said secondary structures, they present a tendency of course similar to the main fault (Falla Cajamarca) that is NW-SE.

Keywords: microtectonic characterization, kinematic analysis, fault striations.

## **CAPÍTULO I.**

### **INTRODUCCIÓN**

El área de Investigación comprendida en el distrito Llacanora, al sureste de la ciudad de Cajamarca, constituida por unidades litológicas del Cretáceo Inferior que se encuentran afectadas por una falla regional de cinemática inversa dextral, en la cual actualmente no existen estudios microtectónicos enfocados en determinar la influencia microtectónica que se ha generado a partir de la formación de la “Falla Cajamarca”. Considerando lo manifestado se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la influencia microtectónica que ha generado la formación de la falla Cajamarca en la zona noroeste del Distrito Llacanora?

Como hipótesis se plantea que, la formación de la falla Cajamarca está dado por un evento tectónico compresivo, la cual tiene un desplazamiento inverso dextral; así mismo por influencia de los esfuerzos tectónicos estos han generado fallas secundarias asociado a sistema de fallas tipo Riedel; el estudio microtectónico ayudará mejor la caracterización de estos esfuerzos tectónicos y su influencia de los mismos en el área de estudio. La interpretación de datos de estructuras microtectónicas mediante un análisis estereográfico y secciones delgadas de muestras orientadas; con medidas de orientación y buzamiento de los planos de falla, cabeceo (pitch) o declive (plunge) y determinación de los sentidos de movimientos a través de los criterios microtectónicos; ayudan a determinar la caracterización de los esfuerzos principales y secundarios que han dado producto de la generación de la Falla Cajamarca.

El motivo que impulsa a realizar esta investigación es porque para determinar la influencia microtectónica que ha generado la formación de la Falla Cajamarca; es importante desde el punto de vista científico realizar un estudio microtectónico en la zona circundante a la Falla Cajamarca.

Dentro del alcance que se pretende en esta tesis, es mostrar la metodología utilizada para determinar la influencia microtectónica de la Falla Cajamarca en el sector noroeste del distrito Llacanora, enfocados en un análisis microtectónico.

Con la finalidad de recopilar datos medibles y comprobables se ha planteado el siguiente objetivo general: Realizar el estudio de influencia microtectónica de la Falla Cajamarca en la zona noroeste del Distrito Llacanora, para lo que se apoya en objetivos específicos: Analizar estructuras microtectónicas a través de secciones delgadas en microscopio petrográfico. Determinar la dirección de esfuerzos tectónicos secundarios que se ha generado por de la afluencia microtectónica de la Falla Cajamarca. Determinar la dirección de esfuerzos tectónicos principales responsables de la formación de la Falla Cajamarca.

Finalmente, el desarrollo de la tesis que se presenta, consta de V capítulos, además del correspondiente a las referencias bibliográficas y anexos.

El capítulo II revisa el estado del arte de las investigaciones que existen en materia de la geología estructural y tectónica, se comentan algunas de las investigaciones que presentan los métodos propuestos hasta el momento. Se describen las bases teóricas de la microtectónica relacionados con la geología estructural.

En el capítulo III, se describe la ubicación geográfica, el clima, la vegetación, las características geológicas y estructurales a nivel regional y local donde se realizó la investigación; así como el análisis petrográfico de secciones delgadas e indicadores cinemáticos en las microestructuras de la falla regional en los alrededores de la localidad de Llacanora; utilizando softwares estructurales y microscopio electrónico.

El capítulo IV muestra los resultados obtenidos en relación con los objetivos perseguidos, definiendo el régimen de esfuerzos que afecto a la falla regional y su caracterización microtectónica.

Finalmente, el capítulo V presenta las conclusiones que se desprenden de esta investigación, de acuerdo con los objetivos planteados y los resultados obtenidos, se plantean algunas recomendaciones sobre investigaciones futuras que permitan mejorar los resultados obtenidos hasta el momento.

## **CAPÍTULO II.**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes teóricos de la investigación.**

La zona cuenta con estudios geológicos realizados por los siguientes autores:

Reyes (1980). Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET). Boletín N° 31, Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Analiza regionalmente y dentro de ella el área de estudio y se da cuenta del primer cartografiado regional de Cajamarca a escala 1:100,000

Wilson (2000). Structural Development of the Northern Andes of Perú, describe los cambios litológicos regionales de la Cuenca Cajamarca y las estructuras tectónicas regionales asociada a la cuenca.

Vigo (2014). Tesis Caracterización estructural de la falla Cajamarca y su influencia en la localidad de Llacanora. Cajamarca- Perú. Quien concluyo que el movimiento dextral de la falla Cajamarca ha generado distensión en la parte de Llacanora contribuyendo a la generación de hundimientos y posterior relleno de material lacustrino tal como lo atestiguan los controles de campo y los Análisis Poblacional de fallas y fracturas. Más no definió la caracterización del evento tectónico.

Bardales (2014). Tesis Análisis Estructural de las Secuencias Cretáceas de Los Baños del Inca y Alrededores, Cajamarca – Perú. Quien concluyo que, el área estudiada corresponde a una secuencia Cretácea plegada, exhibiendo principalmente dos pliegues (macroanticlinal Baños del Inca y sinclinal Otuzco), con importante longitud de afloramiento (> 10km), 21 fallas normales (núcleo y flancos pliegues), 7 fallas inversas (falla Cajamarca, flanco sur anticlinal), 20 fallas de desgarre (12 dextrales y 8 sinestrales, flanco norte del sinclinal y flanco sur del anticlinal) y 22 fallas inferidas (mitad sur del área estudiada). Más no realizó un estudio específico en la falla Cajamarca.



## **2.2 Bases Teóricas.**

Comprende los conceptos básicos de microtectónica relacionados con la geología estructural y aquellos más usados en este trabajo.

### **2.2.1 Geología estructural y microtectónica**

La geología estructural, tal como lo dicen Ramsay y Hubber (1983), ha tenido un importante desarrollo en las dos últimas décadas debido a muchas razones, una de estas es el entendimiento de que las rocas deformadas naturalmente, presentes a escala de afloramiento (mesoescala), revelan una gran cantidad de estructuras a pequeña escala (microescala), que pueden ser relacionadas directamente con los sistemas de deformación de gran escala (macroescala).

En este sentido, la microtectónica surge como un desarrollo de la geología estructural, representando al investigador una herramienta importante para la mejor comprensión espacial de las estructuras a macroescala, y de su posible historia de deformación. Aunque es importante destacar que el hecho de ser una herramienta con características específicas de trabajo restringe su uso como punto de partida para la elaboración de modelos a macroescala (modelos geodinámicos), sirve para la confirmación de los mismos, teniendo en cuenta las características geológicas del entorno de trabajo (Ramsay y Hubber, 1983).

### **2.2.2 Microtectónica**

La microtectónica es el estudio de la deformación en la escala microscópica y la escala de afloramiento, lo que agrupa a las estructuras meso y microscópicas. Otros autores la denominan como microfábrica o microestructuras de deformación.

Hobbs et al. (1981), definen el concepto de microfábrica en relación con el de fábrica, el cual incluye la configuración espacial y geométrica de todos los componentes que constituyen la roca. Sin embargo, estos autores, señalan que las microestructuras se definen como un arreglo a pequeña escala de los elementos internos de una roca, hecho producido por un proceso de deformación.

Según Mattauer (1976), la microtectónica propone estudiar la deformación a escala del afloramiento, de la muestra y de la lámina delgada, por lo tanto, la escala de trabajo es del orden del milímetro hasta la del metro. Este autor plantea, además, que en el estudio

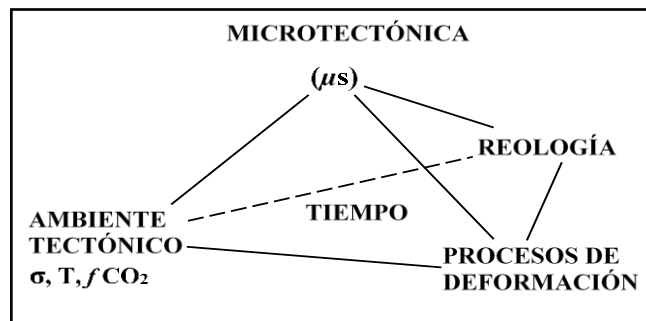
microtectónico se debe conocer o aplicar ciertos métodos en función del cambio entre las distintas escalas de observación y estudio, estos son los objetivos de la microtectónica:

- Observaciones muy detalladas a fin de comprender la deformación y todos sus mecanismos.
- Estudio y comprensión de la geometría de las estructuras.
- Determinación de las relaciones que existen entre las microestructuras y las macroestructuras.

Las microestructuras se estudian para establecer las conexiones entre los procesos y el ambiente, puesto que estos representan una función de los procesos que se desarrollan en las rocas:

$$\text{Proceso} = \text{Fuerza} \times \text{cinemática} \quad (P = F \times C)$$

Al comprender esta relación se pueden interpretar las microestructuras en términos de la historia de la temperatura (T), presión ( $\sigma$ ), la presión de CO<sub>2</sub> y otras condiciones límite (de borde) que controlan la fuerza y la cinemática (Fig. 1.) (Hancock, 1985).



**Figura 1.** Relación entre los procesos y el ambiente.

Fuente: (Hancock, 1985).

Debido a la gran cantidad de observaciones a tomar sobre superficies muy reducidas, es imposible cartografiar las estructuras, por lo cual, en el análisis microtectónico, se usan datos y métodos estadísticos debido a la gran cantidad de medidas efectuadas en el trabajo de campo. Según Mattauer (1976), la microtectónica introduce un aspecto cuantitativo en la tectónica. Asimismo, como el estudio de las microestructuras debe estar relacionado a las macroestructuras, estas deben ser conocidas con anterioridad, es decir, para el trabajo microtectónico deben ser previamente conocidos todos los datos de la tectónica de la zona

de trabajo.

Para la comprensión de la microtectónica es necesaria la definición de conceptos básicos de las deformaciones en las microestructuras, lo que unido a los conceptos generales de deformación conllevan a una comprensión general del tema.

Según Hobbs et al. (1981), existe una serie de rasgos característicos observables a través de microscopio petrográfico o de transmisión de electrones. Estos rasgos son: bordes de grano, bandas de deformación, láminas de deformación, formas de grano, inclusiones y direcciones cristalográficas preferentes. Estos autores, para estudiar la microfábrica, separan a las microestructuras de la orientación cristalográfica preferente, pues la primera trata de la forma de los granos, sus estructuras internas y la manera como se agrupan y la segunda trata específicamente de la orientación de las direcciones cristalográficas en fases específicas de la roca.

Para la comprensión de las estructuras formadas por los procesos de la deformación en las rocas se debe conocer cómo actúa esta en las redes cristalinas minerales, a continuación, se describen los principales aspectos:

### **Defectos cristalinos**

Los cristales presentes en las rocas del planeta, presentan generalmente una historia térmica y deformacional sin importar el origen. Estos procesos naturales introducen, según Hobbs et al. (1981), una serie de defectos en las estructuras de los cristales. Estos defectos se pueden clasificar en tres grupos, los puntuales, los lineales y los planos. Los defectos puntuales son los que representan vacíos de átomos en la red cristalina. Los defectos lineales o dislocaciones son líneas que separan la región deslizada de un mineral en proceso de deformación, de la región del mineral que aún no presenta deslizamiento. Los defectos planos incluyen a los bordes de grano y subgrano, bordes de bandas de deformación, láminas de deformación, fallas de apilamiento y maclas. Los bordes de subgrano son límites relativamente planos, que están contenidos en los granos, donde la desviación respecto a la orientación de la red cristalina es pequeña, esto se observa en el microscopio como dos regiones de extinción ligeramente diferentes. Los bordes de grano son límites que separan granos de orientación de red cristalina diferente o composición química distinta. Las bandas de deformación son regiones planas de los granos que han sufrido una deformación distinta a otras partes del cristal adyacentes a las mismas. Puede

ser provocado por zonas con diferente deslizamiento, característica donde se incluyen los kink, donde dos regiones adyacentes de un cristal presentan un límite abrupto.

Las fallas de apilamiento son defectos planos de una estructura cristalina donde existe un desplazamiento relativo simple de esta red.

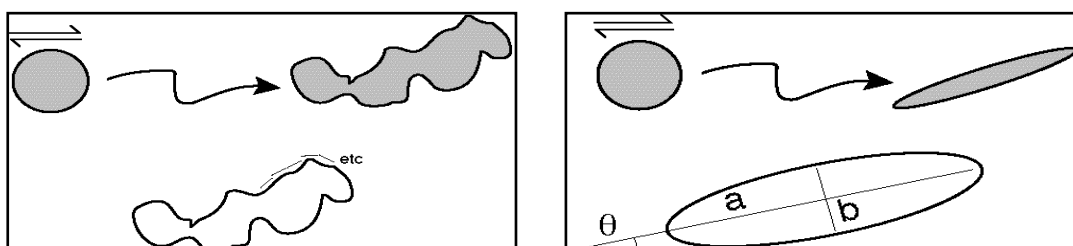
Los bordes de macla son bordes planos en los cuales se presenta una relación de simetría para la estructura cristalina, llamada relación de macla. Esta relación de simetría puede ser de reflexión o de rotación como en la albita, donde las estructuras situadas a cada lado del borde de macla están relacionadas entre sí por una rotación de  $180^\circ$  alrededor de la perpendicular a (010).

### Orientaciones cristalográficas preferentes

Son procesos por los cuales se produce una reorientación de las redes cristalinas de un mineral o un grupo de minerales debido a un proceso de deformación. Según Hobbs et al. (1981), existen dos mecanismos principales por los cuales se produce esta reorientación, estos son: por deslizamiento y rotación consiguiente, en condiciones de bajas temperaturas o velocidades de deformación altas y las desarrolladas por recrystalización, en condiciones opuestas.

### Forma de granos

El reconocimiento de microestructuras de deformación a través de la forma de grano se fundamenta en los alineamientos preferentes de granos alargados, o una orientación preferente de límites de grano. Se miden a través del eje mayor de la elongación o por la medición sistemática de pequeños segmentos del límite de grano. Este tipo de microestructura característica permite medir también los vectores principales del esfuerzo (Fig. 2.).



**Figura 2.** Forma de granos según el tipo de deformación. La primera figura muestra una deformación cualquiera la cual puede calcularse infinitesimalmente; la segunda figura muestra una deformación ideal.

Fuente: (Davies, 2002).

### Inclusiones y su relación con la foliación

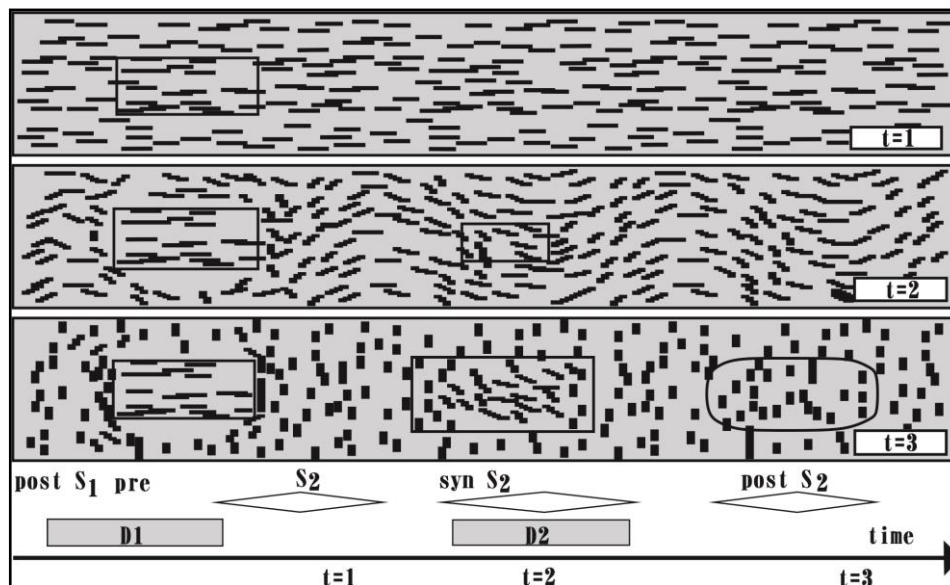
En la formación de un grano mineral metamórfico generalmente se presentan inclusiones, estas inclusiones facilitan la foliación en el proceso de deformación, lo que contribuye a una determinación del tiempo de crecimiento (fases tectónicas) en relación con esta deformación (Fig. 3.).

En la fase **pre-tectónica** el patrón de inclusiones es aleatorio, lo que indica una foliación pobre o inexistente.

En la fase **inter-tectónica** se desarrolla un patrón lineal de inclusiones de acuerdo con el desarrollo de la foliación en el exterior del grano, sin embargo, no existe relación lineal entre estas dos estructuras, son discontinuas.

En la fase **sin-tectónica** el patrón de inclusiones del grano y la foliación se hacen continuos, pero en algunos casos pueden existir diferencias angulares debidas a rotación del grano en su crecimiento.

En la **fase post-tectónica** las dos estructuras se hacen completamente continuas y no existe ninguna diferencia angular entre ellas.



**Figura 3.** Fases tectónicas en relación con las inclusiones minerales.

Fuente: (Bastida, 2004).

### Tipos de microestructuras asociadas a la deformación

Para estudiar este tipo microestructuras, se debe conocer cómo se presentan los defectos en los cristales a través de la deformación y como puede ser afectado este proceso por la historia térmica de la roca. Según Hobbs et al. (1981), estas estructuras son controladas por

la deformación de los cristales versus la velocidad de recristalización, dependiendo de la temperatura a la cual se produce el proceso.

También se presentan en relación con la historia térmica de la roca. En este sentido, cuando un grupo de rocas han sido deformadas a temperaturas relativamente bajas o velocidades de deformación altas, presentarán granos aplanados con bandas de deformación, láminas de deformación y extinción ondulatoria común, con una alta densidad de dislocaciones revelada por el microscopio electrónico. En cambio, si la deformación se produce a temperaturas más elevadas o a velocidades más bajas, donde la difusión en estado sólido se hace importante a la escala del grano, entonces se pueden producir gran cantidad de diversos procesos, como el movimiento de dislocaciones debido al esfuerzo, movimiento de bordes de grano, crecimiento de zonas de recristalización y hasta un crecimiento normal de grano; indicando que no se puede dar una aseveración precisa sobre la microestructura a formarse.

### **Microestructuras asociadas a fases frágiles y dúctiles**

Como las zonas de cizalla son superficies planas donde se desarrolla la deformación en forma de deslizamiento, están involucrados vectores de compresión y extensión, pudiéndose producir en gran número de escenarios bajo condiciones presión y temperatura dadas, así, es posible encontrar microestructuras asociadas a varios tipos de rocas. En general, las rocas producidas por deformación frágil presentes en las zonas de cizalla son las siguientes:

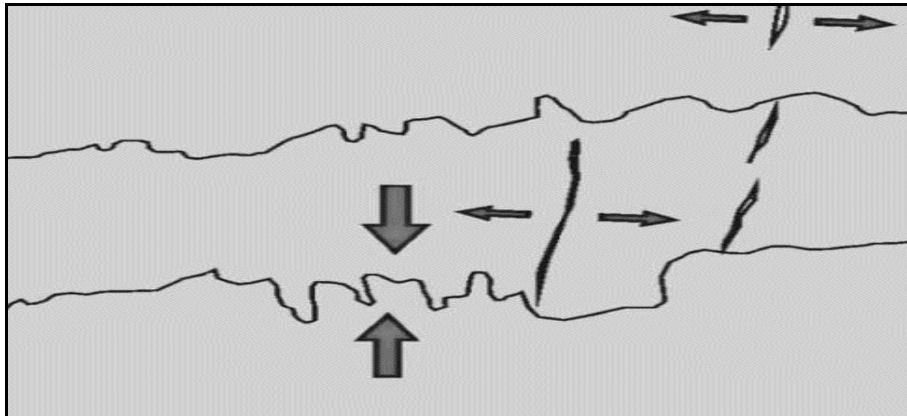
- Brechas (cohesivas / incohesivas): >30% de fragmentos angulares
- Cataclasitas (cohesivas / incohesivas): <30% de fragmentos angulares.
- Gouge: muy pocos fragmentos aislados en una matriz de grano fino.

Las microestructuras asociadas a las zonas de cizalla son:

- Planos de falla, fracturas producidas por la cizalla en una variedad de escalas de observación.
- Foliaciones o alineaciones de micas, donde se ubican inclusiones.
- Superficies pulidas (espejos de falla), estrías de falla.
- Estilolitos, los cuales indican acercamiento entre los bloques en contacto de falla.

Los estilolitos son estructuras de presión-disolución muy comunes en calizas (Fig. 4) que, en corte dan formas onduladas con picos más o menos agudos, mientras que, si se observan

en 3D, el aspecto es de conos muy apretados. La medida de la orientación de estos picos, nos proporciona directamente la dirección de acortamiento, que normalmente coincide con los ejes principales compresivos del tensor de esfuerzos de cizalla producirán algún tipo de deslizamiento, con lo que se forman estilolitos (o estilolitos-estrías). Si los picos no son perpendiculares al plano que los contiene los esfuerzos tienen la misma dirección de estos picos (Gómez, 2010).



**Figura 4.** Formación de estilolitos a consecuencia de esfuerzos compresivos.  
Fuente: (Gómez, 2010).

- Vetas minerales.
- Milonitas, rocas producidas por deformación dúctil, las cuales pueden encontrarse en las zonas de cizalla; son de grano fino, presentan buena foliación y contienen remanentes de protolitos. Ocurren predominantemente por relativamente altos a extremos regímenes de esfuerzos de cizalla simple. Las milonitas se clasifican como:
  - 10-50% de matriz: protomilonita.
  - 50-90% de matriz: mesomilonita.
  - >90% matriz: ultramilonita.

Existen múltiples métodos de análisis estructural de la deformación frágil. Ellos pueden agruparse en dos tipos: los que reconstruyen las direcciones de stress principales y los que reconstruyen las direcciones del esfuerzo. En el presente capítulo se analizan un método del primer grupo y un método del segundo grupo. Pero primero es necesario estudiar los indicadores cinemáticos en fallas y su aplicación al estudio estructural de las mismas en terreno (Jasso, 2007).

### **Indicadores cinemáticos**

Los indicadores cinemáticos son rasgos de origen tectónico que permiten determinar el sentido del desplazamiento en zonas de cizalle y fallas. Estos rasgos son visibles desde escala microscópica hasta megascópica.

Como fundamento del origen de los indicadores cinemáticos, se asume que el conjunto de fallas generadas bajo un mismo estado de esfuerzos (falla maestra o principal y fallas secundarias de una estación estructural o región) deben reunir las relaciones angulares que se muestran en la Figura 5. En tal circunstancia se dice que las fallas tienen compatibilidad cinemática; si hubiera planos de falla con orientación incompatible, éstos serían interpretados como fallas generadas bajo un estado de esfuerzos distinto o bien por rotación de las estructuras.

En la generación de planos de falla, la evidencia más notable de desplazamiento entre bloques es la del elemento estriador que imprime en el plano de la falla la dirección de movimiento relativo entre ellos, las estrías así formadas constituyen el primer indicador cinemático empleado. Dentro del conjunto de fallas compatibles destaca la falla maestra (M) que funge como el plano de referencia para las relaciones angulares; a  $45^\circ$  de la falla maestra se generan las fracturas de tensión (T), un par de fallas conocidas como fallas de Riedel (R-R'), se generan en pares conjugados con un ángulo de  $60^\circ$  entre sí, y con ángulo de  $15^\circ$  (R) y  $75^\circ$  (R') con respecto a la falla maestra. Las fallas T, R y R' están orientadas con un ángulo agudo en el sentido de movimiento de la falla maestra. El tercer grupo de fallas secundarias son las fallas P, con bajo ángulo respecto a la falla maestra e inclinación opuesta a su sentido de movimiento (Petit, 1987).

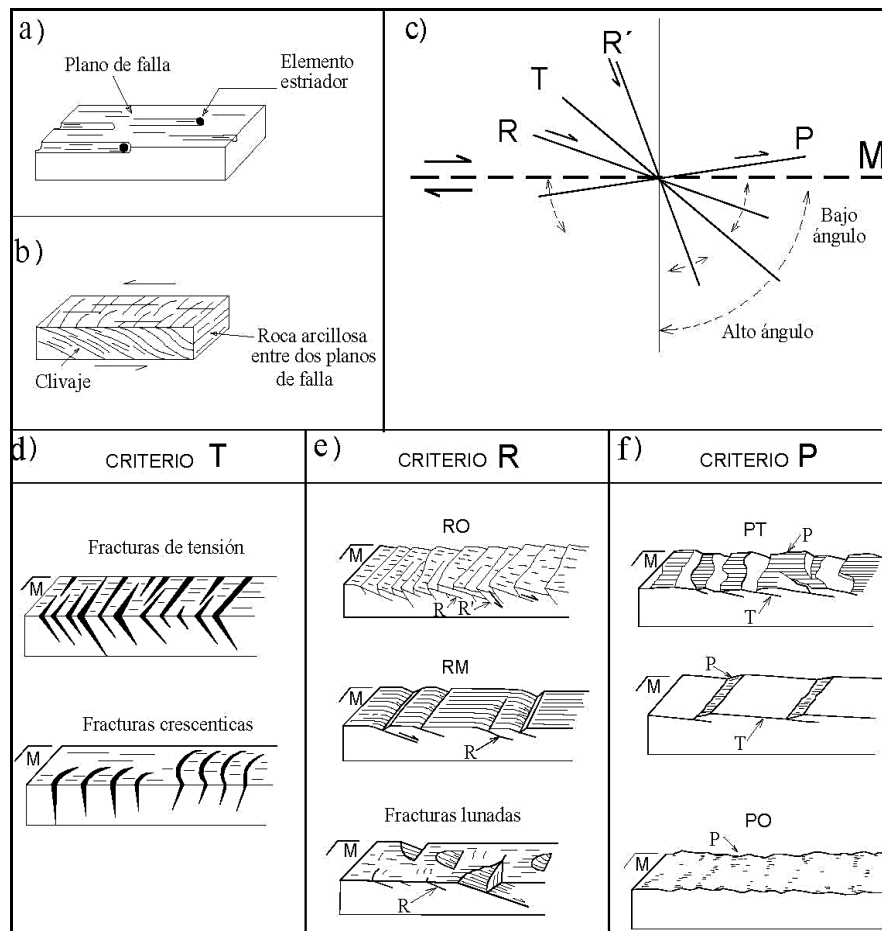
A partir de las fallas y fracturas secundarias surgen criterios para evaluar el sentido de desplazamiento de la falla maestra. Las fracturas de tensión no tienen estrías. Las fallas estriadas R son fallas sintéticas o de bajo ángulo, las fallas estriadas R' son fallas antitéticas o de alto ángulo. Las fallas estriadas P son de bajo ángulo y su relación con las fallas R permite distinguir morfologías importantes en la superficie de los planos de falla.



Se tienen tres criterios principales:

El criterio T, emplea fracturas de tensión, probablemente generadas por intemperismo mecánico y más antiguas que la falla M. Estas fracturas buzan en dirección del movimiento de la falla maestra.

El criterio R se aplica si las fallas estriadas R y R' se observan sobre el plano de falla principal formando escalones contrarios a la dirección de movimiento del bloque faltante (criterio RO), estos escalones que encaran al movimiento del bloque opuesto se denominan incongruentes. En los casos donde estos escalones están pulidos generalmente corresponden con el criterio PT (Petit, 1987).



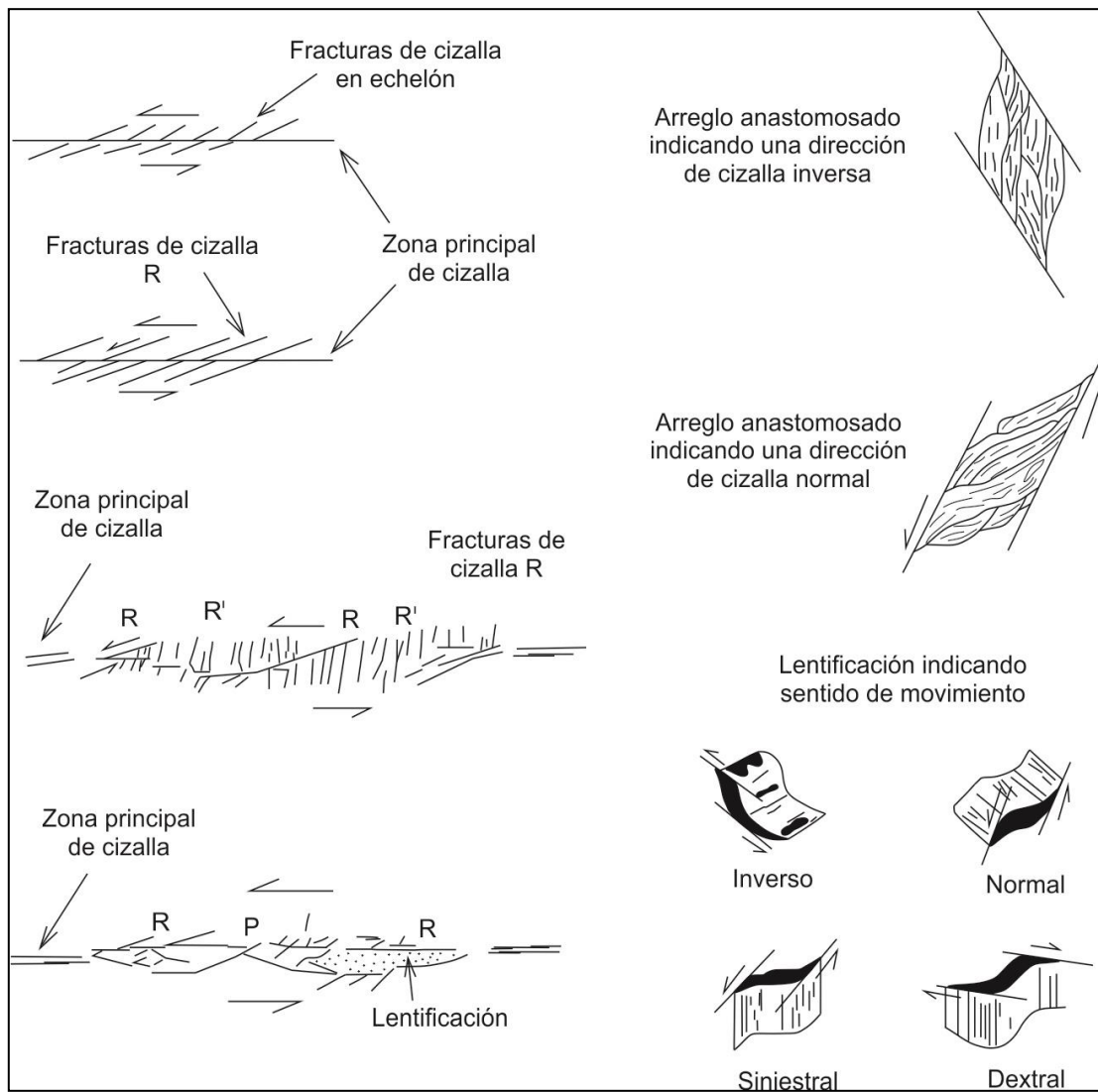
**Figura 5.** a) Relaciones angulares entre las fallas maestra, secundarias y grietas de tensión. b) clivaje de falla desarrollado entre dos planos de falla. c), d), e) y f) criterios de indicadores cinemáticos.

Fuente: (Petit, 1987).

Si el plano de falla principal está completamente estriado el criterio se denomina RM y los escalones formados no encaran al bloque opuesto denominándose escalones congruentes en los que tiene lugar crecimiento de mineral estriado. También dentro del criterio R se encuentran las estructuras lunadas cuyo lado curvo indica el sentido de movimiento del bloque que la contiene.

El criterio P, comúnmente se emplea en combinación con grietas de tensión no estriadas y se da por la alternancia de planos, uno estriado y uno sin estrías, que generan escalones incongruentes estriados o congruentes con crecimiento de mineral estriado (Fig. 5). La letra O se emplea si en el plano se observan ya sea las fallas R o las P.

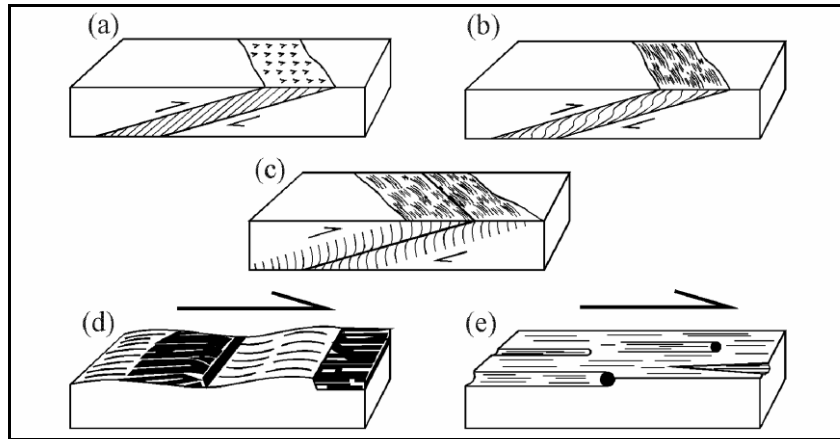
El progreso de la deformación en la zona de falla comprendida entre dos planos principales de falla, genera la rotación de las fallas R, R' y P, formando lentificación (Fig. 5) un progreso mayor de la deformación genera la imbricación de sigmoides (dúplex) hasta desarrollar un arreglo anastomosado de sigmoides que indican un estado avanzado de la deformación. Esta rotación de estructuras complica la aplicación de las técnicas para la determinación de las direcciones de acortamiento-extensión o de los esfuerzos principales, ya que se pierden las relaciones angulares originales y se enmascaran las direcciones de los ejes principales de deformación. Los arreglos paralelos e inclinados de las fracturas de tensión y fallas R-R', se identifican como estructuras en échelon, si éstas tienen una inclinación en sentido horario la falla principal es antihoraria o siniestral, en el caso contrario, arreglos en échelon inclinadas en sentido anti horario, indican una falla principal horaria o diestra (Fig. 6) (Mercier y Vergely, 1992).



**Figura 6.** Formación de lentes o estructuras sigmoidales por la rotación de fallas secundarias R, R' y P.

Fuente: (Mercier y Vergely, 1992).

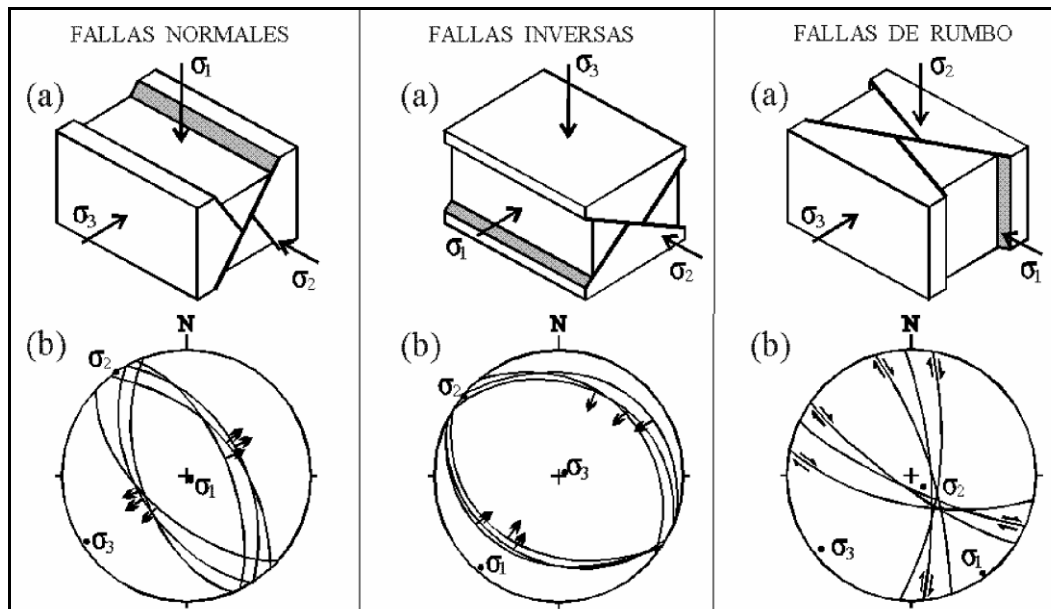
Existen algunos criterios adicionales tales como mineral fibroso relleno una falla en forma oblicua, la formación de fábrica S en salbanda, desarrollo de clivaje en rocas carbonatadas, fibras de crecimiento y marcas de abrasión debidas a clastos (fig. 7).



**Figura 7.** Algunos criterios cinemáticos adicionales en fallas frágiles. (a) Fibras de relleno. (b) Fábrica sigmoidal en salbanda. (c) Clivaje en rocas carbonatadas. (d) Saltos rellenos con material fibroso. (e) Marcas de clastos.  
Fuente: (Petit, 1987).

### Método de Anderson

Anderson (1905), realizó a comienzos del siglo XX la clasificación dinámica de planos de rotura basada en el posicionamiento de tres vectores principales de esfuerzos, estos vectores son ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ), son ortogonales entre sí, cumpliendo el requisito general de:  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Dependiendo de las posiciones de estos vectores se definen de los tres tipos de fallas principales: normal ( $\sigma_1$  vertical,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  horizontal), transcurrente ( $\sigma_2$  vertical,  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  horizontal), inversa ( $\sigma_3$  vertical,  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  horizontal) (Laurent, 1987).

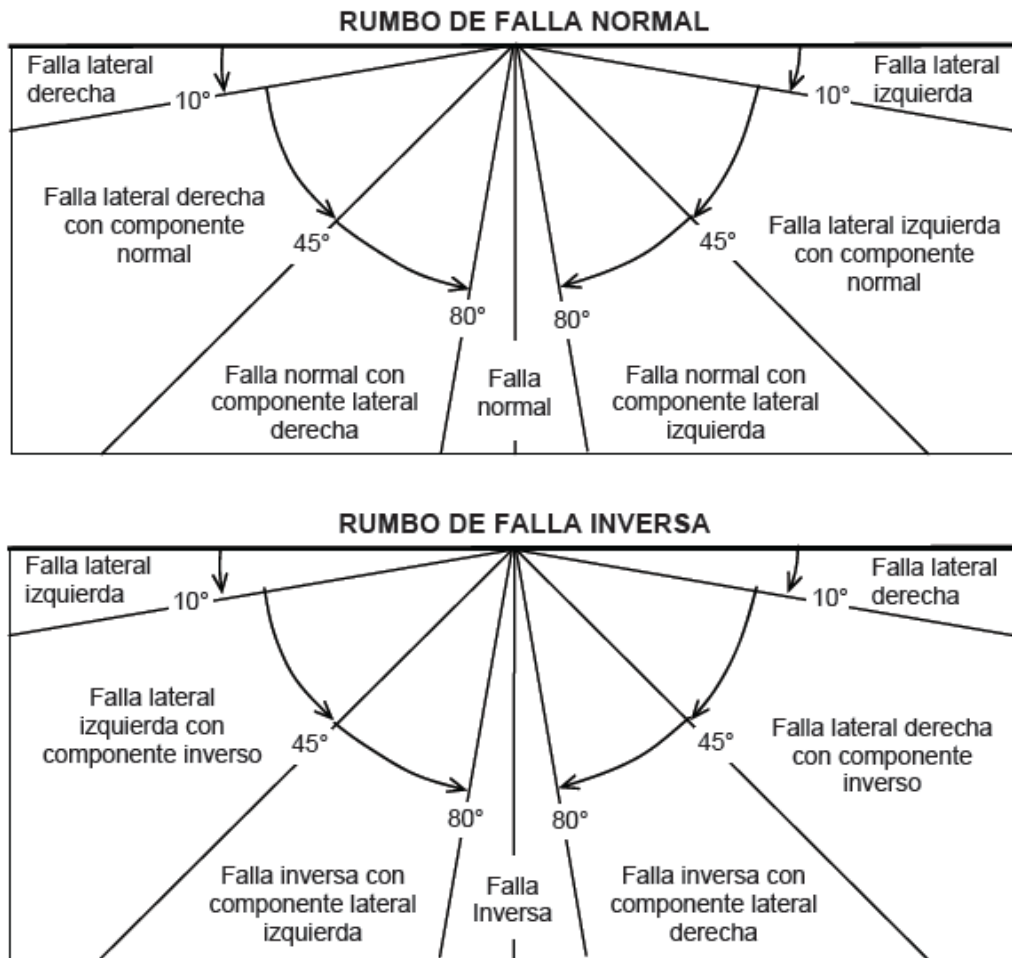


**Figura 8.** Tres tipos de fallas: normal, de rumbo e inversa. (a) Fallas conjugadas y orientación de los stresses principales. (b) Representación de sistemas de fallas conjugadas en Red de Schmidt, hemisferio inferior. Las flechas indican el sentido de los rechazos.  
Fuente: (Laurent, 1987).

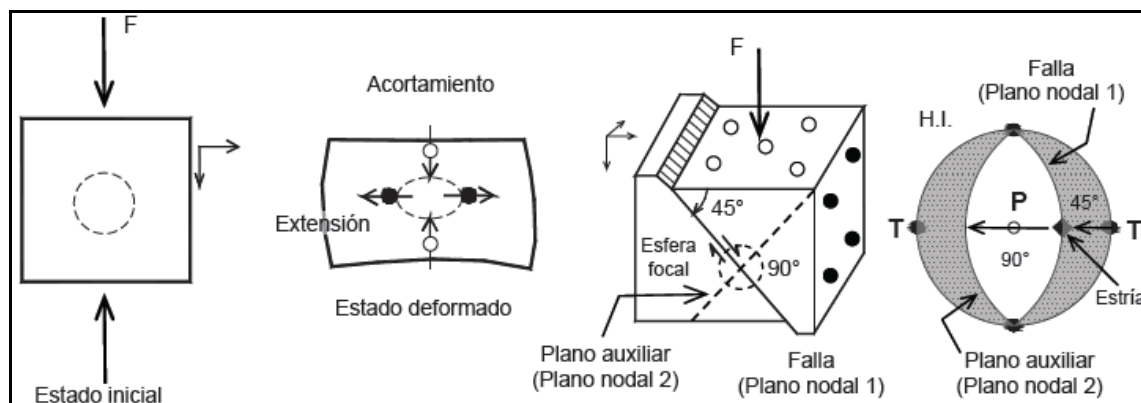
### **Método diedros rectos**

La nomenclatura utilizada para clasificar las fallas se basa en el ángulo del pitch que tienen las estrías sobre el plano de falla de acuerdo a la zonificación que se ilustra en la figura 10, de esta forma se define si una falla es de movimiento lateral (pitch  $<10^\circ$ ), lateral con componente normal (pitch de  $10^\circ$  a  $45^\circ$ ), normal con componente lateral (pitch de  $45^\circ$  a  $80^\circ$ ) o netamente normal (pitch  $>80^\circ$ ). Asimismo, para el caso de fallas inversas las fallas serán de movimiento lateral (pitch  $<10^\circ$ ), lateral con componente inverso (pitch de  $10^\circ$  a  $45^\circ$ ), inversa con componente lateral (pitch de  $45^\circ$  a  $80^\circ$ ) o netamente inversa (pitch  $>80^\circ$ ).

Los datos de los planos de falla y de los pitch medidos en cada estación estructural se procesaron mediante el método FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991), dicho método consiste en un análisis cinemático de una población de fallas que genera gráficas de P&T (presión-tensión) con un principio similar a las gráficas de mecanismo focal utilizados en sismología. El nombre de la gráfica P&T alude a términos de esfuerzo, sin embargo, la construcción de la gráfica de mecanismo focal o P&T se realiza con base en criterios de deformación. Infinidad de pruebas de laboratorio con especímenes de roca sometidos a prueba de compresión con una fuerza aplicada en dirección vertical (Fig. 10) han demostrado la deformación de la roca mediante acortamiento en sentido vertical y alargamiento en el sentido horizontal, sobre todo considerando un círculo dentro del espécimen que se deforma a elipse durante la prueba; el progreso de la prueba hasta provocar el rompimiento de la roca evidenció la formación sistemática de microfallas a un ángulo de  $30^\circ$  a  $45^\circ$  con respecto a la aplicación de la fuerza F (Páez, 2010).



**Figura 9.** Criterios para la nomenclatura de fallas con base en el ángulo del pitch de las estrías.  
Fuente: (Páez, 2010).



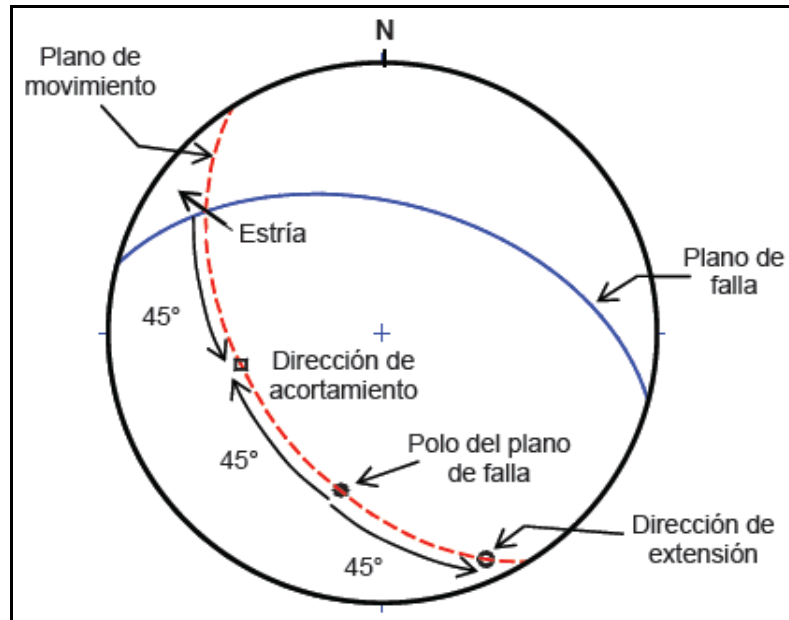
**Figura 10.** Deformación de una muestra de roca, indicando ejes de extensión y acortamiento, la posterior formación de un plano de falla con un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a la fuerza  $F$  constituye el plano nodal 1, a  $90^\circ$  se grafica un plano auxiliar que constituye el segundo plano nodal, los planos nodales definen los campos de extensión (T) y acortamiento (P).  
Fuente: (Cox y Bryan, 1986).

Extrapolando esta condición a un modelo se generan dos planos perpendiculares entre sí denominados nodales que delimitan campos de acortamiento y extensión originados por el movimiento en los planos de falla, en estos campos las direcciones de máxima extensión y acortamiento son las líneas bisectrices a los planos nodales.

La aplicación del modelo de mecanismo focal a una falla, requiere conocer los planos nodales y el plano de movimiento de la falla sobre el que se debieron llevar a cabo las direcciones de máximo acortamiento y extensión, el plano de la falla constituye el primer plano nodal y el segundo plano nodal se genera tomando a la estría del plano de falla, representada por el pitch, como el polo de dicho plano nodal. La estría constituye el indicador cinemático del desplazamiento de la falla, por lo que se utiliza para generar el plano de movimiento junto con el polo del plano de la falla. Las direcciones de máximo acortamiento y extensión se localizan sobre el plano de movimiento de la falla a  $45^\circ$  de los planos nodales (o a  $45^\circ$  a ambos lados de la estría), con ayuda de una esfera focal conceptualmente ubicada en la intersección de los planos nodales y las direcciones de desplazamiento de la falla, se definen los cuadrantes donde operan la extensión (T) y el acortamiento (P) (Figura 10.). Construida así la gráfica, los ejes P y T son equivalentes a los vectores de desplazamiento de esa falla por lo que dichos ejes son fundamentalmente de naturaleza cinemática y representan los ejes principales del tensor de deformación incremental de la falla. Es importante destacar que este método se basa en el indicador cinemático que constituye la estría y el plano de falla que la contiene, de tal forma que el proceso de estos elementos estructurales que constituyen una deformación proporcionar un resultado en términos de esfuerzo. Con base en esta conclusión se toma como adecuado el método de Allmendinger para el análisis estructural de las fallas identificadas en la región que proporcionan resultados en términos de deformación (Laurent, 1987).

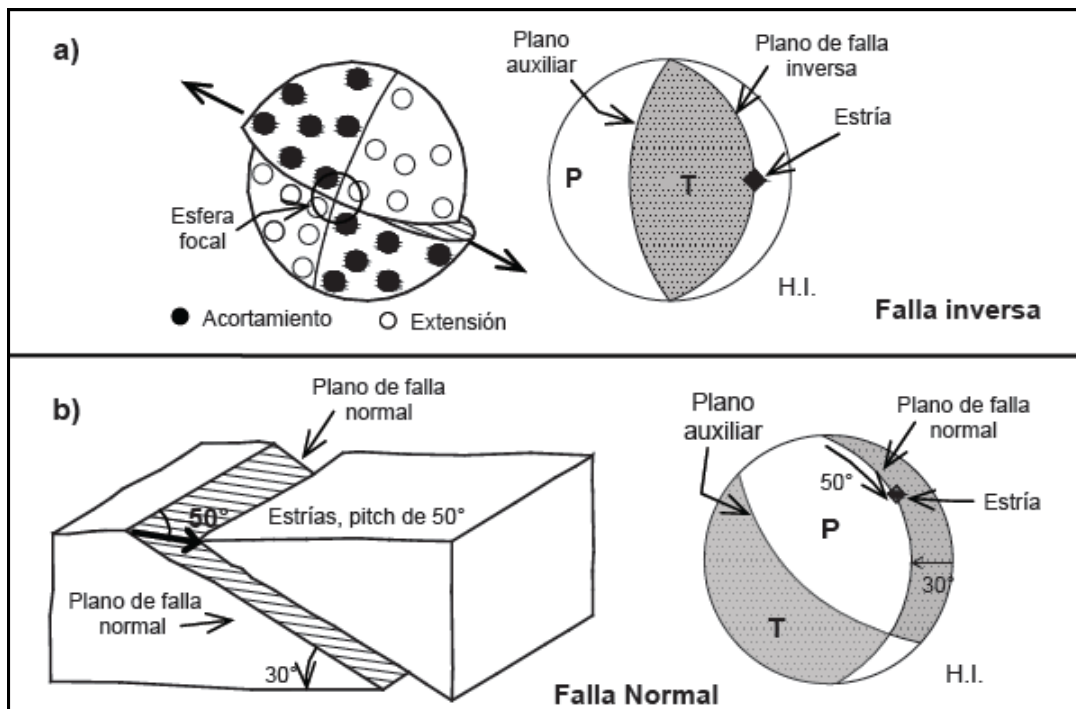
La metodología de Marret y Allmendinger para obtener las direcciones principales de distorsión consiste en trazar en la red estereográfica la ciclográfica del plano de la falla (Fig. 11), también se grafican el polo y la estría, la ciclográfica que une estos dos elementos define el plano de movimiento de la falla. Para el caso de una falla normal, sobre el plano de movimiento entre el polo de la falla y la estría (a  $45^\circ$  de ambos), se ubica la posición del eje P o dirección de acortamiento y a  $45^\circ$  del polo, en el otro cuadrante, el eje T o dirección de extensión. La posición de los ejes de acortamiento P y extensión T, se invierten en el caso de una falla inversa (Fig. 12).

Los datos de fallas y de los pitch de estrías fueron procesados en el software stereonet, módulo FaultKin, versión 1.2 de Allmendinger. La alimentación de datos al software consistió en la captura del número de estación estructural, fecha, nombre de la localidad, unidades litológicas en el bloque superior e inferior y estratificación si existe. Los datos de la falla que se ingresaron fueron: rumbo en valor azimutal, el valor del echado y el cuadrante de buzamiento; en otro campo se indicó el tipo de dato de la estría en este caso el pitch, el valor del ángulo y el tipo de deslizamiento: derecho, izquierdo, normal o inverso. La alimentación de datos del echado de las capas en el bloque del bajo induce una corrección gráfica. También se pueden indicar datos adicionales como espesor de tipo de falla y desplazamiento de la falla. El software genera una gráfica en la falsilla estereográfica (Schmidt) con las ciclográficas de los planos de falla y las estrías, en la selección del tipo de gráfica se generan las gráficas del mecanismo focal P&T, obteniéndose las direcciones principales de deformación por extensión, acortamiento e intermedia. Estas direcciones son resultado de un conteo estadístico de los puntos de acortamiento y extensión que se grafican para cada plano de falla (Páez, 2010).



**Figura 11.** Metodología de Allmendinger. Determinación de las direcciones de acortamiento y extensión para el caso de una falla normal con componente lateral.  
Fuente: (Páez, 2010).





**Figura 12.** Construcción de la gráfica de mecanismo focal (P&T), típica de falla inversa utilizando la esfera focal, con la definición de los campos de extensión (T) y acortamiento (P). En la figura b) se ilustra la gráfica típica de falla normal con componente lateral indicada por las estrías.  
Fuente: (Cox y Bryan, 1986).

### 2.3 Definición de términos básicos

**Microtectónica.** La microtectónica es el estudio de la deformación en la escala microscópica y la escala de afloramiento, lo que agrupa a las estructuras meso y microscópicas. Otros autores la denominan como microfábrica o microestructuras de deformación (Subieta y Delair, 1984).

**Esfuerzo.** - Son las fuerzas que, aplicadas al cuerpo o cuerpos, darán como resultado su deformación, ya sea esta elástica, frágil o dúctil; lo cual depende de la cantidad de la fuerza (o magnitud), el tiempo, y las condiciones físicas del entorno en el cual son aplicadas estas fuerzas (Subieta y Delair, 1984).

**Pliegues.** - Estas estructuras pertenecen a la deformación continua heterogénea se manifiestan por una sucesión de curvas de una superficie de referencia, la cual puede ser un espejo de falla, una foliación, entre otras (Mercier y Vergely, 2001).

**Falla.** - Una falla geológica es una fractura en la corteza terrestre a lo largo de la cual se mueven los bloques rocosos que son separados por ella (Mercier y Vergely, 2001).

**Estrías.** - Son irregularidades rectilíneas que pueden aparecer en algunos planos de falla. Indican la dirección del movimiento de la falla (Mercier y Vergely, 1992).

**Foliación.** - es la deformación de minerales de composición de una roca, producto de deformación dúctil por esfuerzos tectónicos (Mercier y Vergely, 1992).

## CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Ubicación

Políticamente corresponde al Departamento y Provincia de Cajamarca, Distrito de Llacanora, ubicada al SE de la ciudad de Cajamarca a 8 km. aproximadamente del Distrito de Los Baños del Inca. Presenta un área de 300 Has, comprendidas geográficamente entre las siguientes coordenadas en el sistema de proyección UTM y Datum WGS-84:

**Tabla 1.** Coordenadas UTM del área.

Vértice	Coordenadas UTM	
	Latitud	Longitud
1	9205500	782500
2	9205500	784500
3	9204000	784500
4	9204000	782500

#### 3.1.1 Accesibilidad.

Cuenta con dos vías de accesos interprovincial asfaltadas, que comunican con la ciudad de Cajamarca; la primera vía inicial en la ciudad de Cajamarca tomando la carretera con dirección al Distrito de Jesús hasta el Complejo Iscoconga donde se toma un desvío hacia el pueblo de Llacanora, la segunda vía igualmente parte de la ciudad de Cajamarca con destino al Distrito de Los Baños del Inca para luego tomar la carretera hacia el poblado de Llacanora.

**Tabla 2.** Vías de acceso al área de investigación.

TRAMO	TIPO	TIEMPO
Cajamarca – Iscoconga – Llacanora	Asfaltado	30 minutos
Cajamarca – Baños del Inca – Llacanora	Asfaltado	20 minutos

## **3.2 Clima y Vegetación**

### **Clima**

En la ciudad de Cajamarca y alrededores el clima es seco, templado y soleado durante el día. La temperatura anual es de 13° C (máxima media 21. 4° C y mínima media 6° C). Las estaciones lluviosas son de diciembre a marzo. La precipitación se puede estimar entre 1000 a 1280 milímetros al año, diferenciándose una estación seca (junio- octubre) y lluviosa (noviembre- abril). La temperatura esta alrededor de 10°C en promedio aun cuando en épocas secas la temperatura desciende a menos 4° C sobre todo en las madrugadas.

La humedad en las épocas de lluvia generalmente está cubierta de neblina a partir de las 3 y 4 de la tarde. La humedad relativa es muy baja en la época de sequía (junio- setiembre) pudiendo ser en algunos casos menos del 30%. Muy altas en épocas de lluvia pudiendo llegar hasta 98% cuando la neblina es permanente (Boñon, 2012). El conocer las características climáticas fue fundamental para programar las salidas de campo.

### **Vegetación**

El presentar un clima templado, favorece el cultivo y se caracteriza por presentar suelos aptos para la agricultura, de maíz, papa, trigo, cebada, arvejas, maíz, y alfalfa, teniendo vegetación arbórea del tipo, sauce, eucalipto, pinos, ciprés (Boñon, 2012).

## **3.3 Geografía**

Las formas geográficas del área de estudio corresponden a la zona norte de la Cordillera Occidental cuya topografía esta disecada por el Río Chonta. Posee alturas que oscilan entre los 2620 y 3350 m.s.n.m. y que correspondería a la región natural denominada Quechua, según su clasificación por altitud. Las pendientes están comprendidas entre 0 a 45%.

## **3.4 Unidades Geomorfológicas**

### **3.4.1 Valle**

Este valle abarca gran parte del área de estudio, Se ubica en la vertiente del río chonta, Está controlada por la falla Cajamarca.



**Foto 1.** Valle en U cerca del centro poblado de Llacanora.

En el área de estudio se han observado un tipo de superficie de erosión que está controlado por la composición de los macizos rocosos. Presenta colinas de pendientes medias a abruptas. Esta superficie de erosión se ha formado sobre rocas de composición clástica que poseen formas medias abruptas a diferencia en la parte inferior formas suaves debido a la composición de las rocas que son más susceptibles a los agentes de erosión.



**Foto 2.** Superficie de erosión en rocas areniscas de la Formación Farrat y Carhuáz.

### **3.5 Geología Local**

En la zona de estudio afloran unidades litológicas sedimentarias del período Cretácico inferior. En la parte inferior está representada por la Formación Carhuáz (Ki-ca), que consta de una secuencia de niveles de areniscas, limolitas y lutitas, así mismo en la parte superior está la Formación Farrat (Ki-fa) que consta de secuencia de areniscas cuarzosas, ambas unidades son de un ambiente marino transicional.

### 3.5.1 Grupo Goyllarisquizga

#### 3.5.1.1 Formación Carhuáz (Ki-ca)

Esta unidad estratigráfica fue descrita por Benavides, en el año 1956 en su localidad típica situada en Carhuáz, Callejón de Huaylas. En el área de estudio La Formación Carhuáz está compuesta por una alternancia lutitas grises, limolitas amarillentas y areniscas de grano fino a grano medio conforme ocurre el paso transicional hacia la Formación Farrat, presenta un espesor aproximado de 500m.

**Edad y Correlación.** Según los estudios realizados Quispe y Lagos, en el 2008 reportan que se han identificado la siguiente flora fósil. *Weichselia peruviana* Zeiller y *Pelcurdia* sp, que indica una edad Valanginiano– Hauteriviano (Aldana, 2008).



**Foto 3.** Afloramiento de la Formación Carhuáz en el acceso Los Baños del Inca – Llacanora

#### 3.5.1.2 Formación Farrat (Ki-fa).

Formación Farrat (Ki-fa). Su localidad tipo es la hacienda Farrat, donde tiene un grosor de 500 m. En el área de estudio se muestran en estratos delgados en la base y gruesos al tope. Consiste en areniscas de grano medio a grueso, cuarzosas y en algunos lugares presenta estratificación sesgada, por sus características de composición son resistentes a procesos de erosión por lo tanto casi siempre se presentan como formas de relieve positivo.

**Edad y Correlación.** Se le asigna una edad Aptiana Inferior según Reyes (1980).

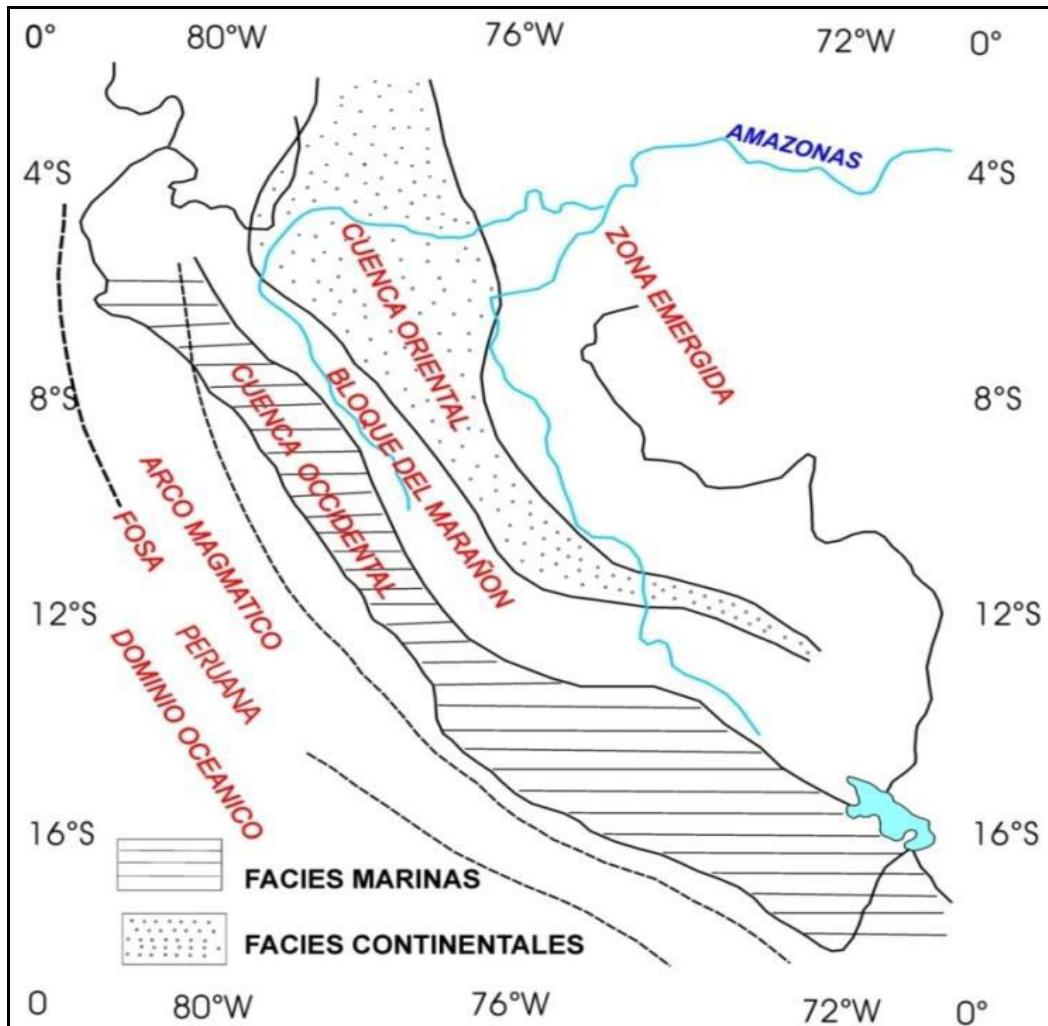


**Foto 4.** Afloramiento de areniscas cuarzosas de la Formación Farrat, en la zona de Callacpuma.

### **3.6 Geología Estructural**

#### **3.6.1 Generalidades**

En los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos, Bolívar y en otros aledaños, hay evidencias de cuatro etapas de deformación que se iniciaron en el Cretácico terminal y que continúan durante el Paleógeno- Neógeno, todos ellos correspondientes al Ciclo Andino (Fig. 13). Regionalmente, todo parece indicar que los movimientos tectónicos, en algunos sectores han sido de mayor intensidad que en otros, según Reyes (1980). El bloque del Marañón empezó a emerger a fines del Jurásico Superior (MALM) como respuesta a movimientos epirogenéticos configurando una cuenca al Oeste y una al Este (Benavides 1956 y Wilson, 1963).



**Figura 13.** Mapa Paleogeográfico del Perú durante el Jurásico superior (MALM), donde se observa la configuración de dos cuencas una Occidental y otra Oriental.

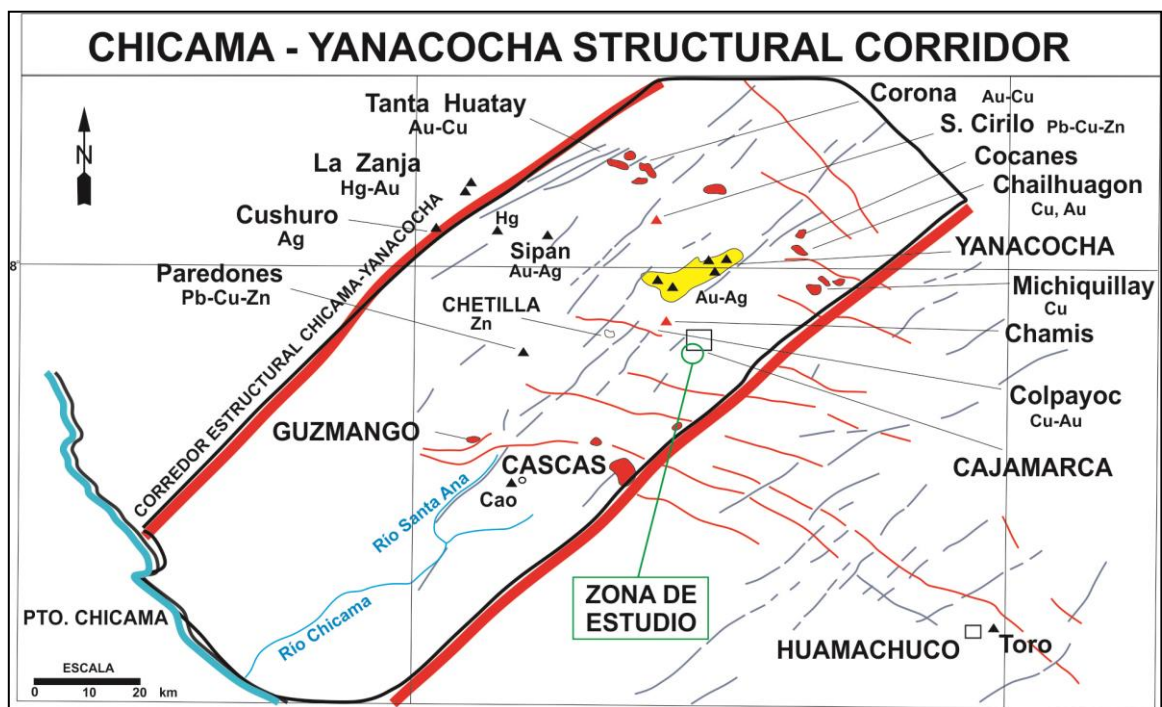
Fuente: (Dalmayrac, et al 1978).

A fines del Berriasiano – Valanginiano hasta el Aptiano la cuenca Occidental experimentó una emersión con leve intermitencia (Formación Santa). Desde el Aptiano superior hasta el Santoniano se inicia la transgresión marina originando el relleno del material calcáreo en esta cuenca.

### 3.6.2 Corredor Estructural Chicama- Yanacocha

El corredor estructural Chicama- Yanacocha corresponde a una Franja de 30 a 40 km. de ancho, de por lo menos 200 km. de largo que se inicia en el Río y Puerto de Chicama y que se extiende en dirección N 40°, pasando por Guzmango, Contumazá, Cajamarca, La Encañada, Yanacocha y Hualgayoc. En él se presentan fallas transversales al rumbo andino, eventos magmáticos, alteración hidrotermal y mineralización metálica alineados en la misma dirección.





**Figura 14.** Corredor Estructural Chicama Yanacocha, cerca del cual se encuentra la zona de estudio.

Fuente: (Quiroz, 2007).

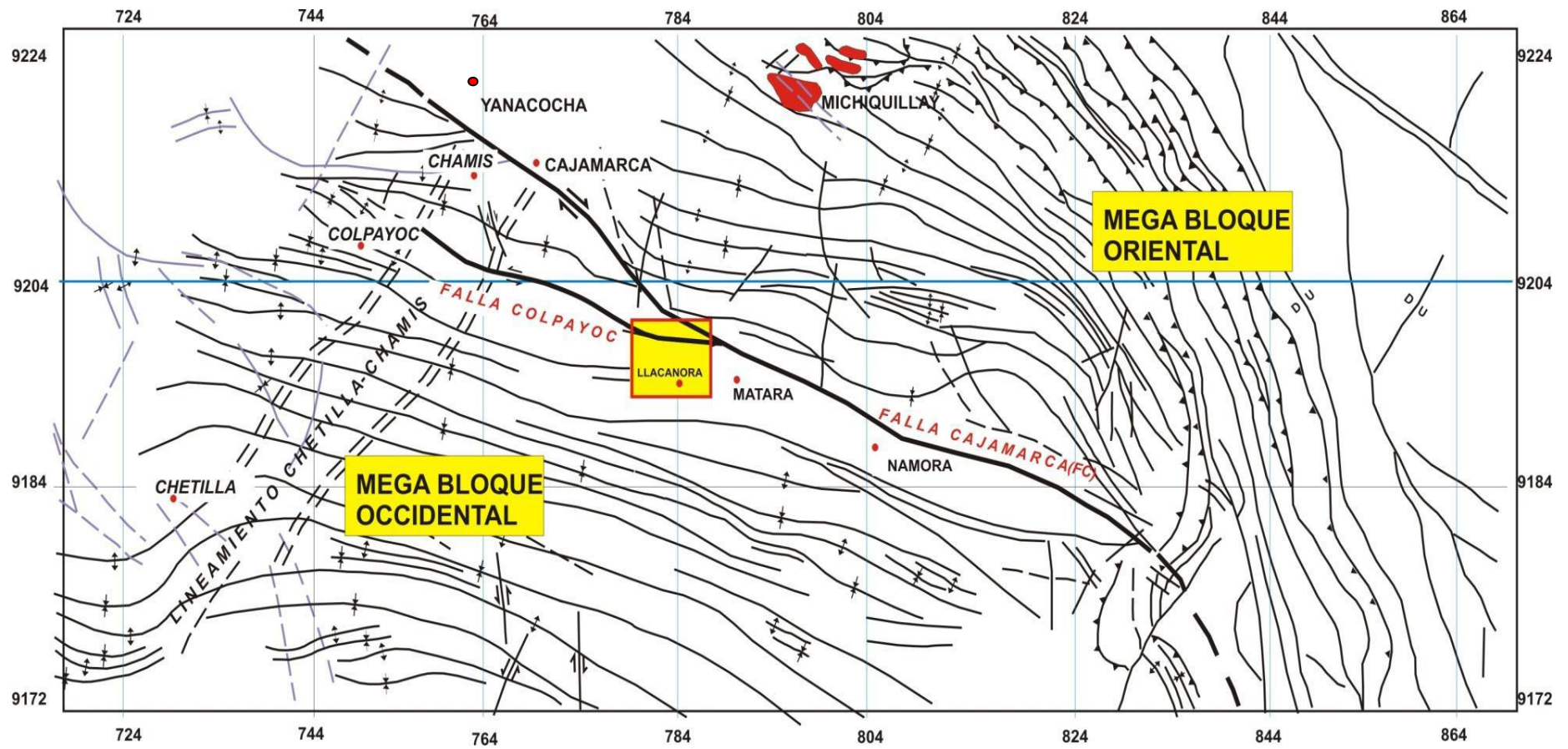
### 3.6.3 Interpretación estructural regional

Al realizar el empalme estructural de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Bolívar (Lagos et al, 2011), se determinó dos Mega Bloques, uno Occidental y el otro Oriental, separados por la Falla Cajamarca (FC) de orientación NW- SE y con movimiento direccional dextral. El Mega Bloque Occidental se caracteriza por contener pliegues kilométricos, amplios, mientras que el Oriental por pliegues copilados, fallas inversas y sobrescurrimientos. El Mega bloque oriental colisionó con el alto del Marañón, debido a esfuerzos compresivos de la fase Tectónica Inca (Paleógeno- Neógeno) como consecuencia de la subducción de las Placas de Nazca y Continental, esta subducción generó acortamiento cortical horizontal y engrosamiento cortical vertical. Los controles de campo indican que el comportamiento de la Falla Cajamarca (FC) ha sido inversa direccional dextral. Este movimiento dextrógiro generó que el flanco sur del Anticlinal de Los Baños del Inca se deforme cambiando el ángulo de buzamiento hasta 80° produciéndose el típico pliegue de arrastre.

Por otro lado, el análisis de campo muestra que al tiempo de generarse el movimiento dextral, los terrenos donde se ubican las localidades de Llacanora, Shaullo Chico, Shaullo Grande y Los Baños del Inca, experimentaron un giro de aproximadamente 40° al NW

produciéndose una inflexión probablemente como consecuencia de reactivación de fallas preexistentes profundas (Fig.15).

Este movimiento de desgarre dextral genero a su vez el relegamiento de las areniscas cuarzosas de la Formación Farrat, principalmente en el flanco sur del anticlinal de Los Baños del Inca, tal como se observa en la Fig. 15.



**Figura 15.** Corredor Estructural Chicama Yanacocha cerca del cual se encuentra la zona de trabajo.  
 Fuente: (Quiroz, 2007).

### 3.7 Procedimiento

#### 3.7.1 Métodos y Materiales

La investigación se realizó en cuatro etapas:

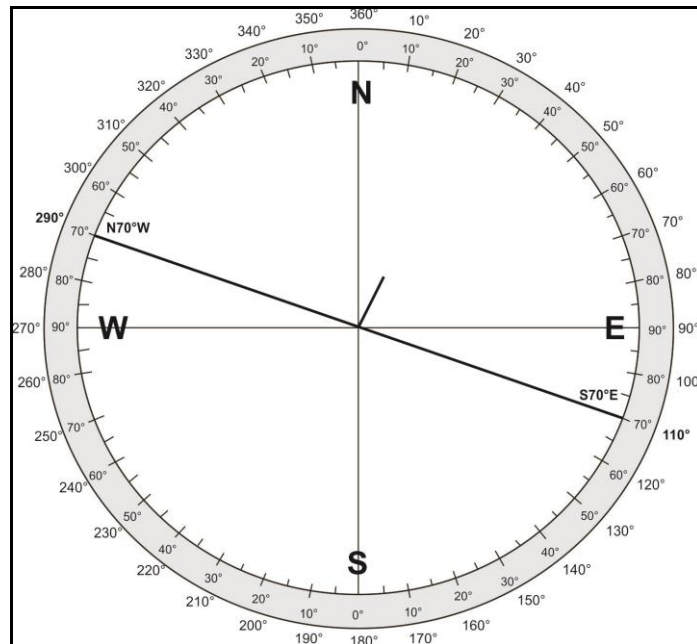
##### 3.7.1.1 Etapa I

###### Gabinete

Es una etapa de investigación, consistió en recopilación de información existente de algunos estudios realizados en el área, revisión de bibliografía de microtectónica, indicadores cinemáticos de fallas, cálculo de esfuerzos a través de estos indicadores, así mismo se definió la metodología a realizar en campo para la recopilación de datos, tomado en cuenta el siguiente método.

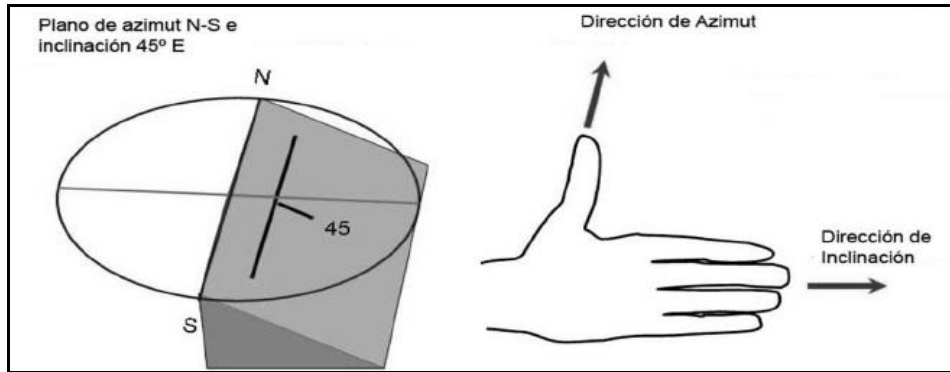
###### Método regla de la mano derecha

Como las orientaciones son NO-DIRECCIONALES, los planos se pueden describir por dos diferentes rumbos, es decir:



**Figura 16.** Gráfico de conversión de datos.

El método de la regla de la mano derecha da como resultado un solo valor de orientación. La dirección de los dedos indica el Buzamiento, y la dirección del pulgar, indica la dirección del rumbo:



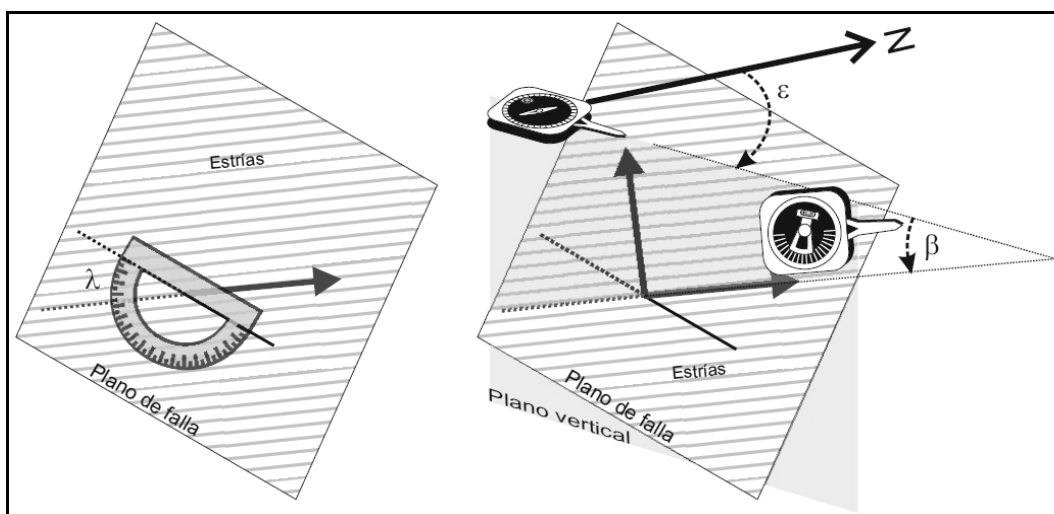
**Figura 17.** Método de la regla de la mano derecha.  
Fuente: (Casas, 1990).

### Orientación de las características lineales de indicadores cinemáticos

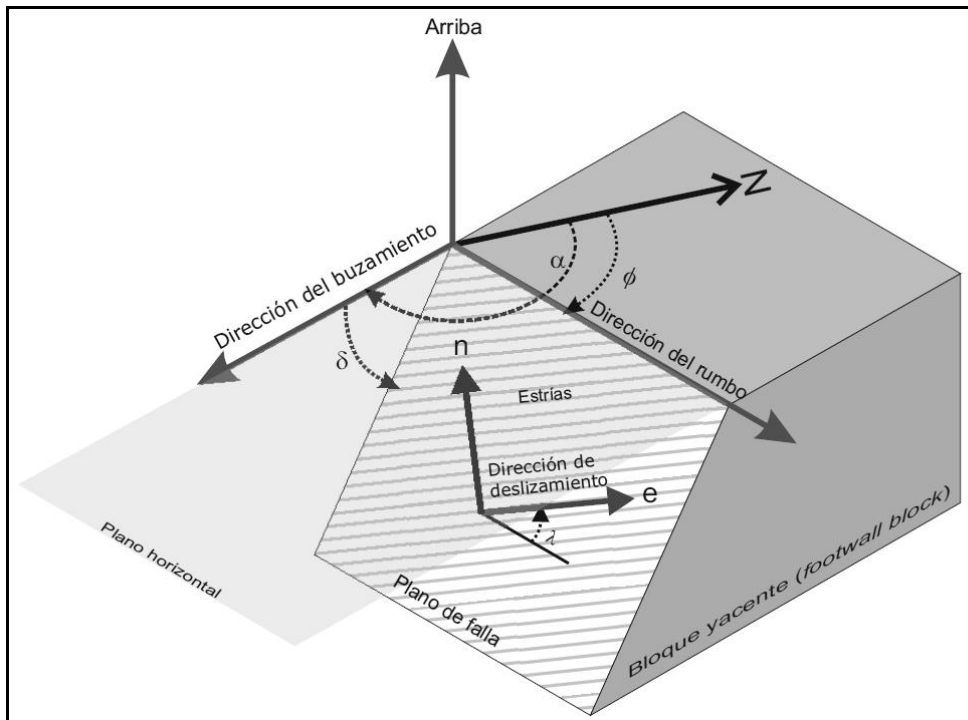
La orientación de características lineales, también son importantes. La orientación de las líneas en el espacio se describen dos ángulos de referencia denominados: DIRECCIÓN e INCLINACIÓN (Trend / Plunge).

**DIRECCIÓN (TREND).** Es el ángulo formado entre la proyección de la recta (en un plano horizontal) con la dirección Norte – Sur.

**INCLINACIÓN (PLUNGE).** Es el buzamiento de una recta.



**Figura 18.** Forma de medir la estría de una falla pitch o rake ( $\lambda$ ), inmersión o plunge ( $\beta$ ) y rumbo o trend ( $\epsilon$ ).  
Fuente: (Casas, 1990).



**Figura 19.** Block diagrama Parámetros de un plano de falla.  
Fuente: (Casas, 1990).

Parámetros de una falla. Plano de falla: Rumbo o dirección o Strike ( $\Phi$ ), buzamiento o dip ( $\delta$ ) y dirección del buzamiento ( $\alpha$ ). Estría de falla (e): ángulo de deslizamiento en el plano de falla medido con respecto a un plano horizontal Pitch o rake ( $\lambda$ )

### 3.7.1.2 Etapa II

#### Campo

#### Equipos e instrumentos en campo

Los equipos e instrumentos utilizados indispensables para realizar la etapa de campo son:

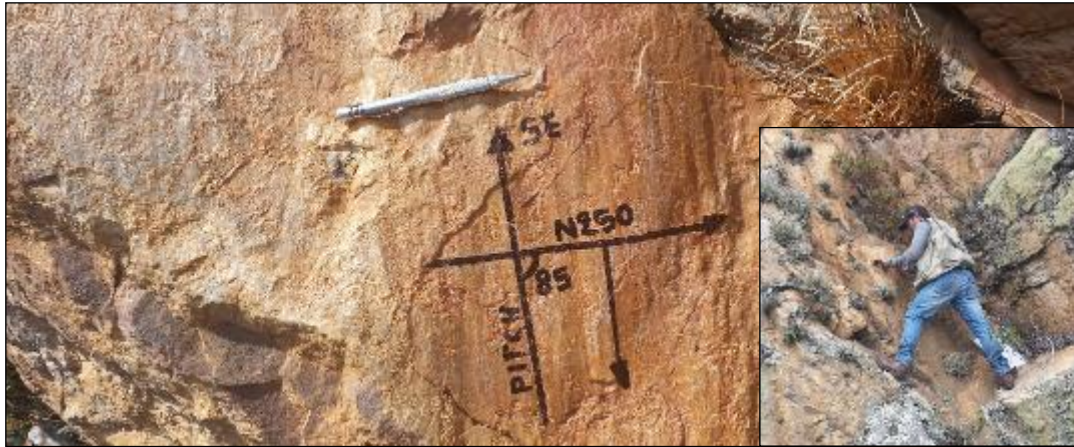
- Brújula Brunton azimutal, utilizada para medir datos estructurales como el azimut y buzamiento de planos de fallas, así como también la orientación de estratos de las unidades litológicas.
- GPS (Navegador), para ubicar los diferentes datos recopilados de indicadores cinemáticos de fallas y datos de estratos unidades litológicas según coordenadas en proyección UTM, Datum WGS-84 y zona 17 sur, para posteriormente ubicarlos en un plano topográfico.
- Libreta de campo, para tomar nota de datos geológicos - estructurales en campo.
- Tablero y plano de mapeo, para ubicar en el plano los diferentes datos obtenidos.

- Picota, Lupa 20X y Lápiz de dureza, para realizar una descripción macroscópica insitu de roca.
- Protactor y marcadores, para realizar la medición del ángulo de deslizamiento en el plano de falla medido con respecto a un plano horizontal (Pitch o rake); así mismo ubicar los puntos en el plano según eje de coordenadas latitud y longitud.
- Colores y lápices, para diferenciar y plasmar en el plano la orientación de estratos, estructuras y litología obtenidos en campo.
- Cámara fotográfica Sony de 12 megapíxeles, para registrar evidencia del trabajo de campo



**Foto 5.** Equipo usado en campo

Esta etapa se enfocó principalmente en identificar zonas (denominadas estaciones estructurales microtectónicas) con presencia de indicadores cinemáticos de falla (Estrías de Falla), en donde se tomaron los datos como rumbo de plano de falla, buzamiento, ángulo de desplazamiento en el plano de falla (Pitch), extracción de muestras para realizar estudio petrográfico y microtectónico en gabinete y laboratorio; también se realizó mapeo geológico a escala 1:10,000 toma de datos de estratos (rumbo y buzamiento), fallas y contactos de unidades litológicas.



**Foto 6.** Toma de datos en campo de rumbo y buzamiento.

En esta etapa se desarrollaron 26 estaciones estructurales donde se recopiló los datos microtectónicos de estrías de falla y se identificó su cinemática como se representa en la Tabla 3.



**Tabla 3.** Tabla de datos recopilados en campo.

Estación	Pto	Datum - WGS 84, Zona - 17s			Azimuth	Bz	Pitch	Cinemática
		Longitud	Latitud	Cota				
1	1	783861	9204418	2781	310	55	30-SE	Dx/Nx
2	2	783866	9204371	2648	105	80	85-SW	Nx
	2.1	783866	9204371	2648	115	80	85-SW	Nx
	3	783878	9204360	2635	110	75	85-SW	Nx
3	3.1	783878	9204360	2635	105	70	90-SW	Nx
	3.2	783878	9204360	2635	110	60	80-SW	Nx
4	4	783877	9204341	2648	110	55	85-NE	Ix
5	5	783887	9204320	2647	115	80	85-NE	Ix
6	6	783981	9204153	2663	100	65	75-SW	Nx/Dx
7	7	784237	9204971	2804	290	85	90-NE	Nx
	7.1	784237	9204971	2804	210	60	60-SW	Nx/Dx
8	8	784252	9204912	2780	240	25	20-SW	Sx
9	9	784269	9204871	2754	20	80	70-SE	Nx/Sx
10	10	784112	9204867	2790	130	55	60-SW	Nx/Dx
11	11	783922	9204926	2792	215	65	15-NE	Dx
12	12	783879	9204740	2679	100	75	80-SW	Nx
13	13	783378	9205006	2782	125	55	60-SE	Nx/Dx
14	14	783389	9205086	2684	115	85	80-SE	Nx
15	15	783408	9205008	2793	100	85	80-SW	Nx
16	16	783767	9205174	2925	50	85	45-NE	Nx/Sx
17	17	783767	9205174	2925	245	70	25-NE	Dx
18	18	783622	9205203	2940	150	25	35-SN	Dx
19	19	782792	9205078	2712	210	70	25-NE	Nx/Dx
20	20	782788	9205150	2768	250	50	85-SE	Ix
21	21	782877	9205127	2768	100	80	65-SW	Nx/Sx
22	22	782907	9205114	2768	245	60	60-SW	Ix/Sx
23	23	783052	9205076	2795	270	45	45-SE	Ix/Dx
24	24	782922	9204277	2782	215	20	30-NE	Dx
25	25	783323	9204197	2834	105	35	85-NE	Ix
26	26	783340	9204201	2827	300	60	50-SW	Sx

**Nota:** Nx: Falla normal, Ix: Falla inversa, Dx: Falla dextral, Sx: Falla sinistral.

### 3.7.1.3 Etapa III

#### Gabinete

En esta etapa se trabajó con los datos obtenidos en las dos etapas anteriores, transfiriendo datos en diferentes programas para ser procesados y analizados, usando programas como Excel para transferir datos, ArcGis 10.3 para realizar planos, FaultKin 6 para procesamientos de datos de indicadores cinemáticos con obtención de proyecciones

estereográficas, microscopio para realizar estudio petrográfico – microtectónico, GeoRose para realizar un análisis poblacional de fallas y finalmente Word para realizar el informe.

#### **3.7.1.4 Etapa IV**

##### **Laboratorio**

En esta etapa se trabajó como 04 muestras de roca extraídas del área de estudio, con la finalidad de observar mediante un microscópico microestructuras en dichas muestras, den idea de hacer un análisis microtectónicos de las mismas.



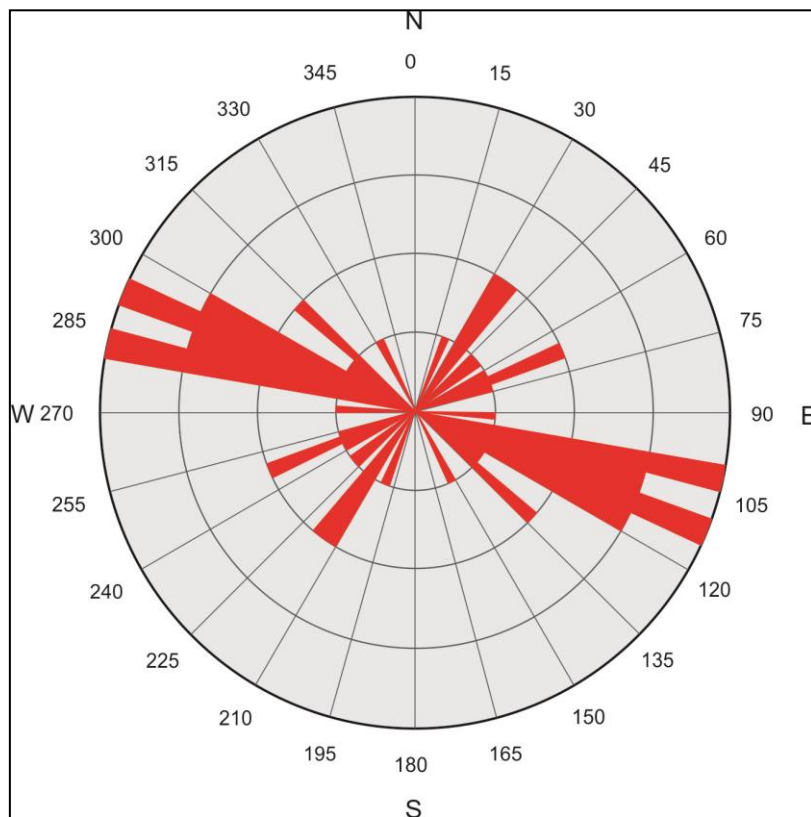
**Foto 7.** Microscópico óptico para estudio petrográfico – microtectónico

#### **3.8 Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados**

De acuerdo a las variables planteadas tanto independientes como dependientes dentro del estudio se trabajó con datos de fallas secundarias (variable independiente) y estrías de falla (variable dependiente) y el tratamiento que se utilizó en los datos registrados fueron, análisis estadístico para la variable independiente y análisis descriptivo/inferencial para las variables dependientes.

### 3.8.1 Análisis estadístico

Haciendo uso del Software GeoRose se realizó un análisis poblacional de falla



**Figura 20.** Análisis estadístico de la orientación con tendencia NW-SE de planos de fallas.

El análisis estadístico de tendencia de rumbos de planos de falla, da como resultado que en el área de estudio los rumbos de plano de falla tienen una tendencia NW – SE y ocasionalmente NE – SW, como se muestra en la Fig. 20.

### 3.8.2 Análisis descriptivo

Haciendo del software FaultKin y fotografías se realizó el análisis descriptivo de cada estación, teniendo como resultado lo siguiente:

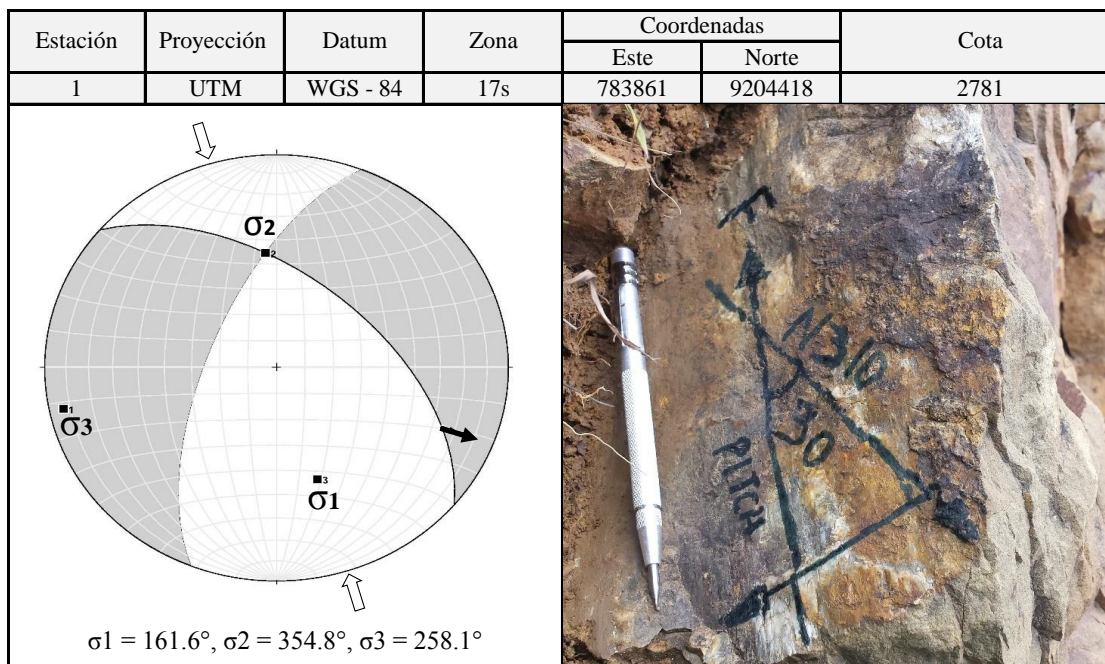
## Estación N° 1

Plano de falla normal dextral, Azimuth N310°, Buzamiento 55°NE (Fig. 21 - Foto. 8), indicadores cinemáticos de estrías de falla, con pitch 30°, con movimiento al SE.



**Foto 8.** Interpretación microtectónica estación N° 1

Plano de falla dextral normal con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 15°, fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.

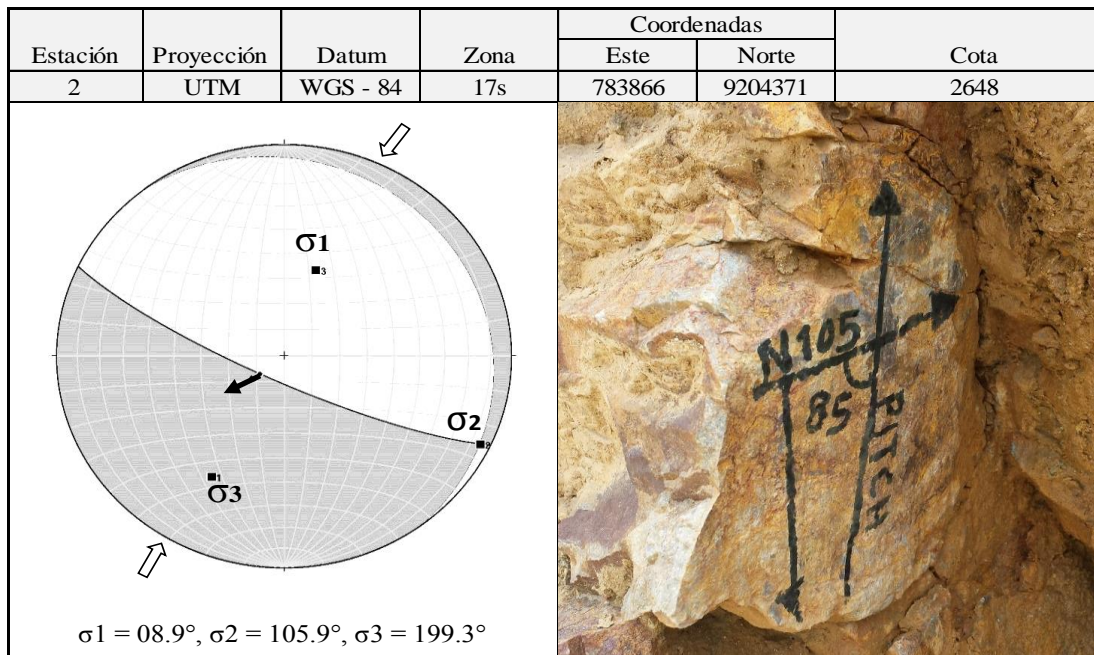


**Figura 21.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 1

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $30^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría falla lateral derecha (destral) con componente normal según la interpretación de la foto 8, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991), muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N354.8^\circ$ , componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N161^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N258.1^\circ$ , generando falla transcurrente destral normal con movimiento hacia el SE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

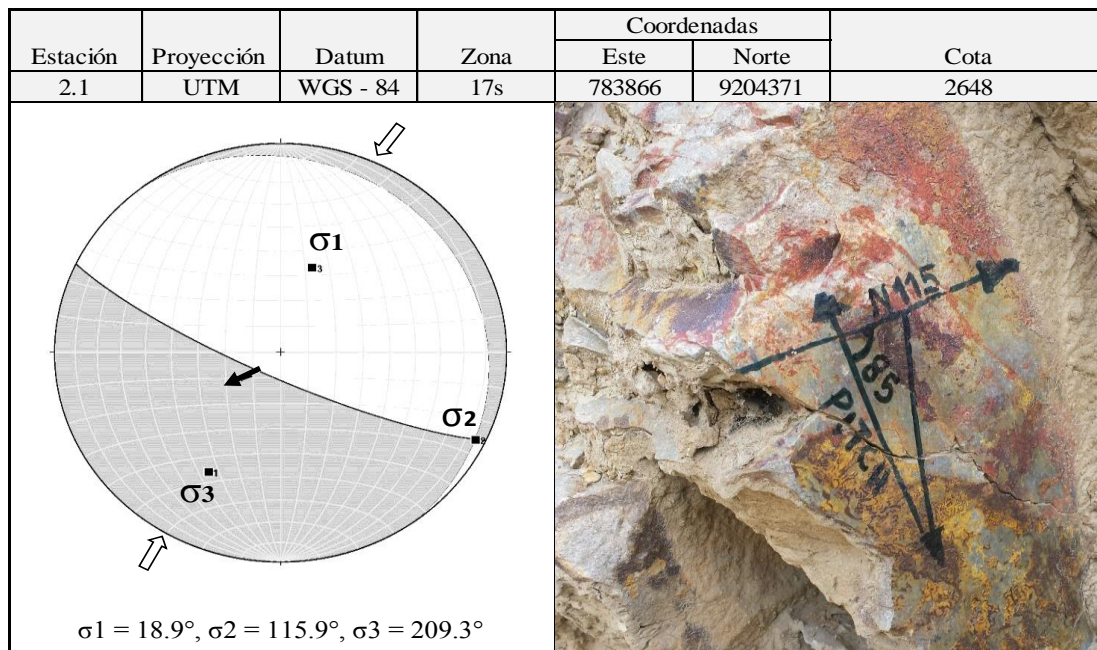
## Estación N° 2

En la estación 2 se tomó datos de 2 puntos, denominados: 2). Plano de falla normal, Azimuth N105°, Buzamiento 80°SW (Fig. 22), pitch 85° con movimiento al SW, 2.1). Plano de falla normal, Azimuth N115°, Buzamiento 80°SW (Fig. 23), pitch 85° con movimiento al SW; en la cual muestra los dos puntos tienen una tendencia en los datos tomados.



**Figura 22.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 2

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de 85° y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según los indicadores cinemáticos, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección N08.9°, componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N105.9° y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) N199.3°, generando falla normal con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

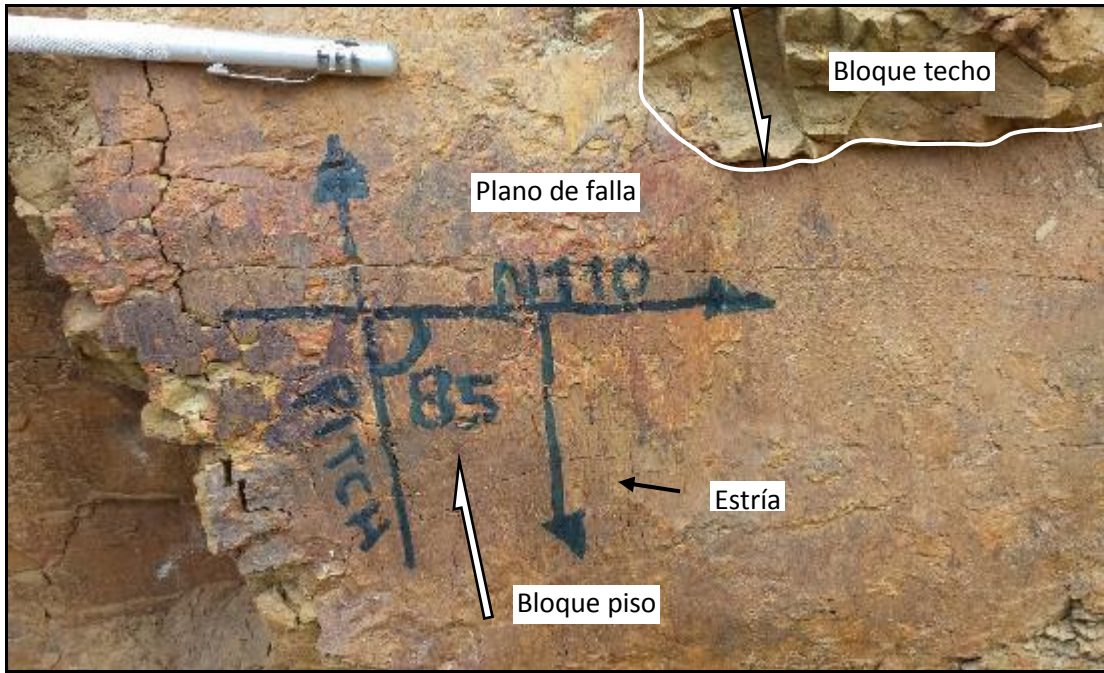


**Figura 23.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 2.1

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $85^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según los indicadores cinemáticos, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección N $18.9^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N $115.9^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N $209.3^\circ$ , generando falla normal con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

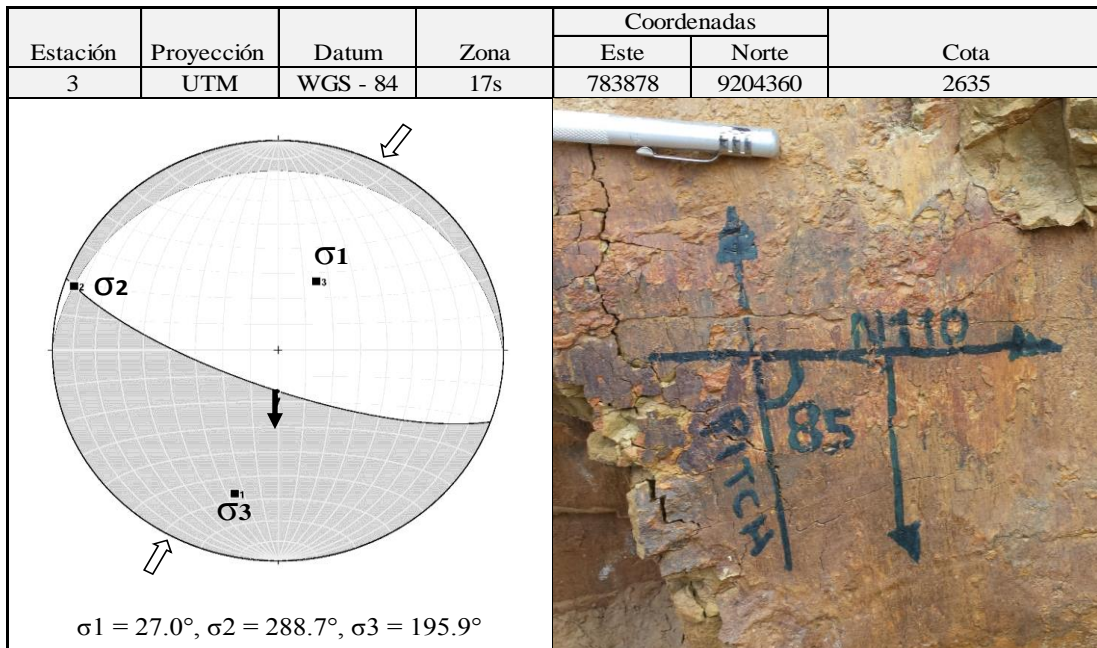
### Estación N° 3

En la estación 3 se tomó datos de 3 puntos, denominados: 3). Plano de falla normal, Azimuth N $110^\circ$ , Buzamiento  $75^\circ$ SW, pitch  $85^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 24 – Foto. 9), 3.1). Plano de falla normal, Azimuth N $105^\circ$ , Buzamiento  $70^\circ$ SW, pitch  $90^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 25 – Foto. 10), 3.2). Plano de falla normal, Azimuth N $110^\circ$ , Buzamiento  $60^\circ$ SW, pitch  $80^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 26 – Foto. 11); en la cual los tres puntos tienen una tendencia en los datos tomados.



**Foto 9.** Interpretación microtectónica estación N° 3

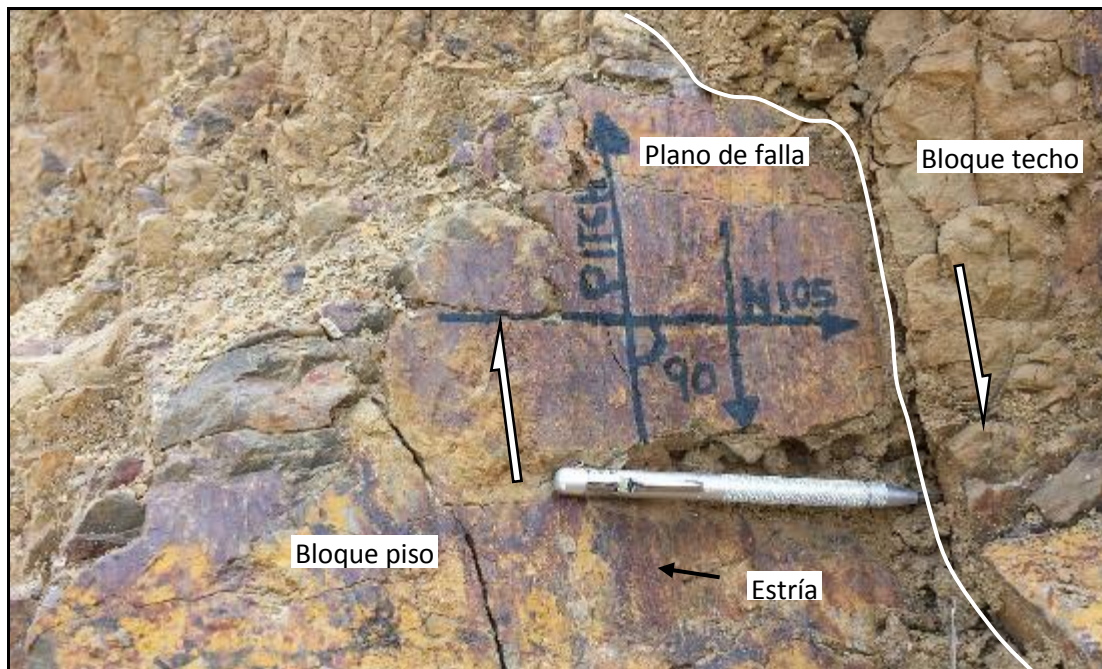
Plano de falla normal con indicadores cinemáticos, evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático presente en el piso de la falla interpretada como una falla normal en la cual el techo de la falla se habría movido hacia el SW siendo el bloque faltante.



**Figura 24.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 3

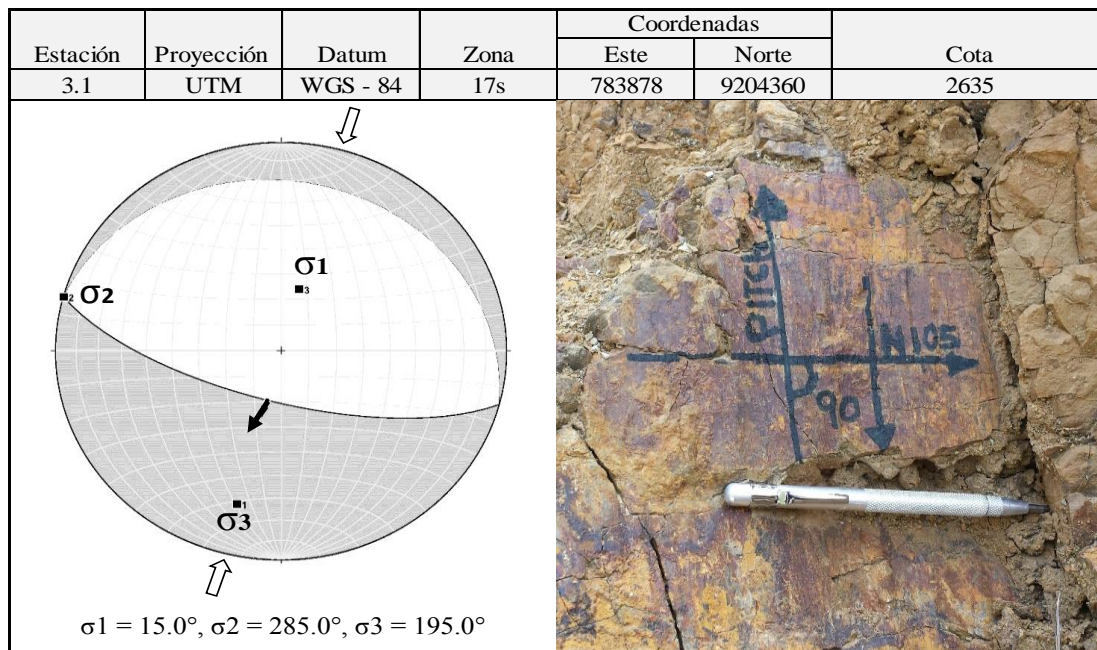


Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $85^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según la interpretación de la foto 9, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N27.0^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N288.7^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N195.9^\circ$ , generando falla normal con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.



**Foto 10.** Interpretación microtectónica estación N° 3.1

Plano de falla normal con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático presente en el piso de la falla interpretada como una falla normal en la cual el techo de la falla se habría movido hacia el SW siendo el bloque faltante.



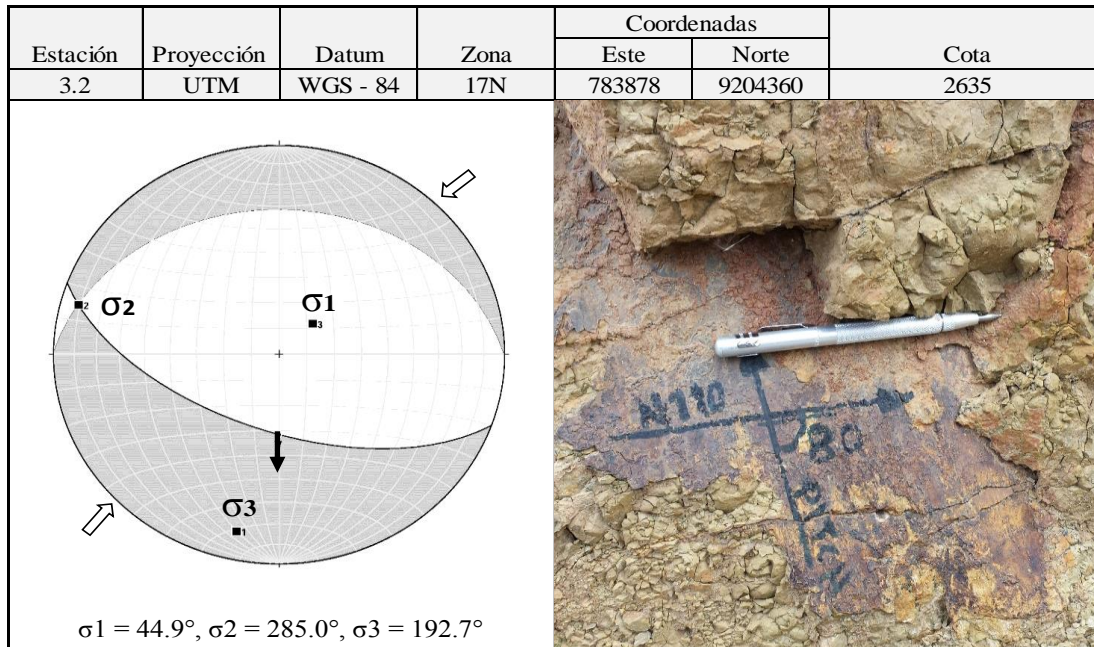
**Figura 25.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 3.1

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $90^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según la interpretación de la foto 10, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N15.0^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N285.0^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N195.0^\circ$ , generando falla normal con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.



**Foto 11.** Interpretación microtectónica estación N° 3.2

Plano de falla normal con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático presente en el piso de la falla interpretada como una falla normal en la cual el techo de la falla se habría movido hacia el SW siendo el bloque faltante.

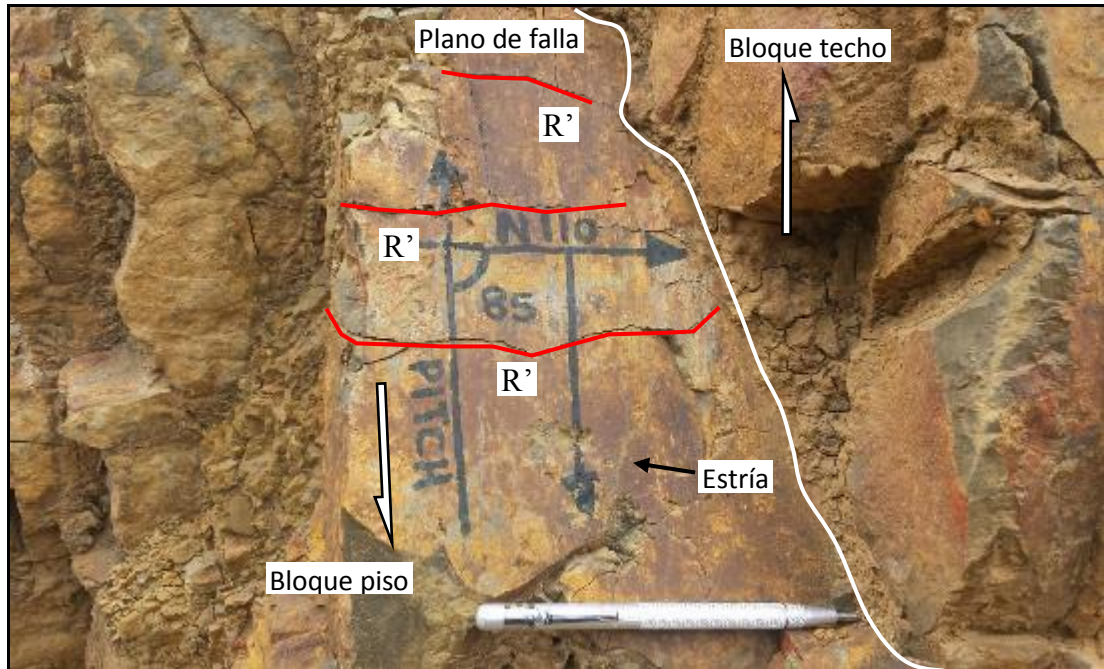


**Figura 26.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 3.2

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $80^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según la interpretación de la foto 11, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson (1905) son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N44.9^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N285.0^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N192.7^\circ$ , generando falla normal con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

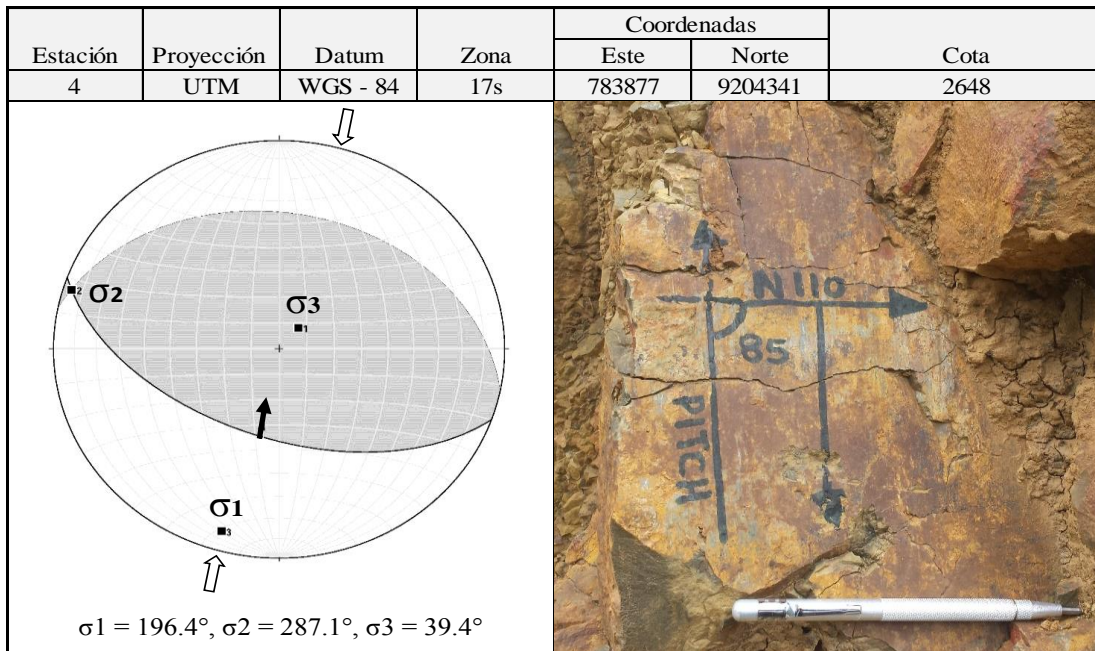
#### Estación N° 4

En la estación 4 se tomó datos de 1 puntos, Plano de falla inversa, Azimuth N110°, Buzamiento 55°SW, pitch 85° con movimiento al NE (Fig. 27 – Foto. 12).



**Foto 12.** Interpretación microtectónica estación N° 4

Plano de falla inversa con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R' (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 75°, fracturas (R') con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.

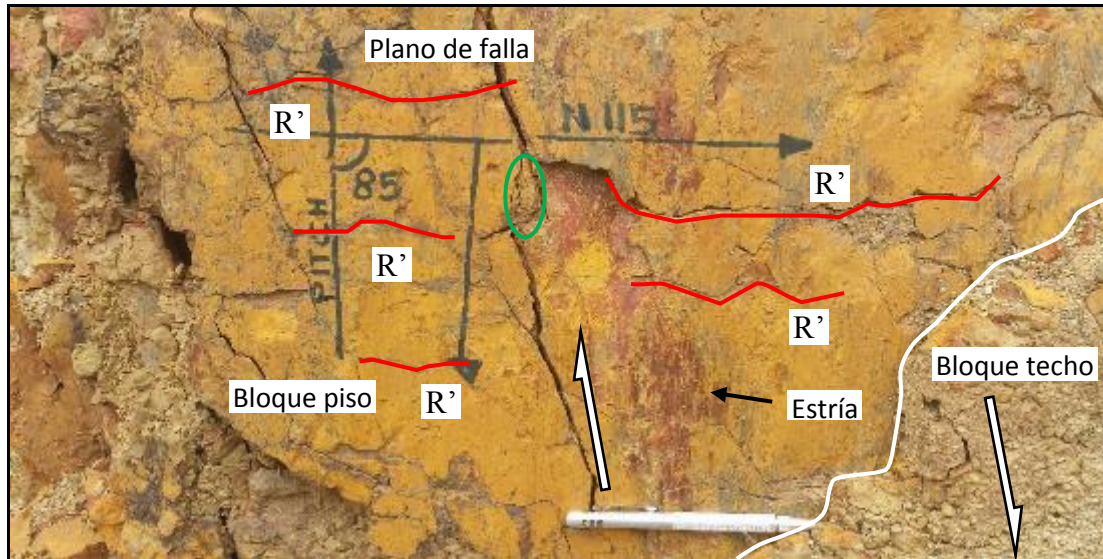


**Figura 27.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 4

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $85^\circ$  y acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla inversa según la interpretación de la foto 11, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N196.4°, componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N287.0° y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección N39.4°, generando falla inversa con movimiento hacia el NE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

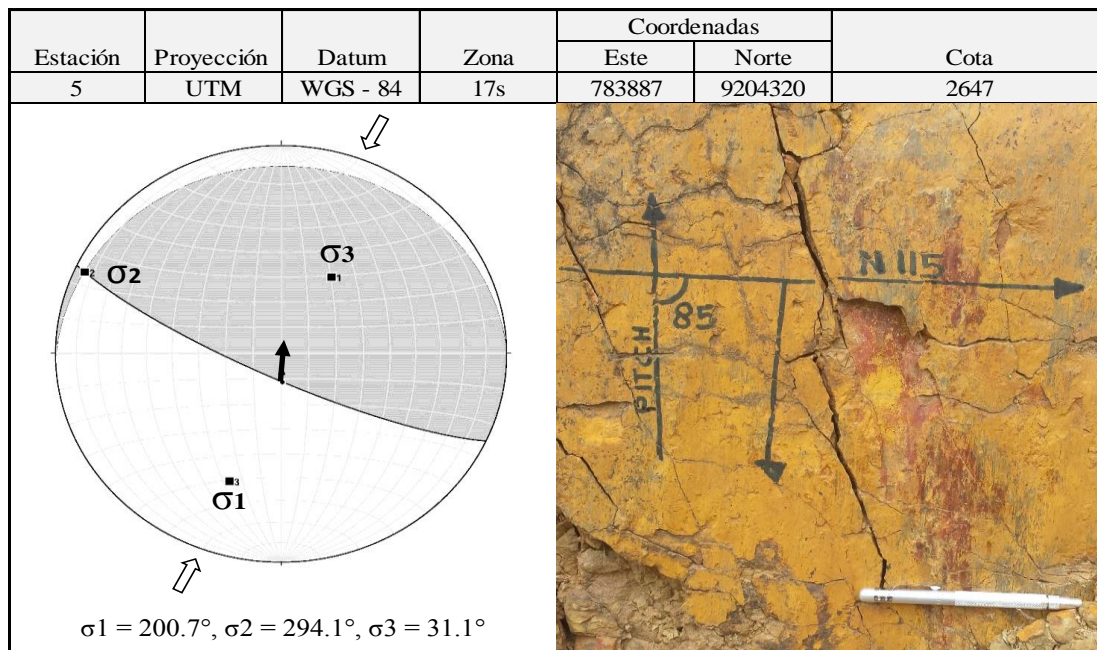
### Estación N° 5

En la estación 5 se tomó datos de 1 puntos, Plano de falla inversa, Azimuth N115°, Buzamiento 80°SW, pitch 85° con movimiento al NE (Fig. 28 – Foto. 13).



**Foto 13.** Interpretación microtectónica estación N° 5

Plano de falla inversa con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R' (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 75°, fracturas (R') con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes, así mismo podemos ver un tercer indicador cinemático tipo lente o sigmoide en la zona de color verde generado por los esfuerzos que dieron lugar a la falla.

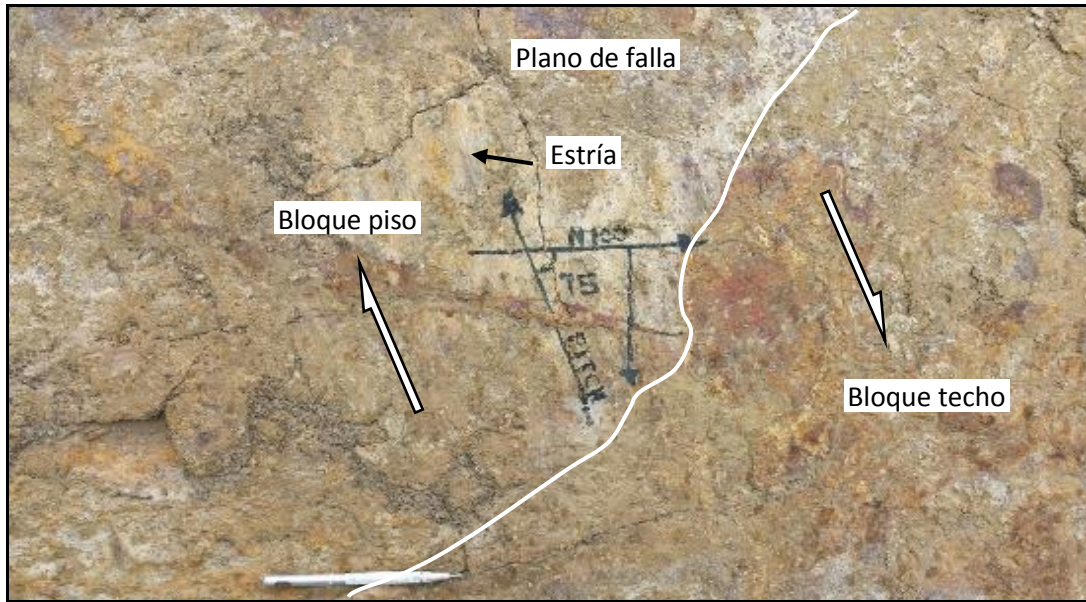


**Figura 28.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 5

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $85^\circ$  y acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla inversa según la interpretación de la foto 13, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N $200.7^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N $294.1^\circ$  y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección N $31.1^\circ$ , generando falla inversa con movimiento hacia el N mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

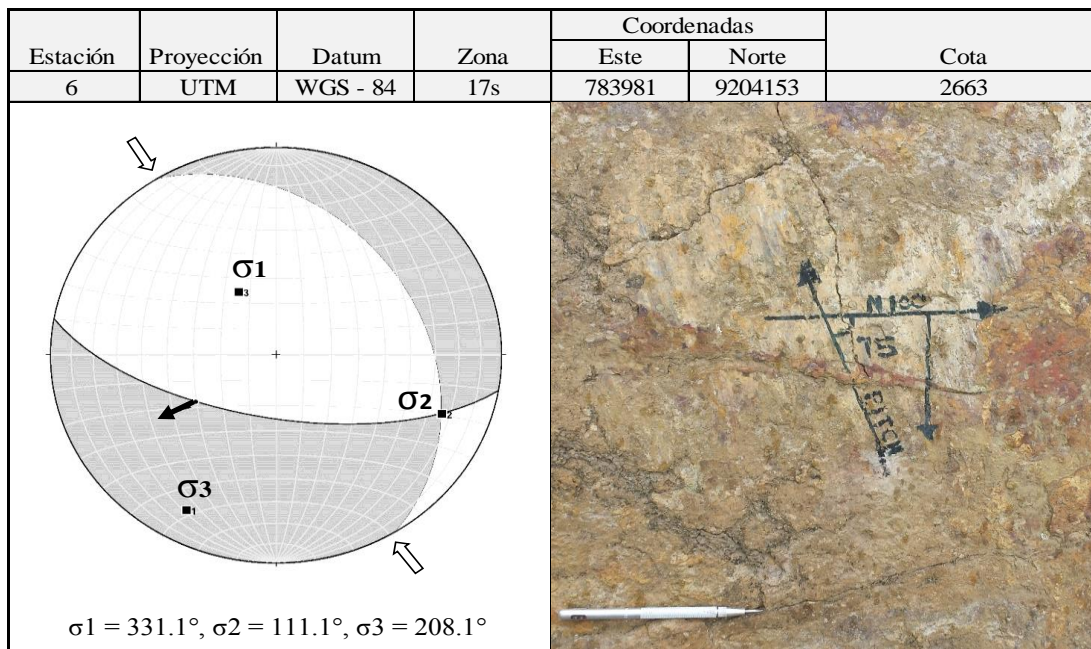
### Estación N° 6

En la estación 6 se tomó datos de 1 puntos, Plano de falla normal dextral, Azimuth N $100^\circ$ , Buzamiento  $65^\circ$ SW, pitch  $75^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 29 – Foto. 14).



**Foto 14.** Interpretación microtectónica estación N° 6

Plano de falla normal dextral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, interpretado como falla normal por el movimiento normal de los bloques donde el bloque techo se mueve al SW con respecto al bloque piso.



**Figura 29.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 6



Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $75^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal con componente lateral derecha o dextral según la interpretación de la foto 14, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson (1905) son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N331.1^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N111.1^\circ$  y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N208.1^\circ$ , generando falla normal dextral con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro

### Estación N° 7

En la estación 7 se tomó datos de 2 puntos, denominados 7). Plano de falla normal, Azimut  $N290^\circ$ , Buzamiento  $85^\circ NE$ , pitch  $90^\circ$  con movimiento al NE (Fig. 30 – Foto. 15), 7.1). Plano de falla normal dextral, Azimuth  $N210^\circ$ , Buzamiento  $60^\circ E$ , pitch  $60^\circ SW$  con movimiento al SW (Fig. 31 – Foto 16).

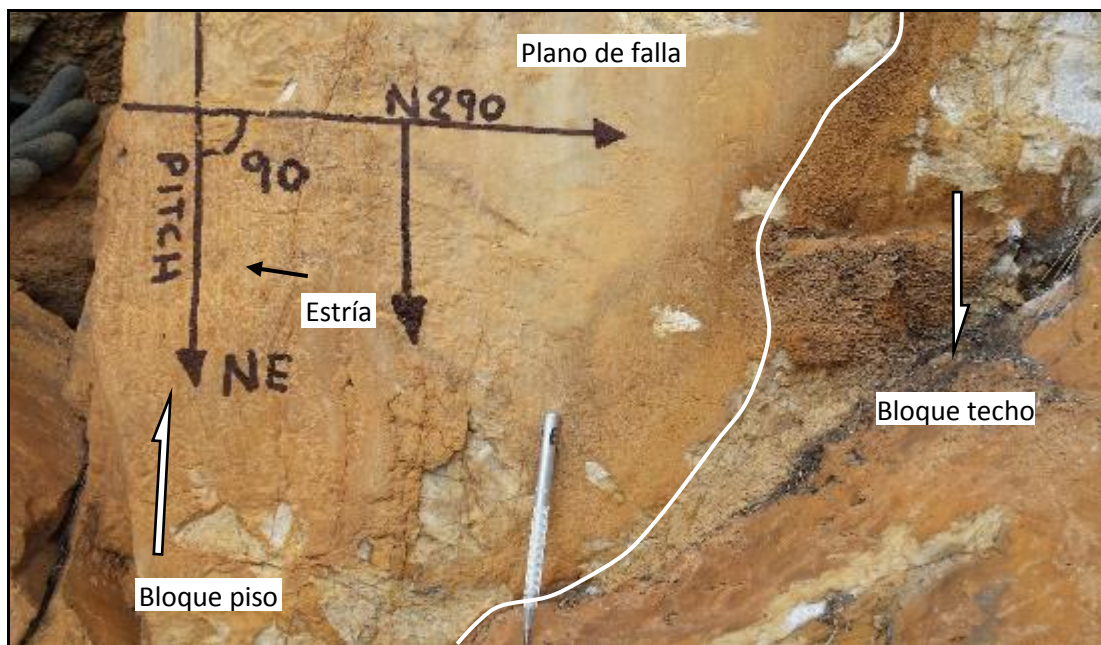
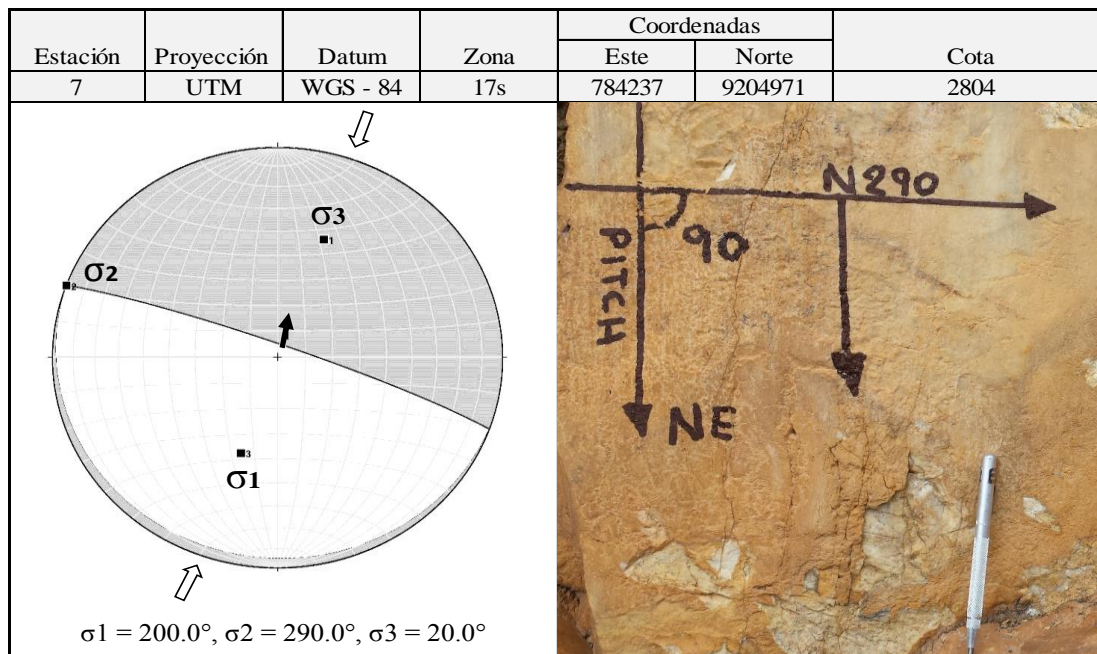


Foto 15. Interpretación microtectónica estación N° 7

Plano de falla normal con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, interpretado como falla normal por el movimiento normal de los bloques donde el bloque techo se mueve al NE con respecto al bloque piso.



**Figura 30.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 7

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $90^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según la interpretación de la foto 15, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección N200.0°, componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N290.0° y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección N20.0°, generando falla normal movimiento hacia el NE, mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

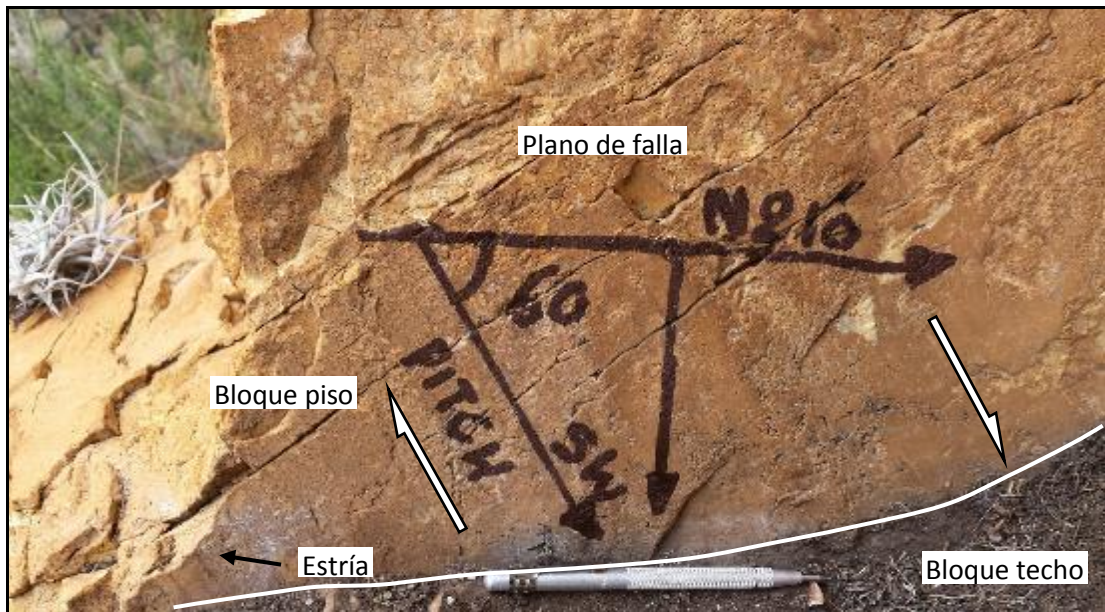


Foto 16. Interpretación microtectónica estación N° 7.1

Plano de falla normal dextral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, interpretado como falla normal dextral por el movimiento normal lateral de los bloques donde el bloque techo se mueve al SW con respecto al bloque piso.

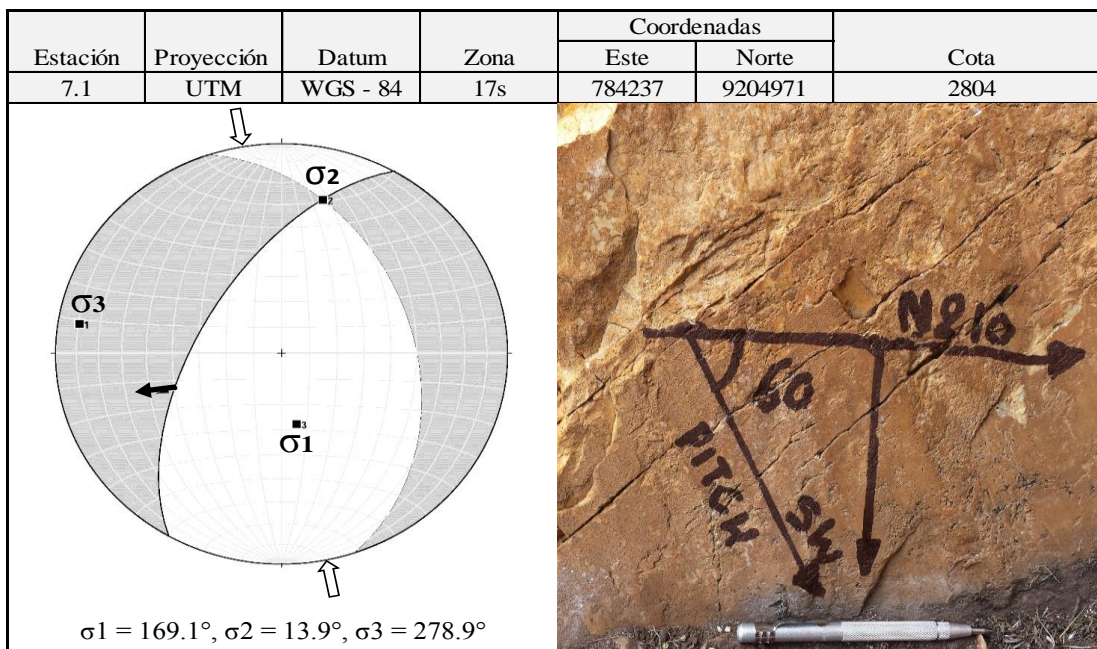
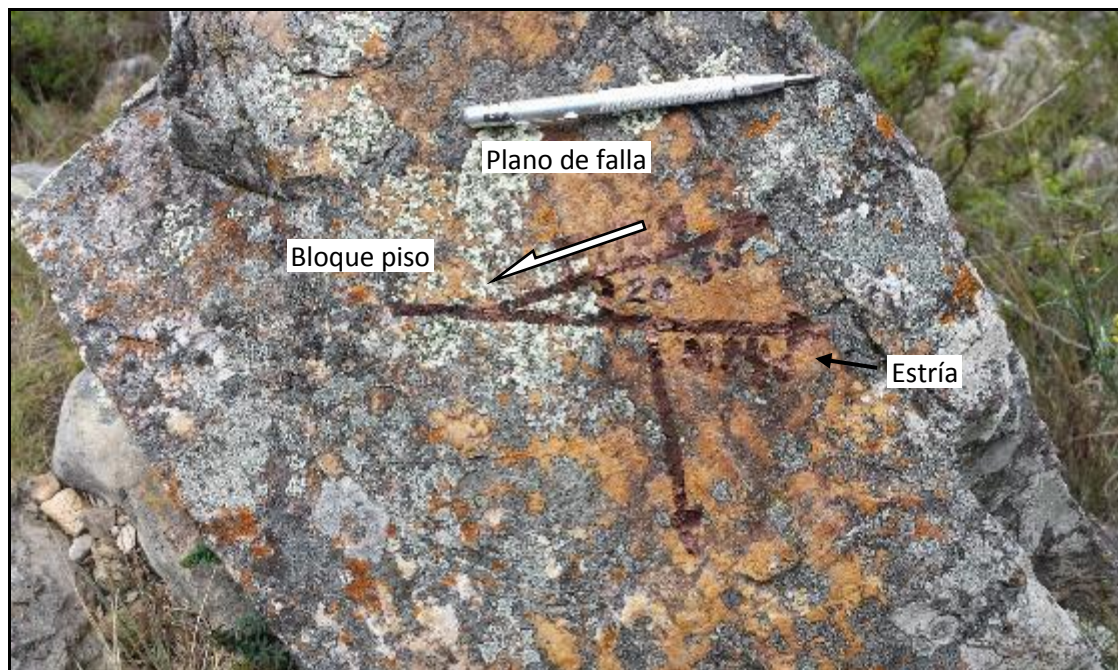


Figura 31. Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 7.1

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $60^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal con componente latera o dextral según la interpretación de la foto 16, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N169.1^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N13.9^\circ$  y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N278.9^\circ$ , generando falla normal dextral con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

### Estación N° 8

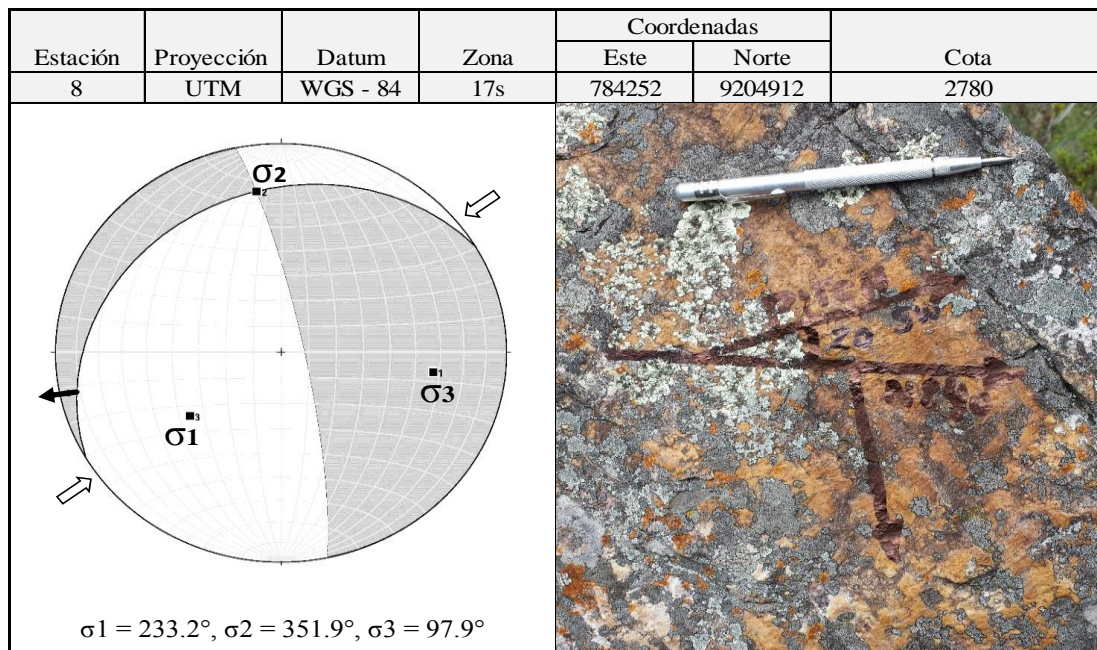
En la estación 8 se tomó datos de 1 puntos, Plano de falla sinestral, Azimuth  $N240^\circ$ , Buzamiento  $25^\circ NW$ , pitch  $20^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 32 – Foto. 17).



**Foto 17.** Interpretación microtectónica estación N° 8

Plano de falla sinestral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, interpretado como falla sinestral por el movimiento lateral de los

bloques donde el bloque techo se mueve al SW con respecto al bloque piso, donde es bloque techo se encuentra ausente.

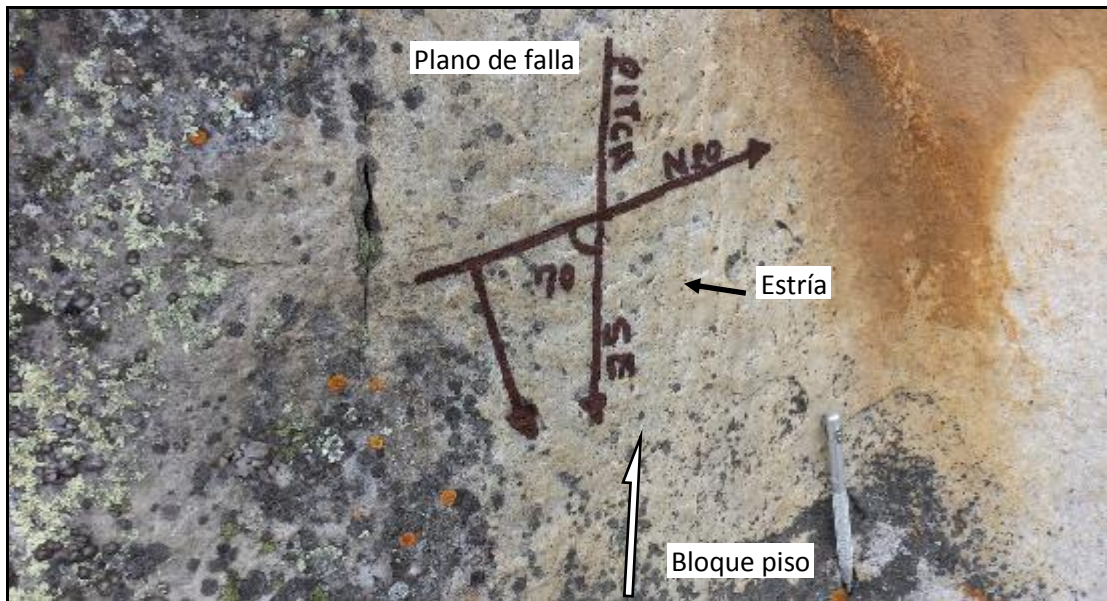


**Figura 32.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 8

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $20^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla sinistral con componente normal según la interpretación de la foto 17, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N233.2^\circ$ , componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N351.9^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N97.9^\circ$ , generando falla sinistral con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

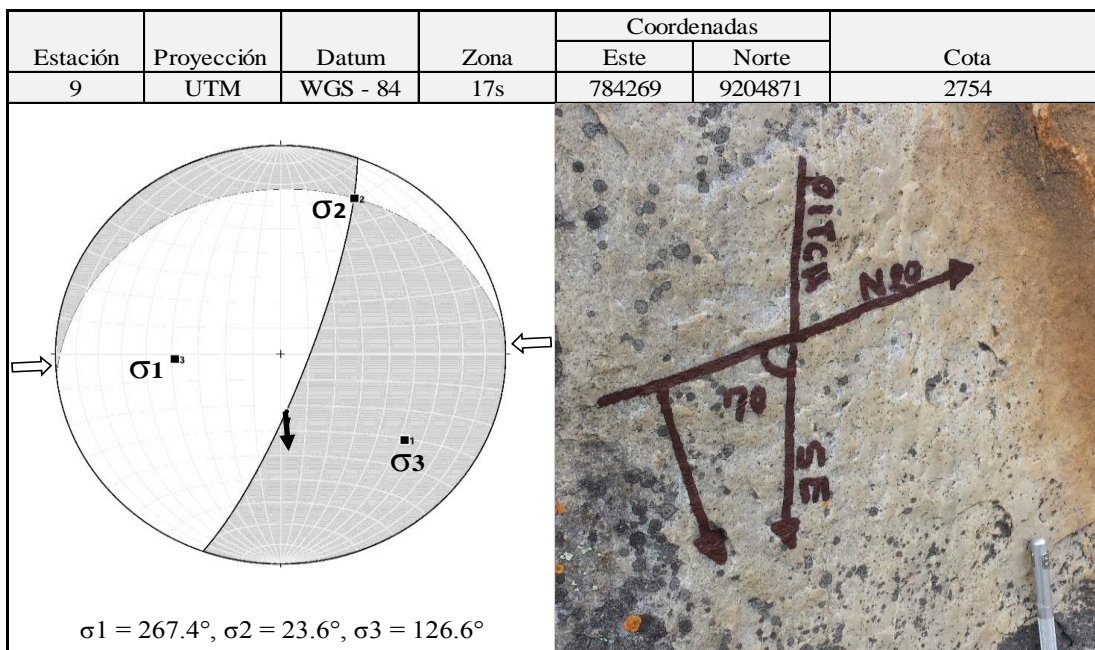
### Estación N° 9

En la estación 9 se tomó datos de 1 puntos, Plano de falla normal sinistral, Azimuth  $N20^\circ$ , Buzamiento  $80^\circ SE$ , pitch  $70^\circ$  con movimiento al SE (Fig. 33 – Foto. 18).



**Foto 18.** Interpretación microtectónica estación N° 9

Plano de falla normal sinistral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, interpretado como falla normal sinistral por el movimiento lateral de los bloques donde el bloque techo se mueve al SE con respecto al bloque piso, donde es bloque techo se encuentra ausente.

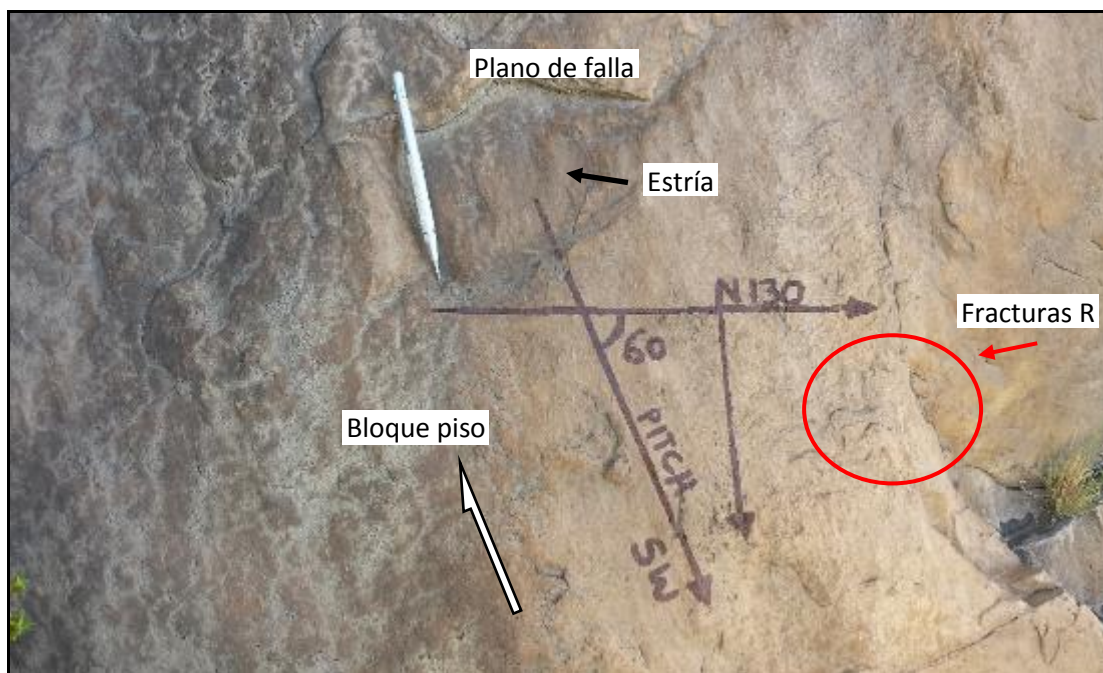


**Figura 33.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 9

Según los datos de la Tabla 03y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $70^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal con componente lateral sinestral según la interpretación de la foto 18, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N267.4^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N23.6^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N126.6^\circ$ , generando falla normal sinestral con movimiento hacia el SE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

### Estación N° 10

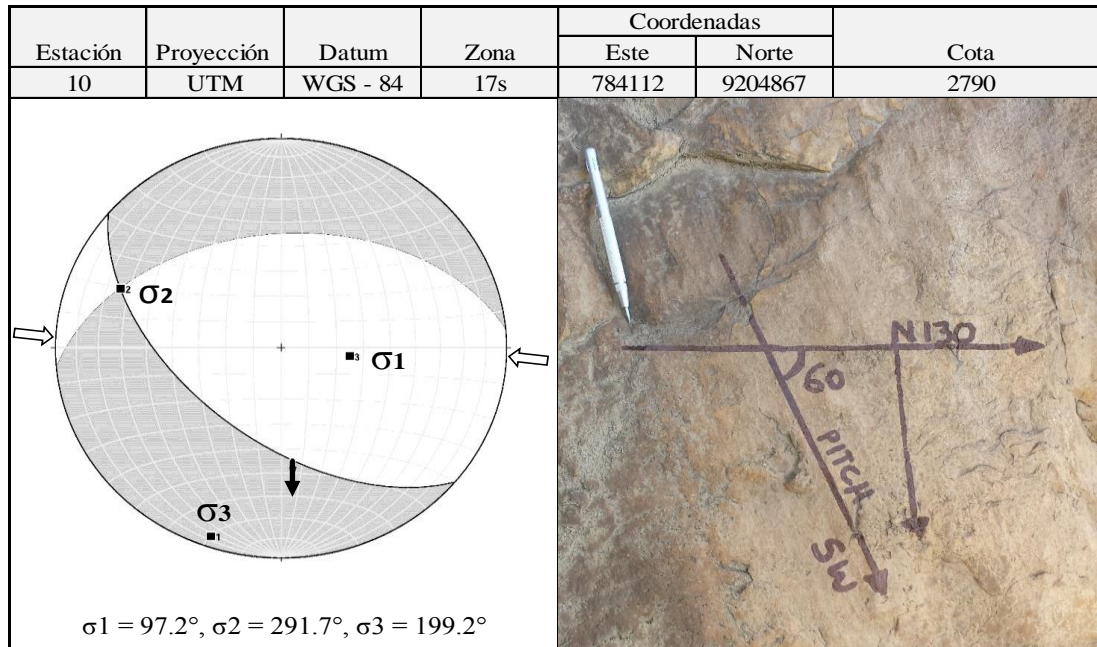
En la estación 10 se tomó datos de 1 puntos, Plano de falla normal destral, Azimuth  $N130^\circ$ , Buzamiento  $55^\circ SW$ , pitch  $60^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 34 – Foto. 19).



**Foto 19.** Interpretación microtectónica estación N° 10

Plano de falla destral normal destral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo

Riedel en este caso tipo R (Círculo color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto con respecto al plano de falla de aproximadamente 15°, fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.



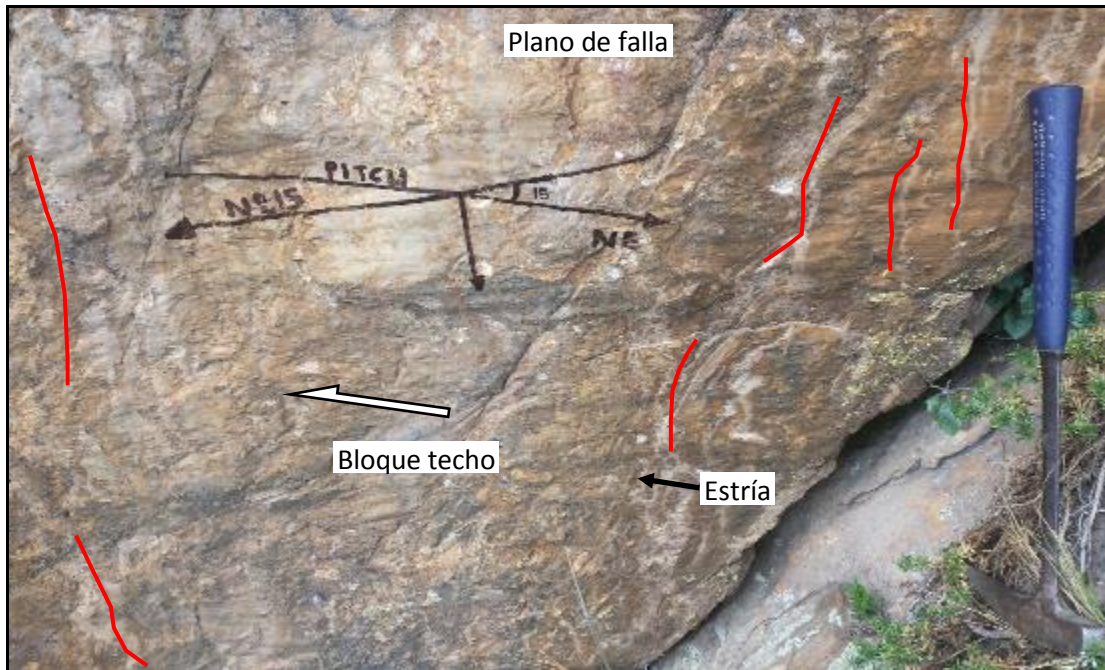
**Figura 34.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 10

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de 60° y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal con componente lateral dextral según la interpretación de la foto 19, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección N97.2°, componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N291.7° y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N199.2°, generando falla normal dextral con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.



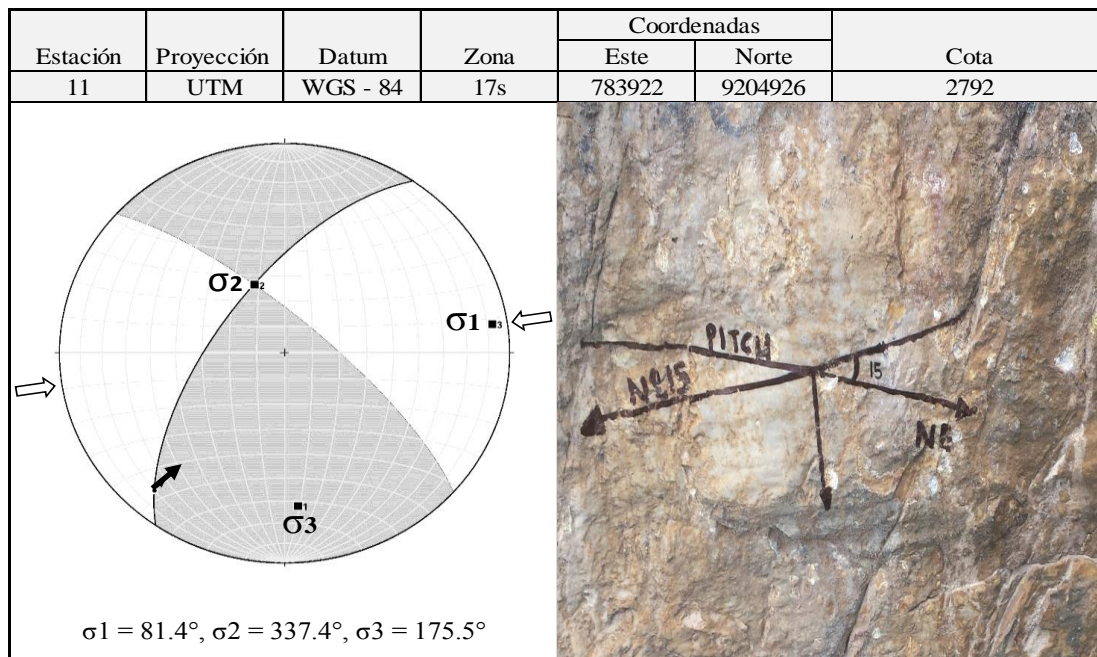
### Estación N° 11

En la estación 11 se tomó datos de 1 puntos, Plano de falla dextral, Azimuth N215°, Buzamiento 65°SW, pitch 15° con movimiento al NE (Fig. 35 – Foto. 20).



**Foto 20.** Interpretación microtectónica estación N° 11

Plano de falla dextral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación respecto al plano de falla de ángulos de fracturas congruentes con crecimiento de mineral estriado (Líneas de color rojo) constituirían segundo indicador cinemático según el criterio P de Petit, 1987 el cual tienen formas convexas a la dirección del movimiento.

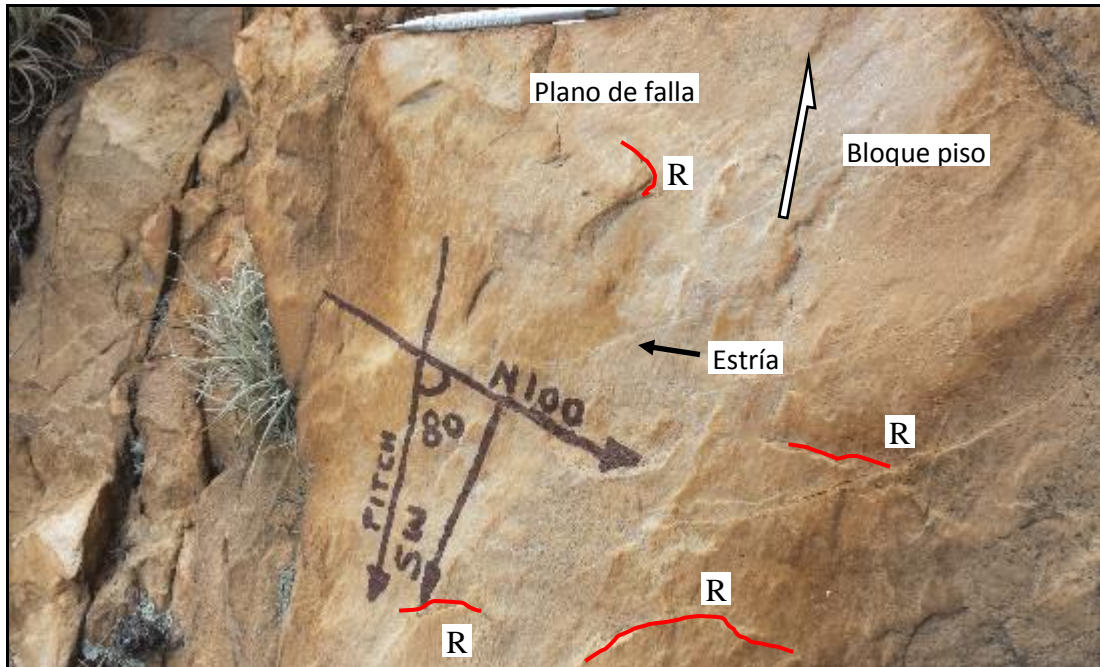


**Figura 35.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 11

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $15^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla dextral según interpretación de la foto 20, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N81.4°, componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección N337.4° y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N175.5°, generando falla dextral inversa con movimiento hacia el NE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

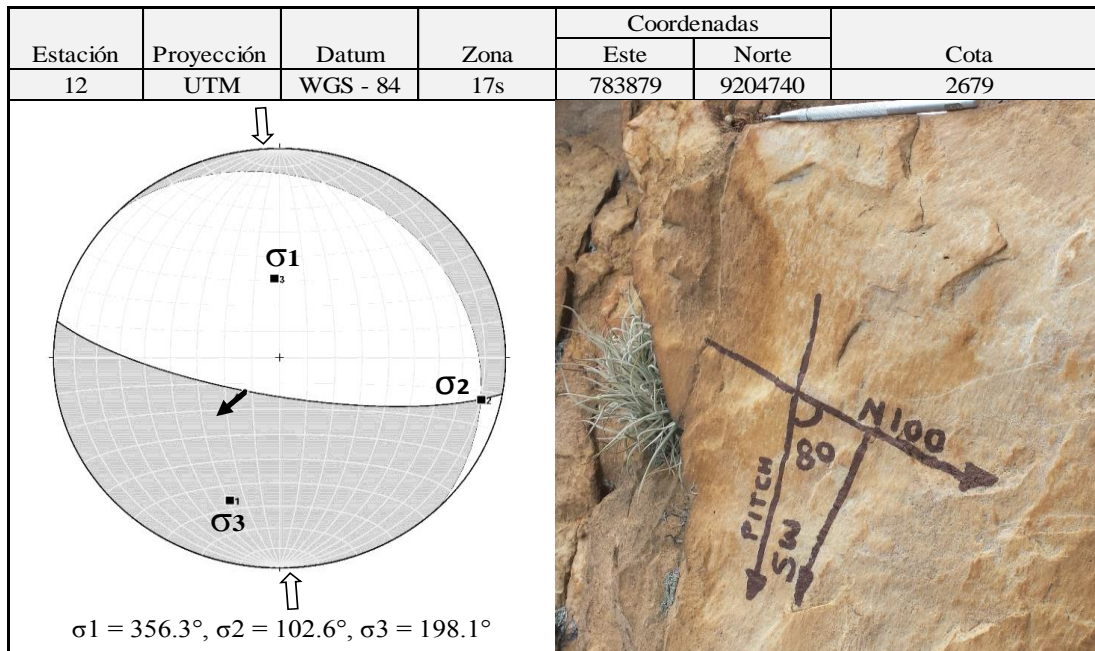
## Estación N° 12

En la estación 12 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla normal, Azimuth N100°, Buzamiento 75°SW, pitch 80° con movimiento al SW (Fig. 36 – Foto. 21).



**Foto 21.** Interpretación microtectónica estación N° 12

Plano de falla normal con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 15°, fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.

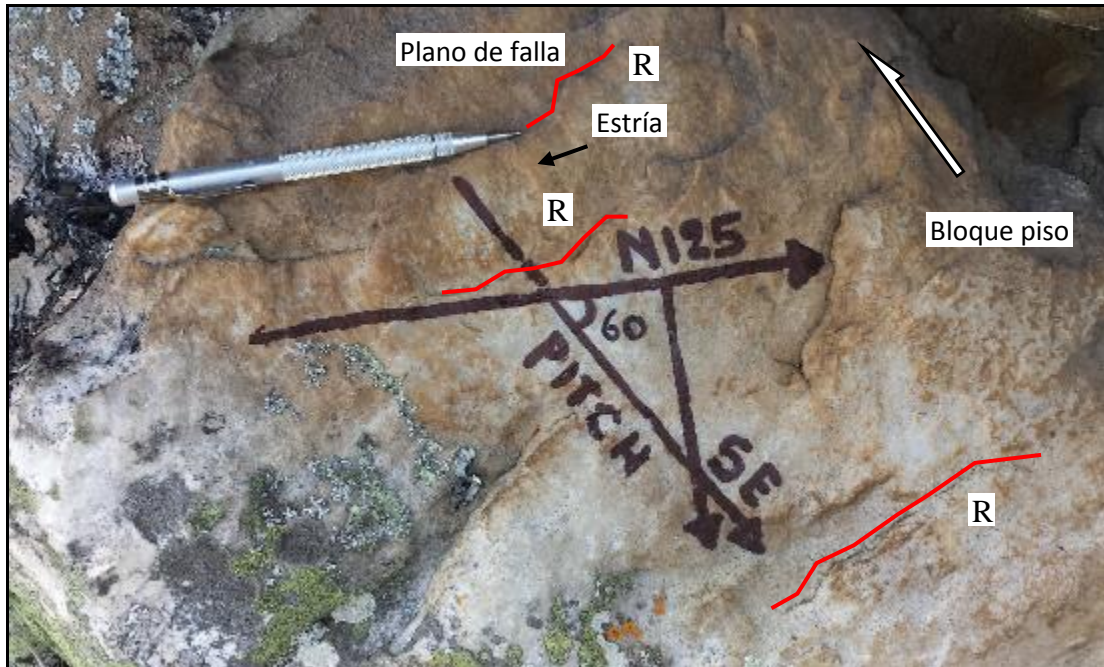


**Figura 36.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 12

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $80^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según interpretación de la foto 21, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N356.3^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N102.6^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N198.1^\circ$ , generando falla dextral normal con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

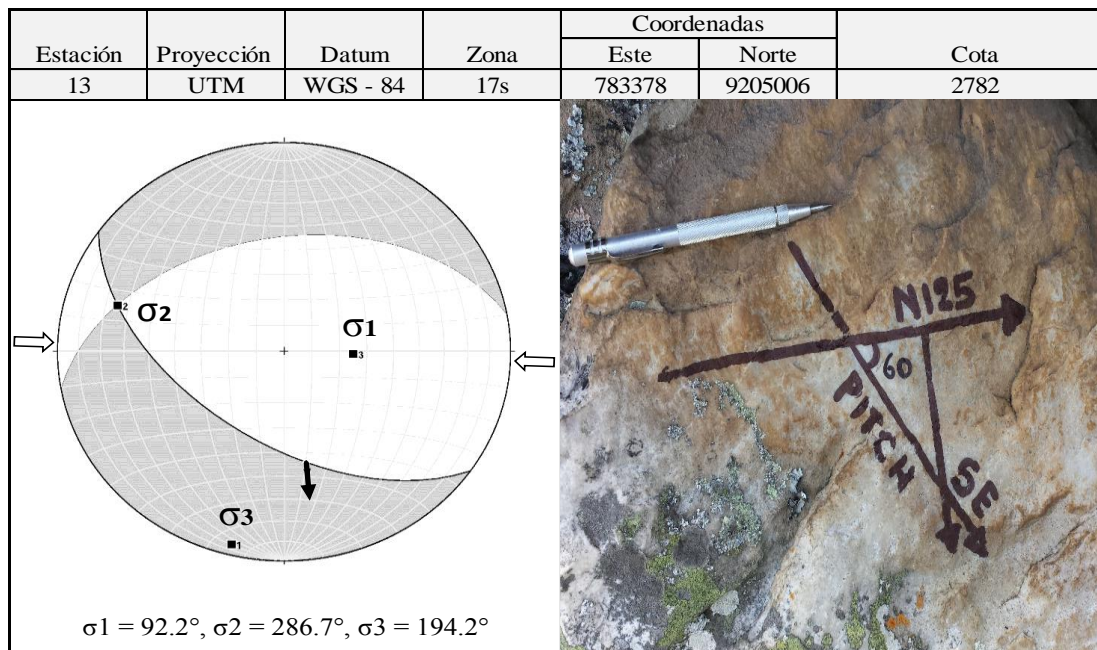
### Estación N° 13

En la estación 13 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla normal destal, Azimuth N125°, Buzamiento 55°SW, pitch 60° con movimiento al SE (Fig. 37 – Foto. 22).



**Foto 22.** Interpretación microtectónica estación N° 13

Plano de falla destal normal destal con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 15°, fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.



**Figura 37.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 13

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $60^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal con componente lateral dextral, según interpretación de la foto 22, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección N $92.2^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N $286.7^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N $194.2^\circ$ , generando falla normal sinistral con movimiento hacia el SE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

#### **Estación N° 14**

En la estación 14 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla normal, Azimuth N $115^\circ$ , Buzamiento  $85^\circ$ SW, pitch  $80^\circ$  con movimiento al SE (Fig. 38 – Foto. 23).

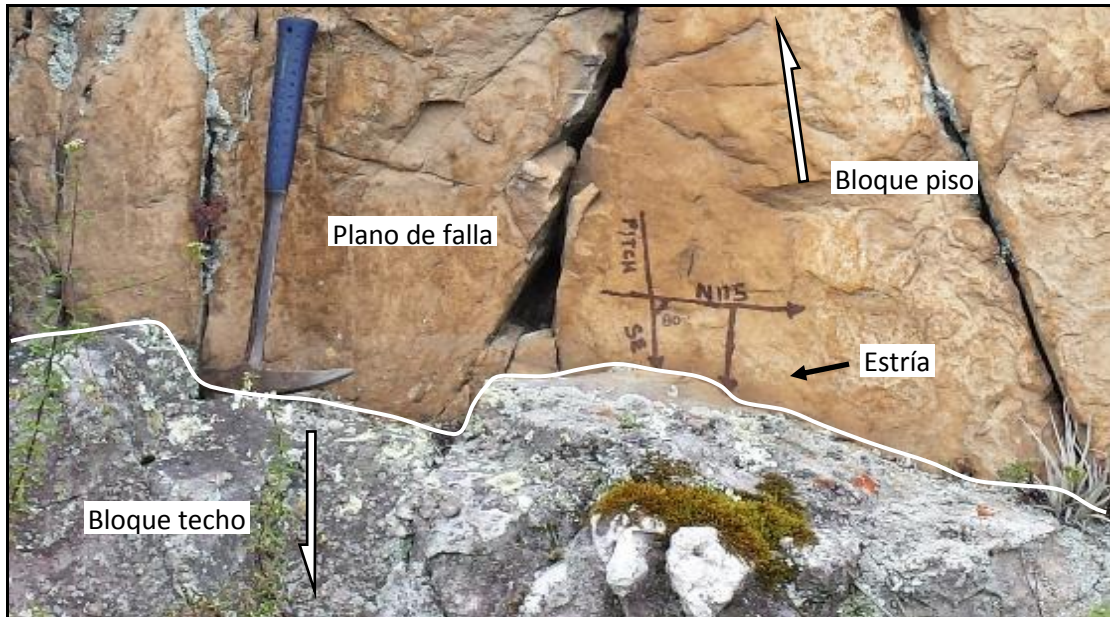


Foto 23. Interpretación microtectónica estación N° 14

Plano de falla dextral normal con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de entre los bloques de la falla piso y techo nos indica el tipo de falla, en este caso falla normal.

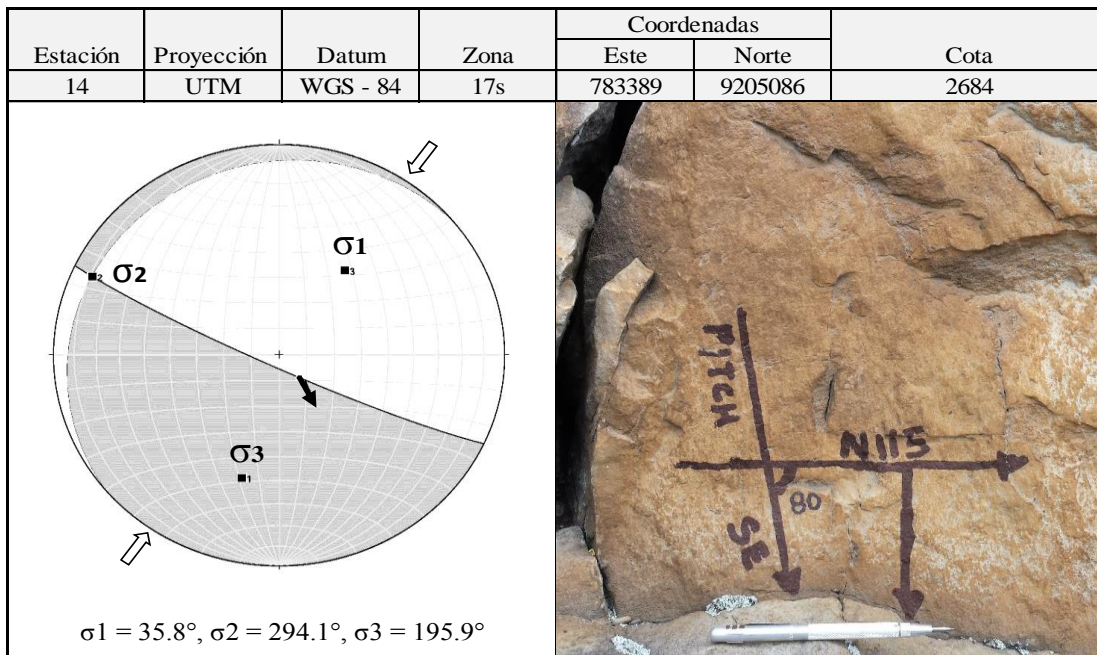
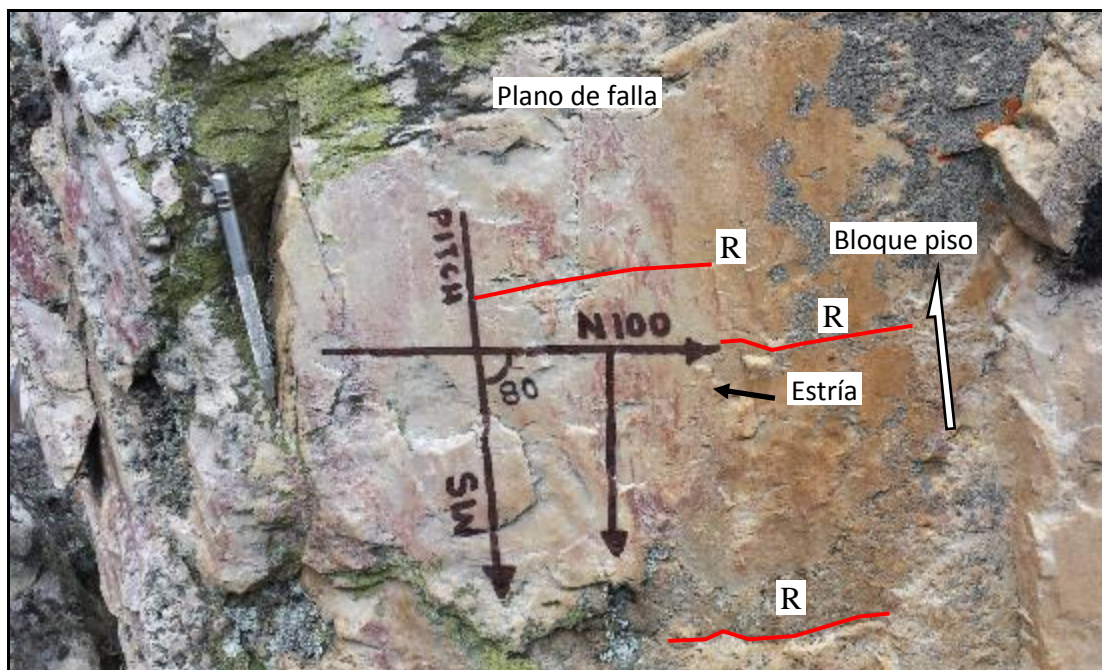


Figura 38. Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 14

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $80^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según interpretación de la foto 23, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N35.8^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N294.1^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N195.9^\circ$ , generando falla normal con movimiento hacia el SE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

### Estación N° 15

En la estación 15 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla normal, Azimuth  $N100^\circ$ , Buzamiento  $85^\circ SW$ , pitch  $80^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 39 – Foto. 24).

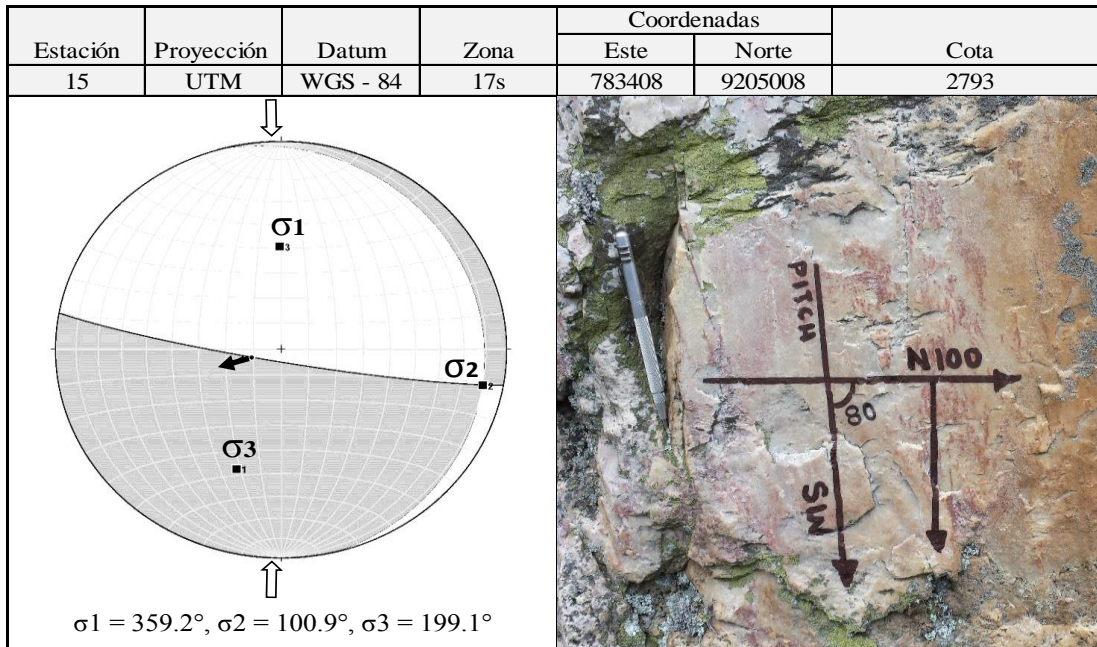


**Foto 24.** Interpretación microtectónica estación N° 15

Plano de falla normal con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este



caso tipo R (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 15°, fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.

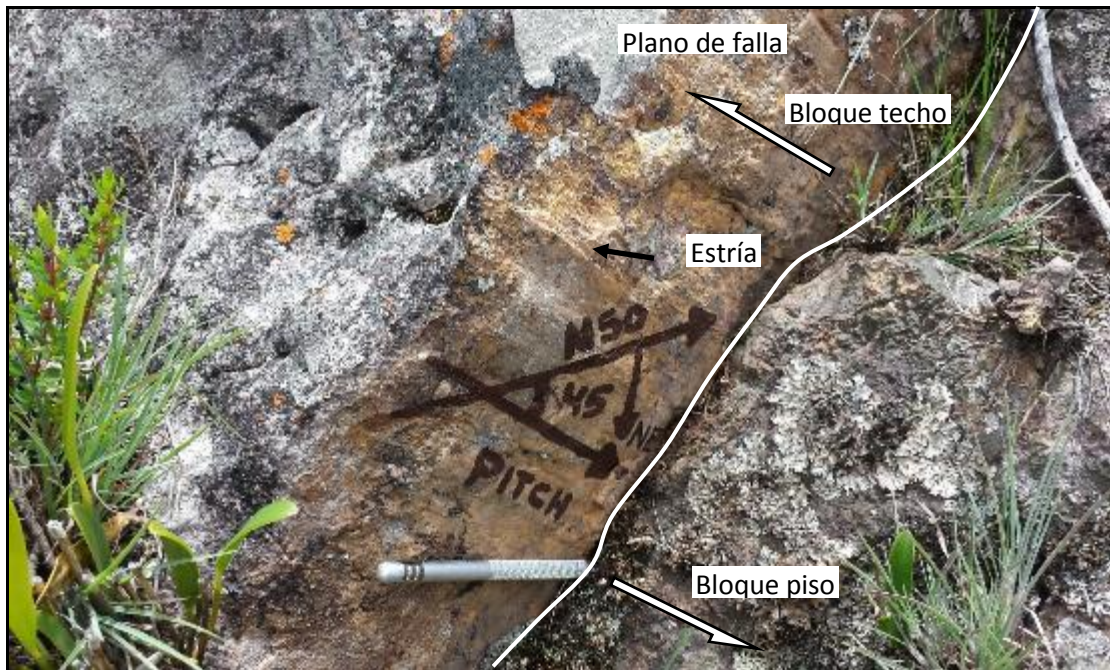


**Figura 39.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 15

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de 80° y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal según interpretación de la foto 24, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección N359.2°, componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N100.9° y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N199.1°, generando falla dextral normal con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

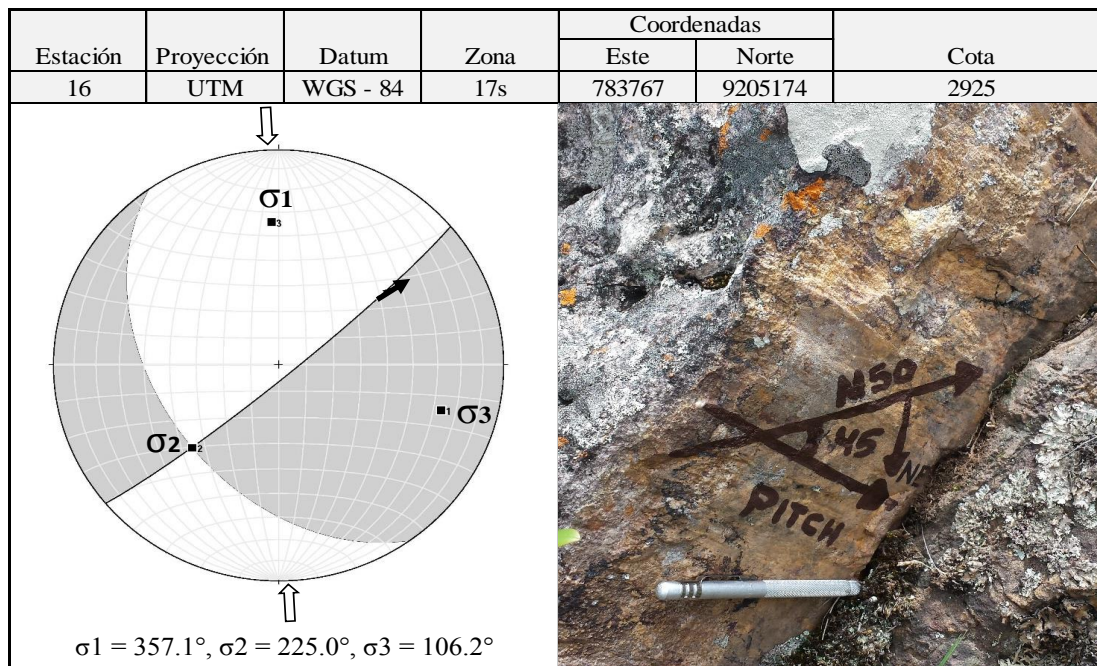
### Estación N° 16

En la estación 16 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla normal sinestral, Azimuth N50°, Buzamiento 85°SE, pitch 45° con movimiento al NE (Fig. 40 – Foto. 25).



**Foto 25.** Interpretación microtectónica estación N° 16

Plano de falla normal sinestral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación entre bloques de falla y el ángulo agudo de horizontal de movimiento nos indican el tipo de falla en este caso falla sinestral.

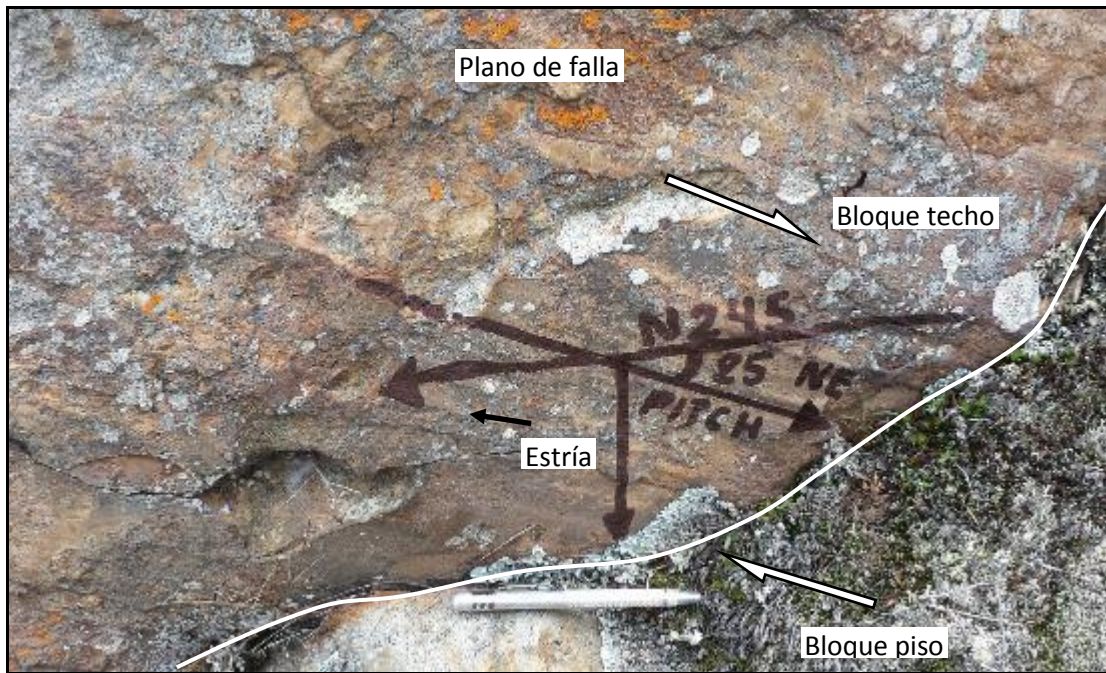


**Figura 40.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 16

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $45^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal sinistral según interpretación de la foto 25, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección N $357.1^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N $225.0^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N $106.2^\circ$ , generando falla normal sinistral con movimiento hacia el NE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

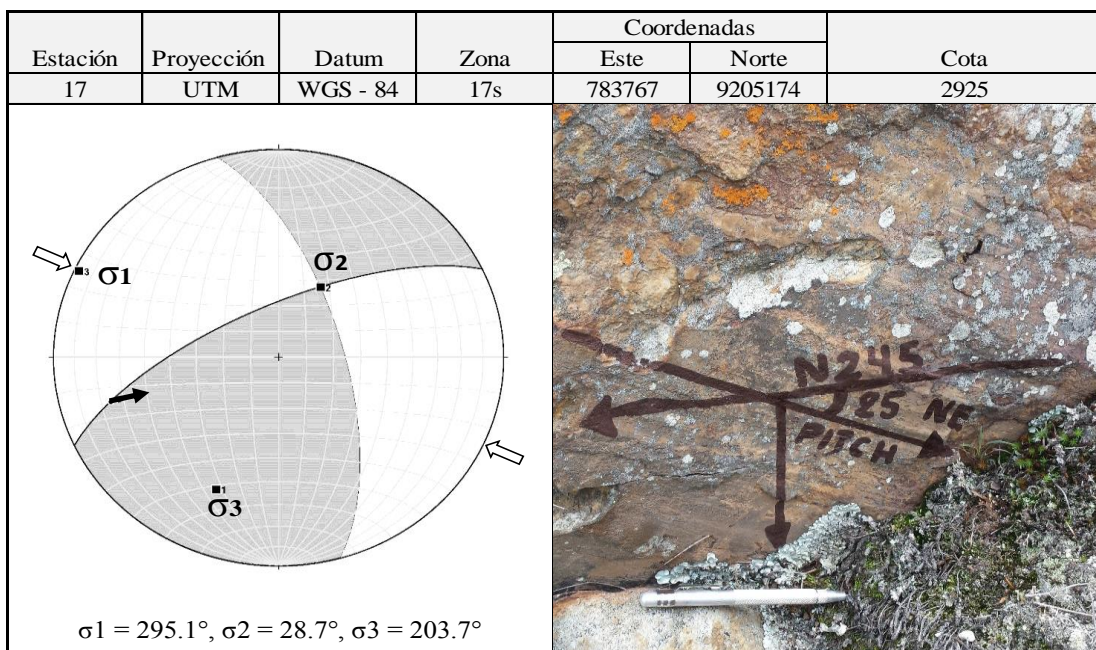
### Estación N° 17

En la estación 17 se tomó datos de 1 punto, Plano falla dextral, Azimuth N $245^\circ$ , Buzamiento  $70^\circ$ NW, pitch  $25^\circ$  con movimiento al NE (Fig. 41 – Foto. 26).



**Foto 26.** Interpretación microtectónica estación N° 17

Plano de falla dextral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación entre bloques de falla y el ángulo agudo horizontal del pitch nos indica el tipo de falla, que en este caso es falla dextral.

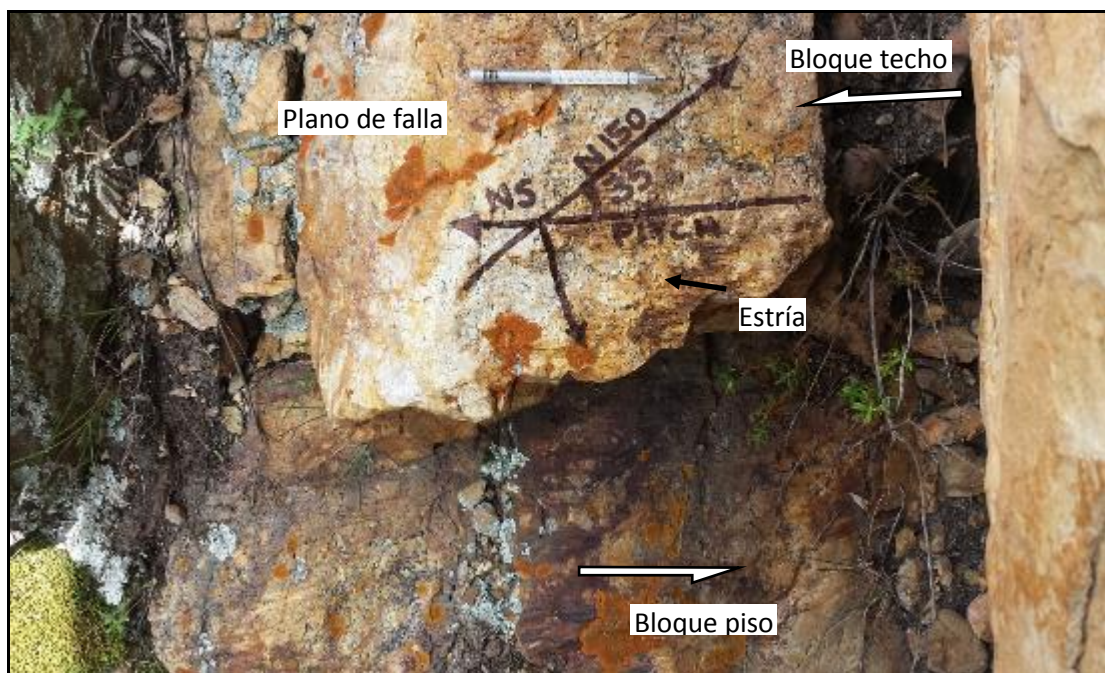


**Figura 41.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 17

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $25^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla dextral según interpretación de la foto 26, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N295.1^\circ$ , componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N28.7^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N203.7^\circ$ , generando falla dextral con movimiento hacia el NE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

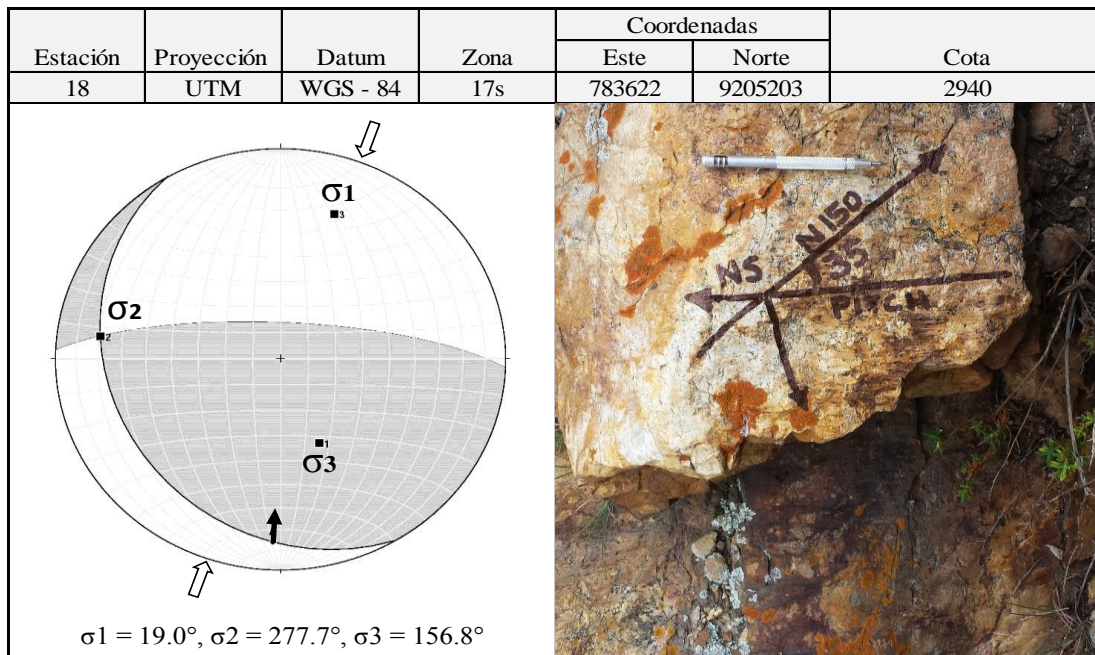
### Estación N° 18

En la estación 18 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla dextral, Azimuth  $N150^\circ$ , Buzamiento  $25^\circ SW$ , pitch  $35^\circ$  con movimiento al N (Fig. 42 – Foto. 27).



**Foto 27.** Interpretación microtectónica estación N° 18

Plano de falla dextral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de los bloques, el bajo ángulo del pitch, nos define el tipo de falla en este caso falla dextral.

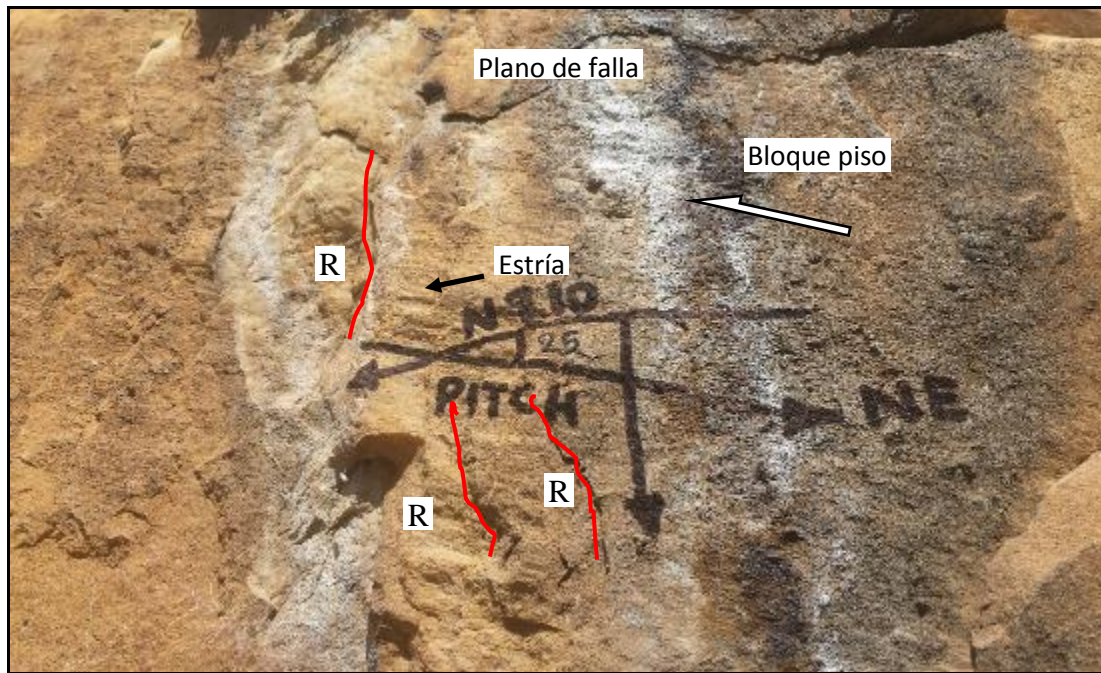


**Figura 42.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 18

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $35^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla dextral según interpretación de la foto 27, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N $19.0^\circ$ , componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección N $277.7^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N $156.8^\circ$ , generando falla dextral inversa con movimiento hacia el N mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

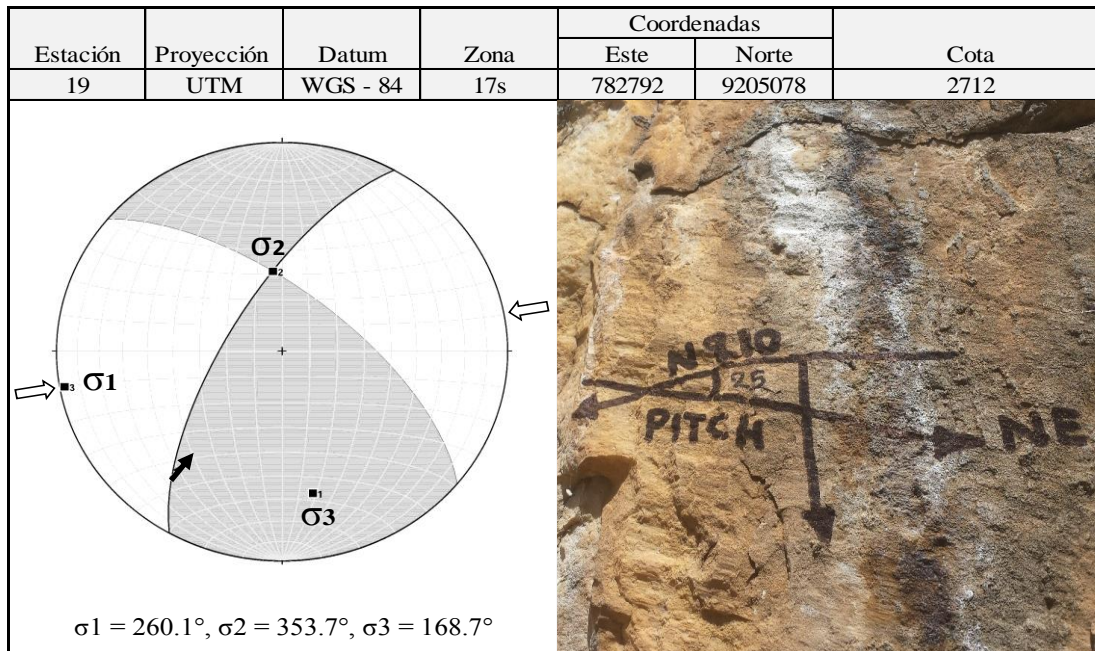
### Estación N° 19

En la estación 19 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla dextral, Azimuth N $210^\circ$ , Buzamiento  $70^\circ$ SW, pitch  $25^\circ$  con movimiento al NE (Fig. 43 – Foto. 28).



**Foto 28.** Interpretación microtectónica estación N° 19

Plano de falla dextral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente  $15^\circ$ , fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.



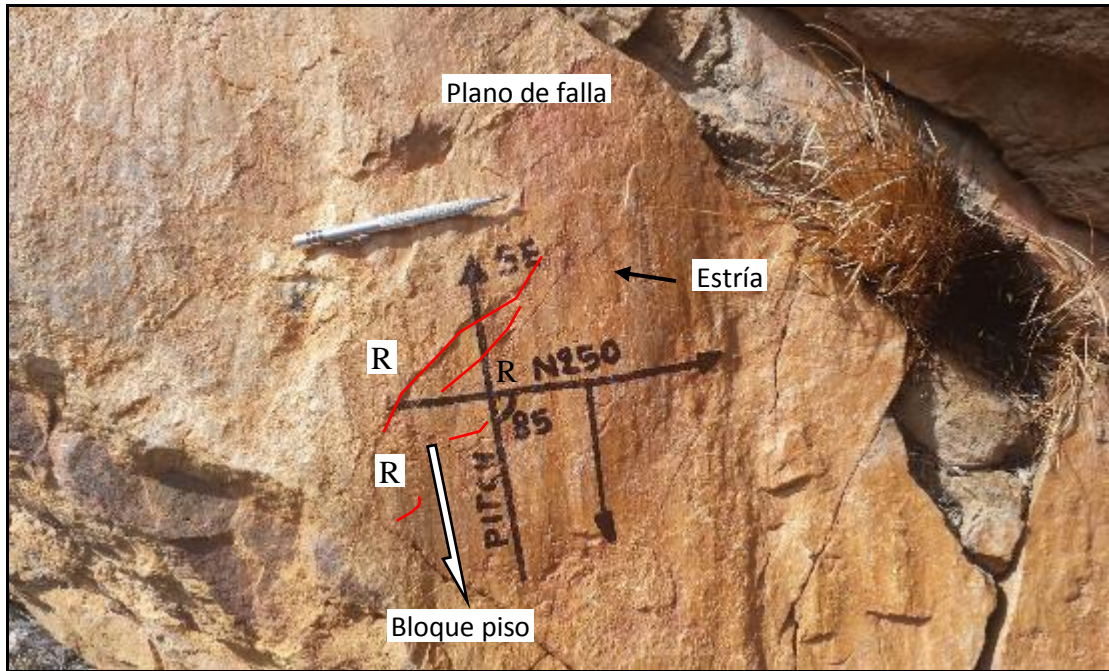
**Figura 43.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 19

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $25^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla dextral según interpretación de la foto 28, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N260.1^\circ$ , componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N353.7^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N168.7^\circ$ , generando falla dextral con movimiento hacia el NE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

### Estación N° 20

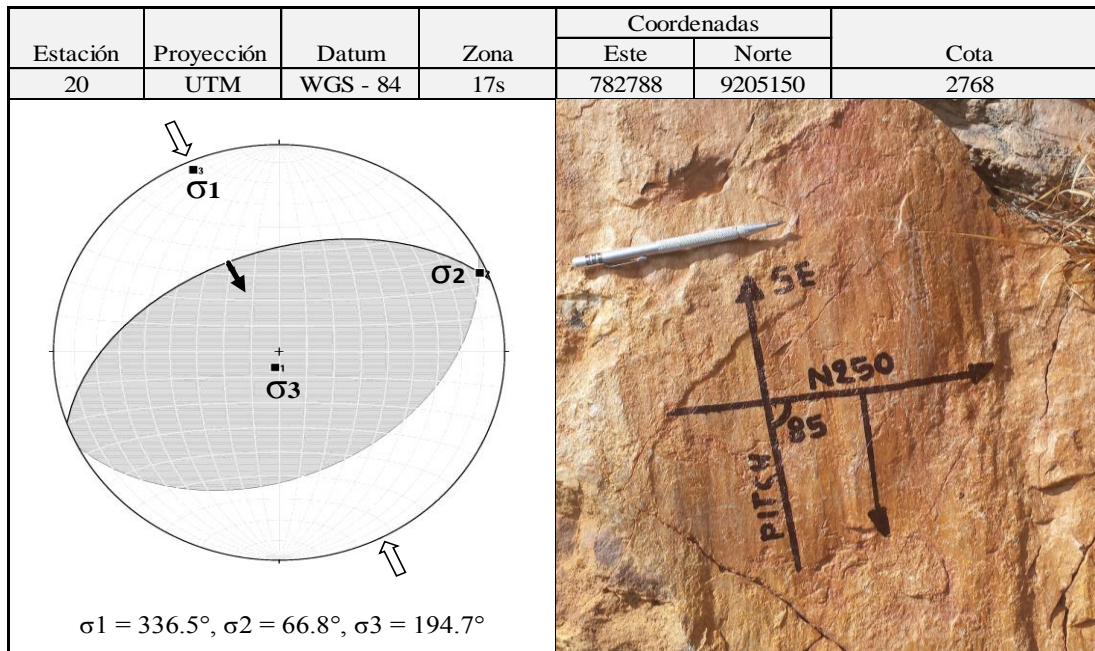
En la estación 20 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla inversa, Azimuth  $N250^\circ$ , Buzamiento  $50^\circ NW$ , pitch  $85^\circ$  con movimiento al SE (Fig. 44 – Foto. 29).





**Foto 29.** Interpretación microtectónica estación N° 20

Plano de falla inversa con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente  $15^\circ$ , fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.

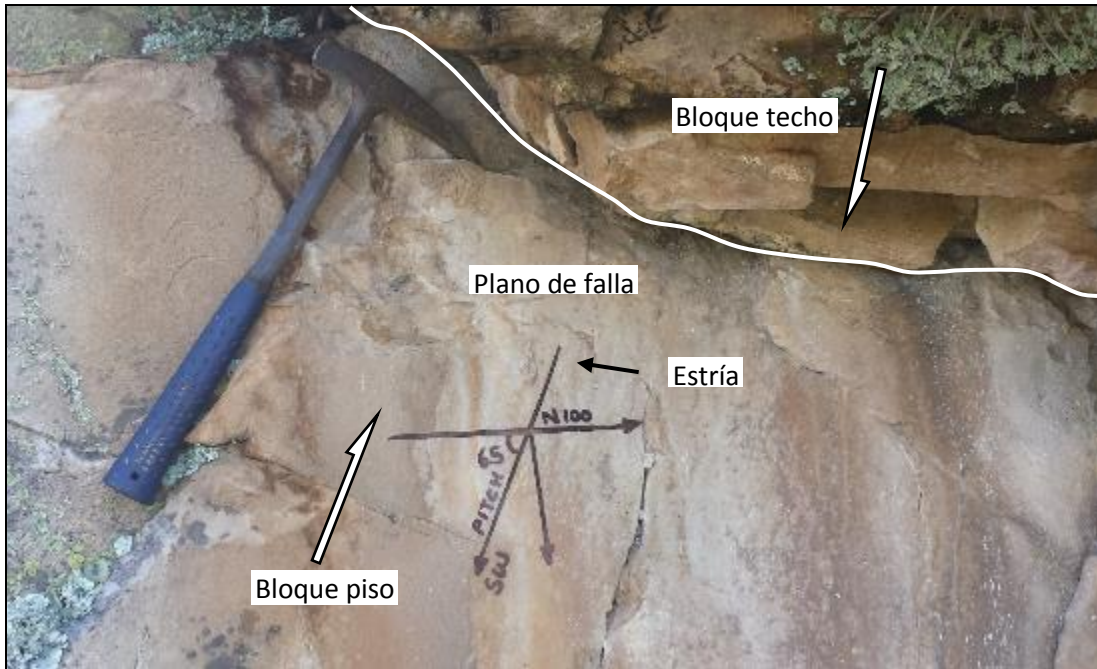


**Figura 44.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 20

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $85^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla inversa según interpretación de la foto 29, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N336.5^\circ$ , componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N66.8^\circ$  y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N194.7^\circ$ , generando falla inversa con movimiento hacia el SE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

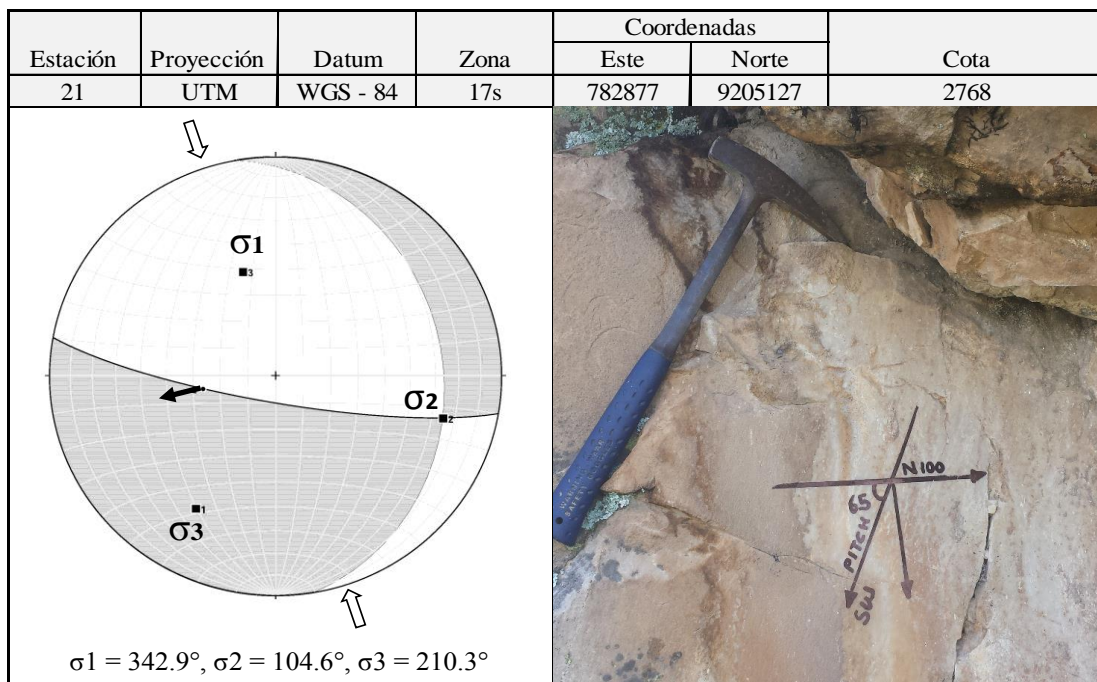
### Estación N° 21

En la estación 21 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla normal sinistral, Azimuth  $N100^\circ$ , Buzamiento  $80^\circ S$ , pitch  $65^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 45 – Foto. 30).



**Foto 30.** Interpretación microtectónica estación N° 21

Plano de falla normal sinistral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación entre bloques de falla nos indica el tipo de falla.

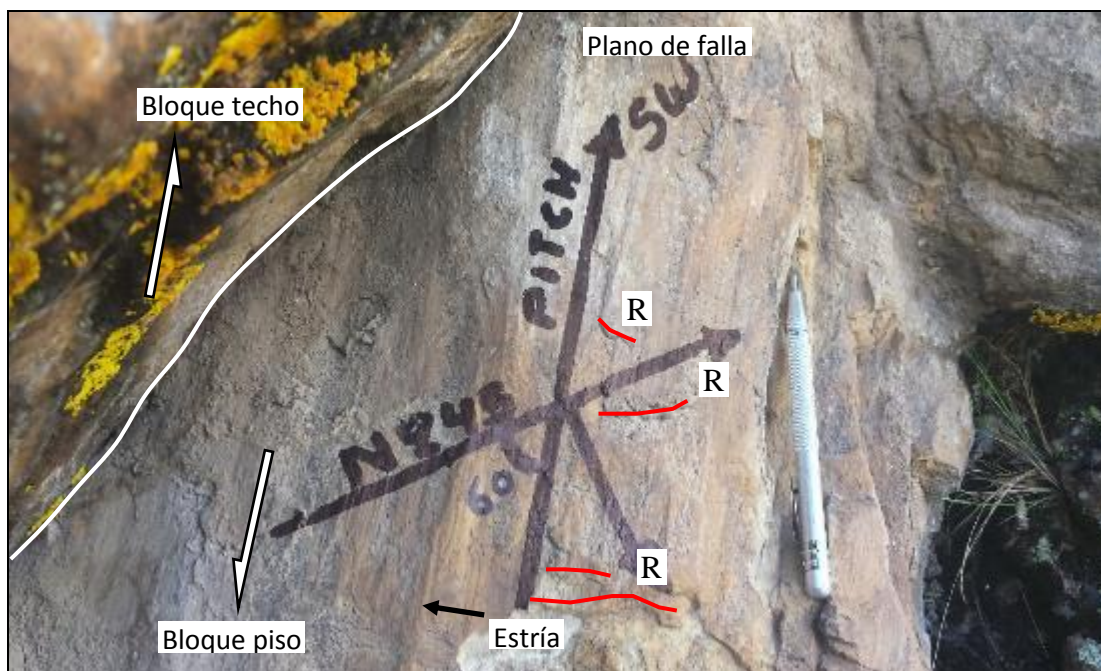


**Figura 45.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 21

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $65^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla normal sinestral según interpretación de la foto 30, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N342.9^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N104.6^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N210.3^\circ$ , generando falla normal dextral con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

### Estación N° 22

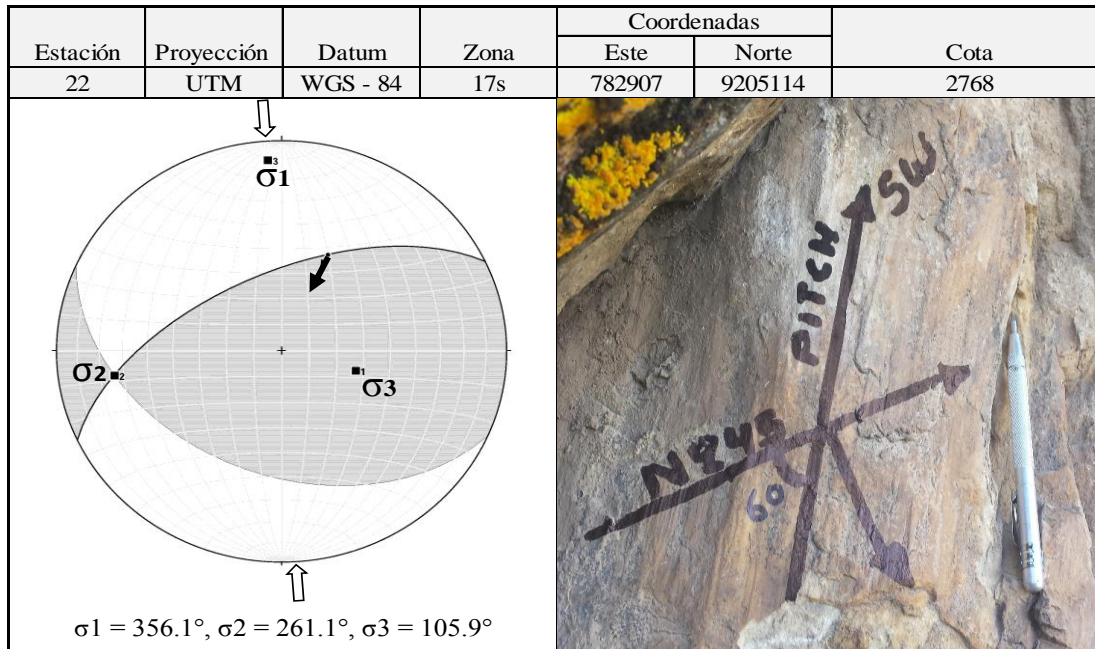
En la estación 22 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla inversa sinestral, Azimuth  $N245^\circ$ , Buzamiento  $60^\circ NW$ , pitch  $60^\circ$  con movimiento al SW (Fig. 46 – Foto. 31).



**Foto 31.** Interpretación microtectónica estación N° 22

Plano de falla inversa sinestral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel

en este caso tipo R (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 15°, fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.

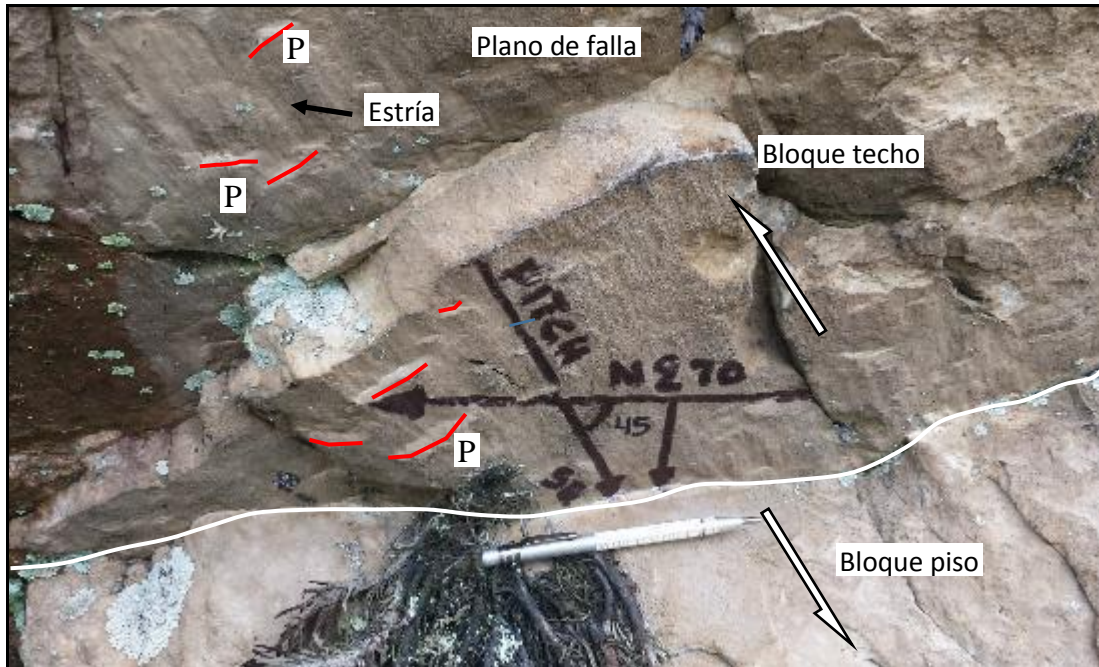


**Figura 46.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 22

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de 60° y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla inversa sinistral según interpretación de la foto 31, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N356.1°, componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección N261.1° y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N105.9°, generando falla dextral inversa sinistral con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

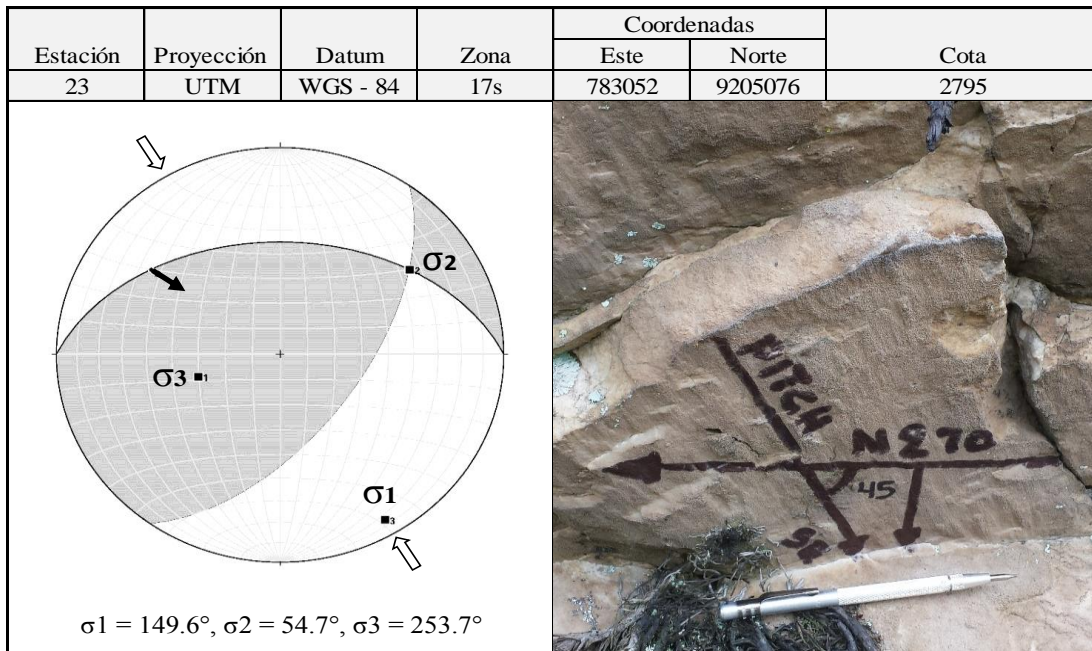
### Estación N° 23

En la estación 23 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla inversa dextral, Azimuth N270°, Buzamiento 45°SW, pitch 45° con movimiento al SE (Fig. 47 – Foto. 32).



**Foto 32.** Interpretación microtectónica estación N° 23

Plano de falla inversa dextral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la alternancia de planos uno estriado y otros sin estriar que generan escalones incongruentes P (Líneas de color rojo), según el criterio PT de Petit, 1987 dichos planos no estriados están formados opuestos al sentido de movimiento de la falla.

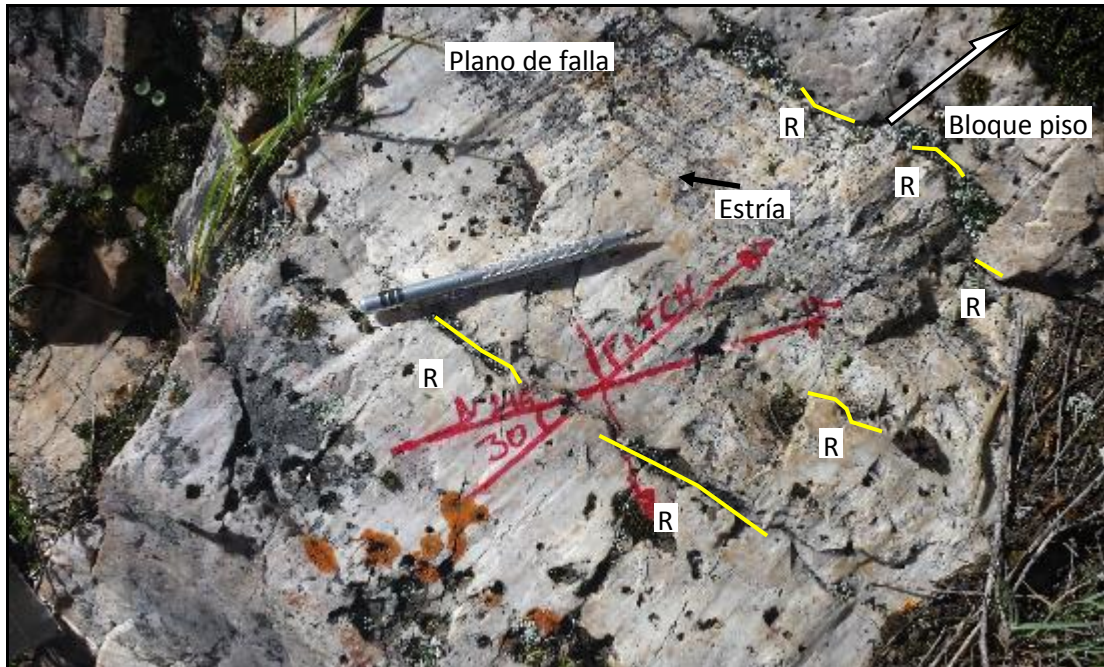


**Figura 47.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 23

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $45^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla inversa dextral según interpretación de la foto 32, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N149.6°, componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N54.7° y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección N253.7°, generando falla inversa sinistral con movimiento hacia el SW mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

### Estación N° 24

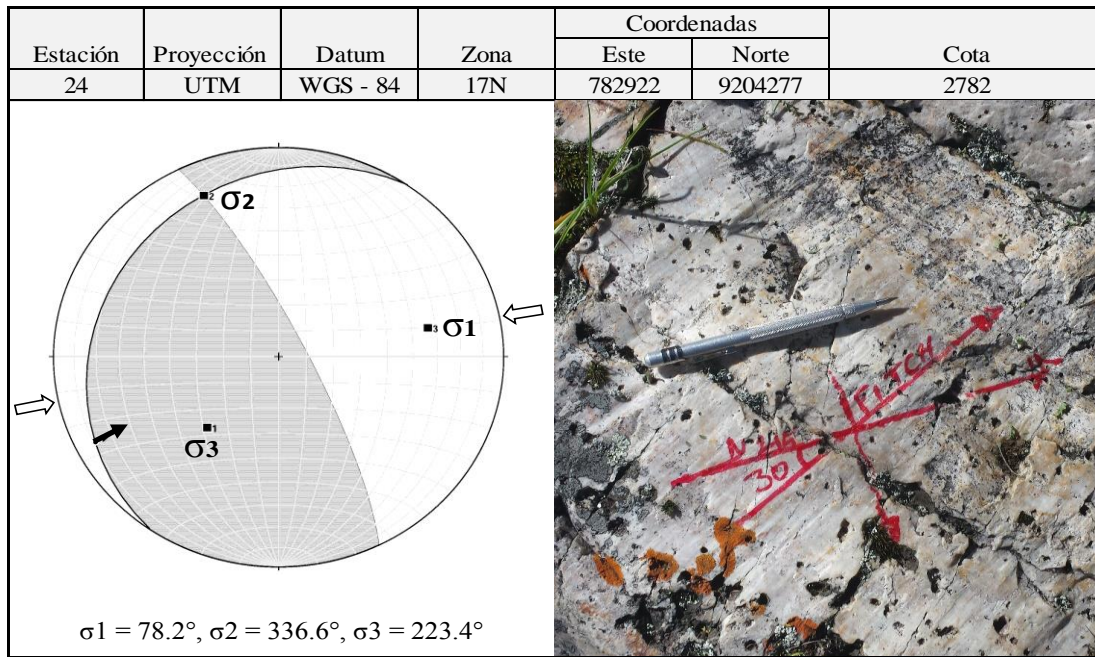
En la estación 24 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla dextral, Azimuth N215°, Buzamiento 20°NW, pitch 30° con movimiento al NE (Fig. 48 – Foto. 33).



**Foto 33.** Interpretación microtectónica estación N° 24

Plano de falla dextral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R (Líneas de color amarillo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 15°, fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.



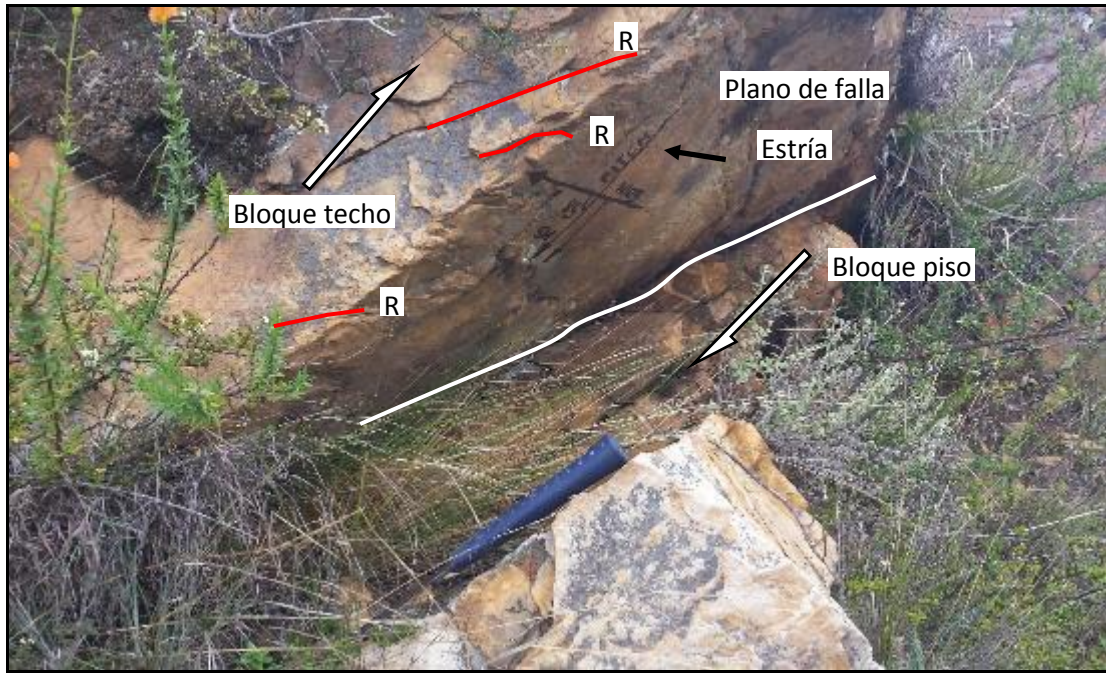


**Figura 48.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 24

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $30^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla dextral según interpretación de la foto 33, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N $78.2^\circ$ , componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección N $336.6^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N $223.4^\circ$ , generando falla dextral con movimiento hacia el NE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

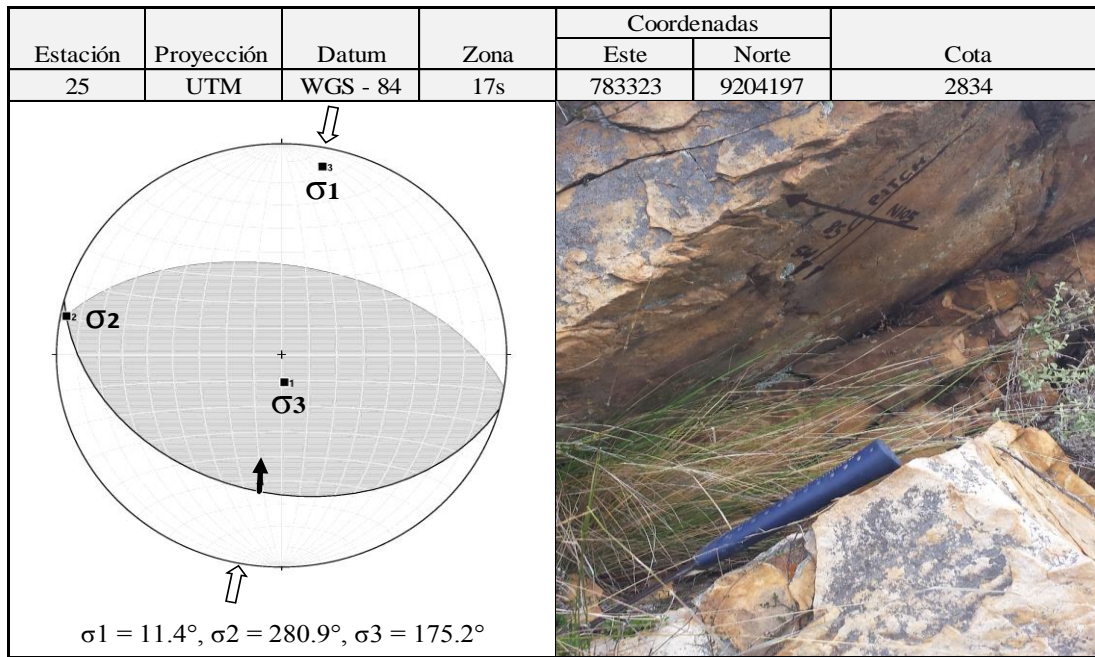
### Estación N° 25

En la estación 25 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla inversa, Azimuth N $105^\circ$ , Buzamiento  $35^\circ$ SW, pitch  $85^\circ$  con movimiento al NE (Fig. 49 – Foto. 34).



**Foto 34.** Interpretación microtectónica estación N° 25

Plano de falla inversa con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R (Líneas de color rojo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente  $15^\circ$ , fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.

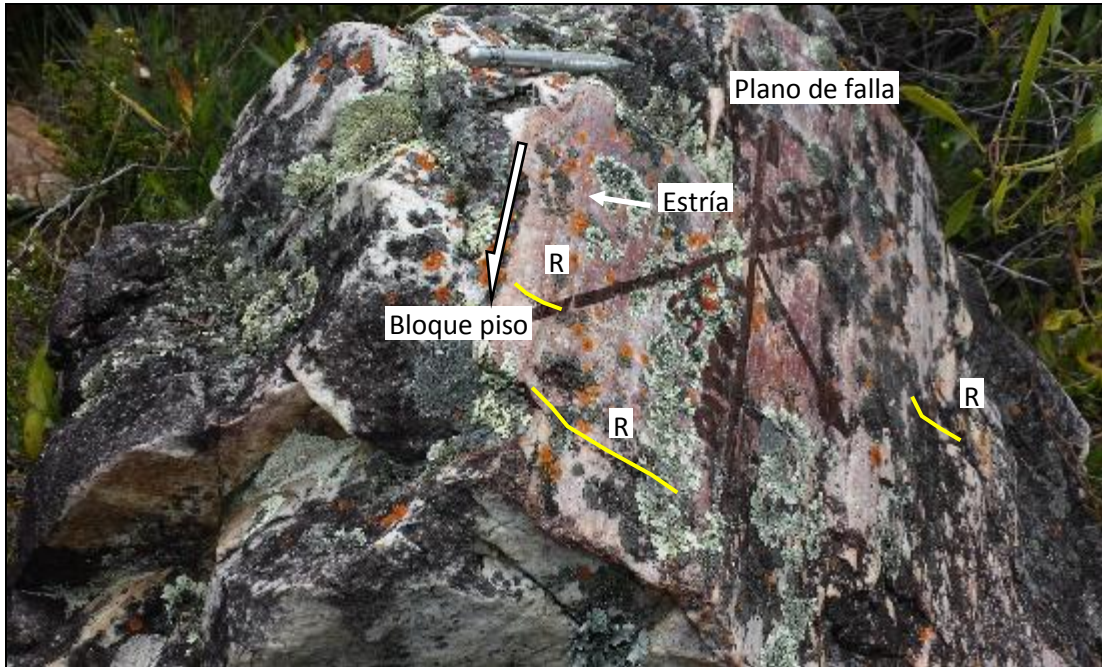


**Figura N° 49.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 25

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $85^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla inversa según interpretación de la foto 34, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección  $N11.4^\circ$ , componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección  $N280.9^\circ$  y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección  $N175.2^\circ$ , generando falla inversa con movimiento hacia el NE mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.

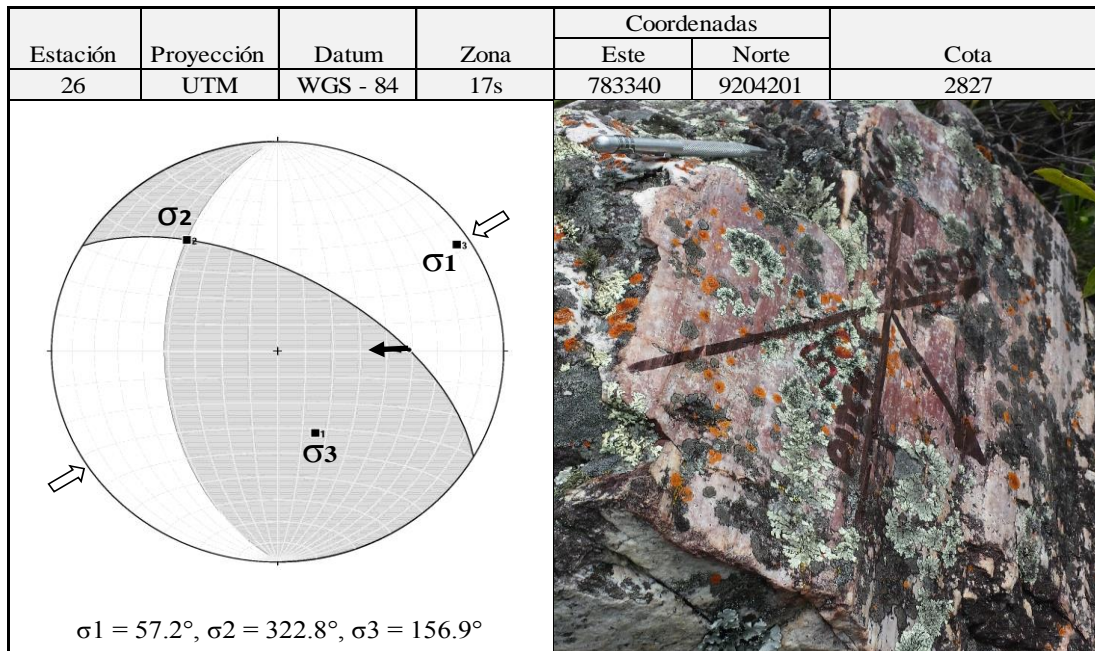
### Estación N° 26

En la estación 26 se tomó datos de 1 punto, Plano de falla sinestral, Azimuth N300°, Buzamiento 60°NE, pitch 80° con movimiento al SW (Fig. 50 – Foto. 35).



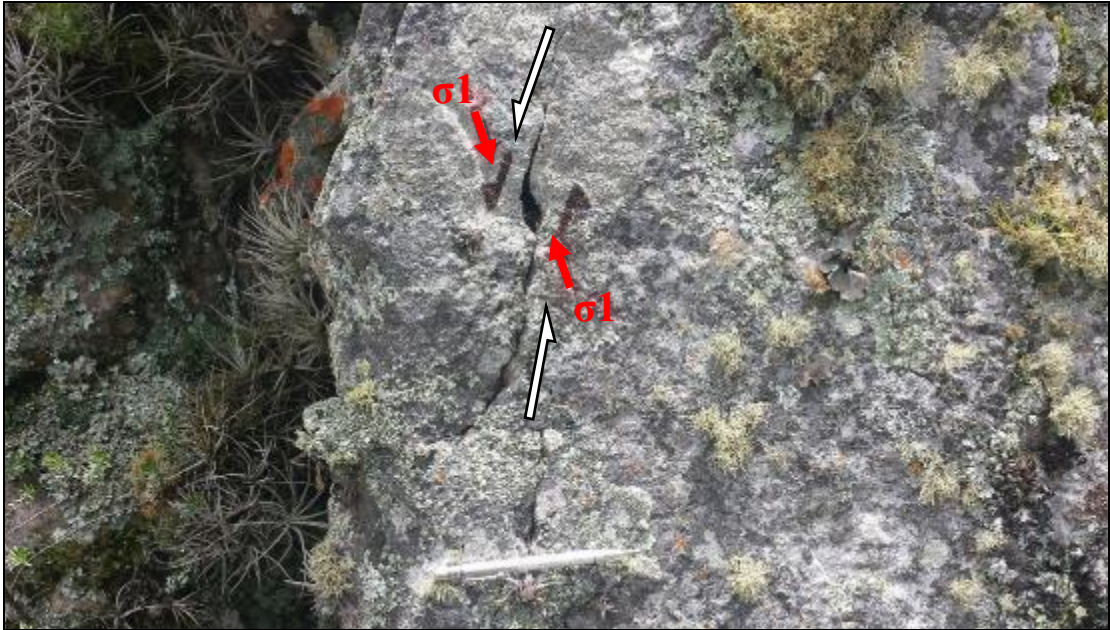
**Foto 35.** Interpretación microtectónica estación N° 26

Plano de falla sinistral con indicadores cinemáticos, se evidencia notable elemento estriador que se imprime en el plano de falla en la cual dicha estría constituye primer indicador cinemático, así mismo la relación de ángulos de fracturas con respecto al plano de falla constituirían segundo indicador cinemático conocidas como fracturas tipo Riedel en este caso tipo R (Líneas de color amarillo) según el criterio RO de Petit, 1987 el cual forman un ángulo agudo con respecto al plano de falla de aproximadamente 15°, fracturas (R) con dirección opuesta al sentido de movimiento del bloque faltante, denominadas fracturas incongruentes.



**Figura 50.** Interpretación de dirección de esfuerzos estación N° 26

Según los datos de la Tabla 03 y la imagen del lado derecho muestra que el pitch es de  $50^\circ$  y de acuerdo a la nomenclatura utilizada para clasificar falla basada en el ángulo de pitch se trataría de una falla sinistral según interpretación de la foto 35, con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N $57.2^\circ$ , componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección N $322.8^\circ$  y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N $156.9^\circ$ , generando falla sinistral con movimiento hacia el W mostrándose en la estereografía con una flecha de color negro.



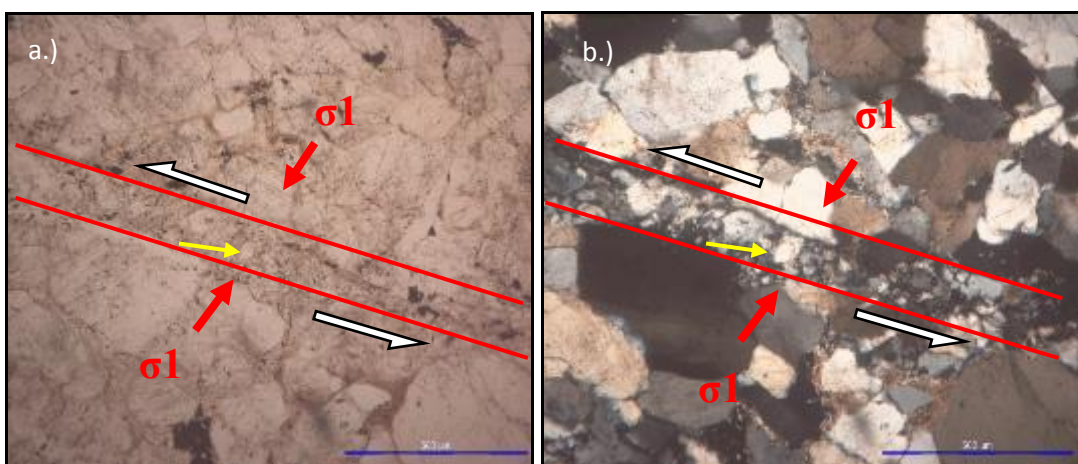
**Foto 36.** Interpretación de dirección de esfuerzos en fractura de tensión

Fractura de tensión con movimiento sinistral formando un lazo sigmoide, según Anderson son causados por esfuerzos, componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ), componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ).

### 3.8.3 Análisis microscópico

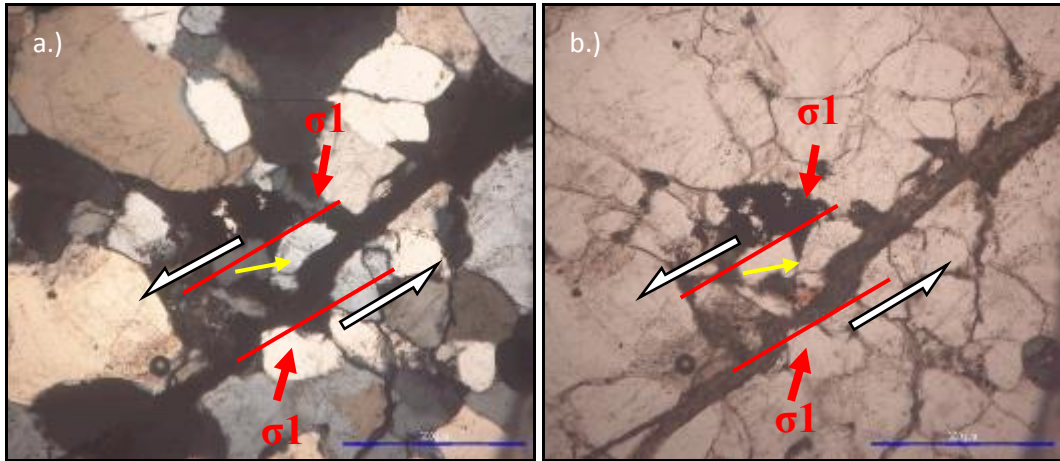
#### Muestra N° 1

Muestra de afloramiento de arenisca de la Fm. Farrat del área de investigación con ubicación, E: 784237, N: 9204971, C: 2804.



**Foto 37.** Microfotografía de sección delgada escala 500um, propiedades ópticas a.) Nícoles paralelos, b.) Nícoles cruzados, muestra N° 1 - vista 1

Muestra de areniscas de la Fm. Farrat, arenisca de grano medio a grueso, con minerales opacos depositado en fisuras según imagen de nicoles paralelos, deformación de un cristal de cuarzo (flecha color amarillo) formando un lazo sigmoide en zona de microbrecha, según la teoría de Anderson son causados por esfuerzos, componente compresivo ( $\sigma_1$ ).

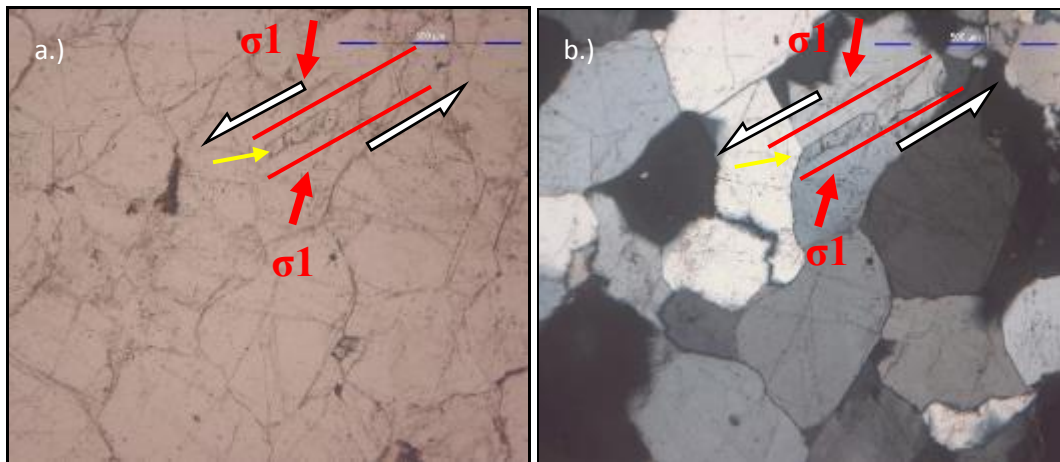


**Foto 38.** Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 1 – vista 2.

Muestra de areniscas de la Fm. Farrat, arenisca de grano medio a grueso con depósito de minerales opacos en fisuras entre grano y grano, estructura rellena por minerales opacos color oscuro (flecha color amarillo) que ha sido sometida a esfuerzos de compresión ( $\sigma_1$ ) originado microfalla de movimiento sinistral, según la teoría de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos, componente horizontal compresivo ( $\sigma_1$ ), componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ).

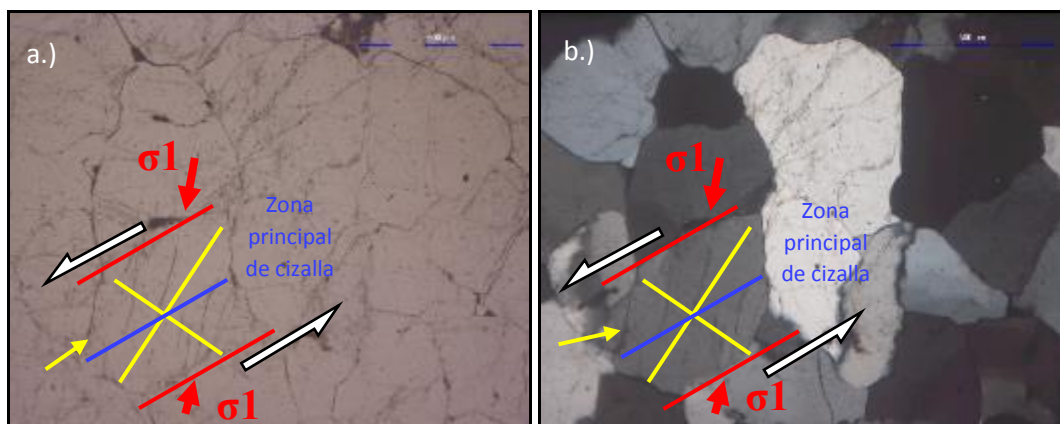
## Muestra N° 2

Muestra de afloramiento de arenisca de la Fm. Farrat del área de estudio con ubicación, E: 784112, N: 9204867, C: 2790.



**Foto 39.** Microfotografía de sección delgada, escala 500 $\mu\text{m}$ , propiedades ópticas a.) Nícoles paralelos, b.) Nícoles cruzados, muestra N° 2 – vista 1

Muestra de areniscas de la Fm. Farrat, arenisca de grano medio a grueso, con microfractura oblicuas de cizalla (flecha color amarillo) generado por esfuerzos de componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ), con movimiento sinistral.



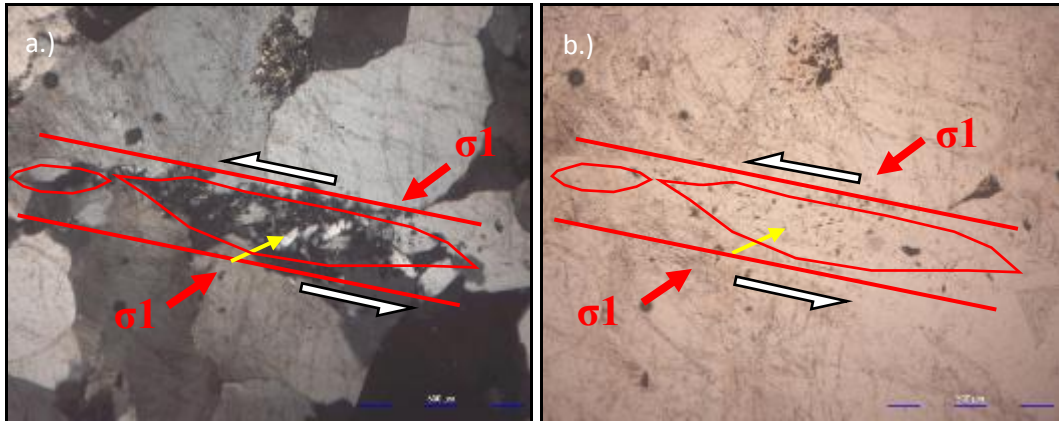
**Foto 40.** Microfotografía de sección delgada, escala 500 $\mu\text{m}$ , propiedades ópticas a.) Nícoles paralelos, b.) Nícoles cruzados, muestras N°2 – vista 2.

Muestra de areniscas de la Fm. Farrat, arenisca de grano medio a grueso, con deformación de grano de cuarzo a forma alargada, orientado por el eje mayor de elongación, ocasionado por el resultado de interacción de esfuerzos compresivos ( $\sigma_1$ ), generando microfracturas de cizalla en echelon (flecha color amarillo) con movimiento sinistral.



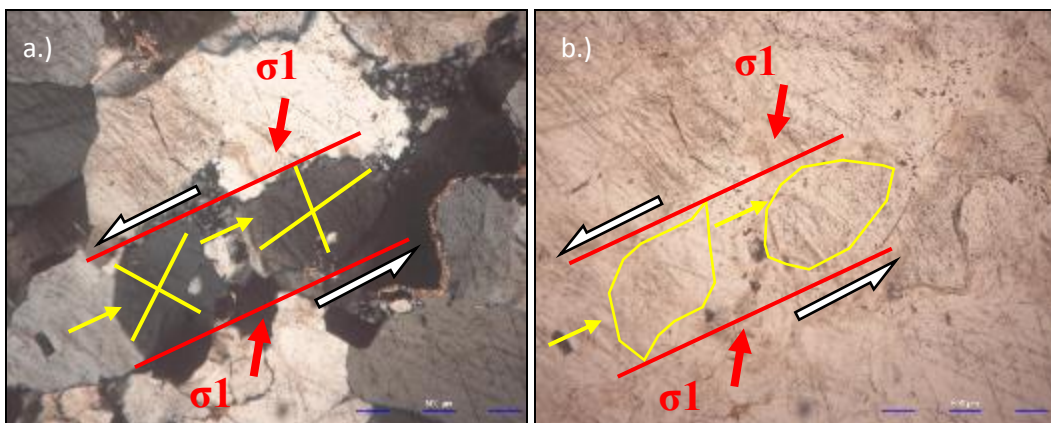
### Muestra N° 3

Muestra de afloramiento de arenisca de la Fm. Farrat del área de estudio con ubicación, E: 782907, N: 9205114, C: 2768.



**Foto 41.** Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 3 – vista 1

Muestra de areniscas de la Fm. Farrat, arenisca de grano medio a grueso, lentificación indicando sentido de movimiento sinistral interpretado de acuerdo al alineamiento y desplazamiento de fragmentos de cuarzo en la zona central de la estructura tipo lente indicados por una flecha color amarillo que se ha generado como resultados de la interacción de esfuerzo compresivo ( $\sigma_1$ ).

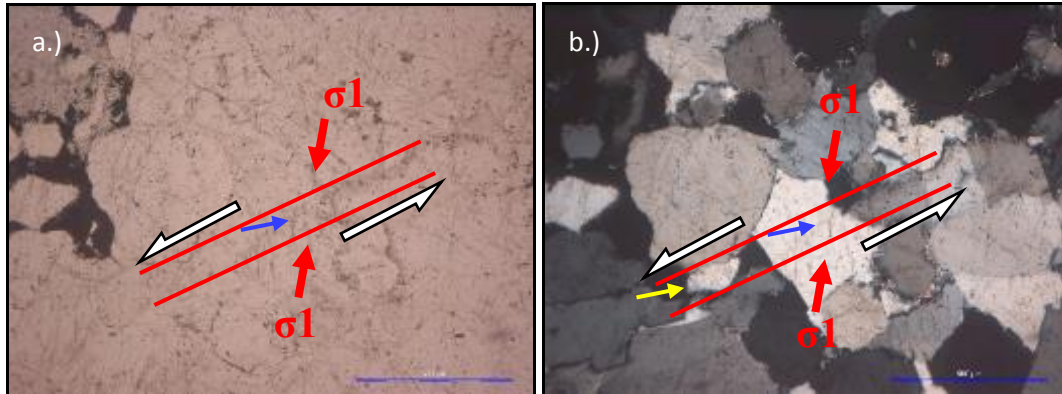


**Foto 42.** Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas de a.) Nicoles cruzados, b.) Nicoles paralelos, muestra N° 3 – vista 2.

Muestra de areniscas de la Fm. Farrat, arenisca de grano medio a grueso, deformación de granos de cuarzo, orientado por el eje mayor de elongación, generados por componente compresivo ( $\sigma_1$ ), con movimiento sinistral.

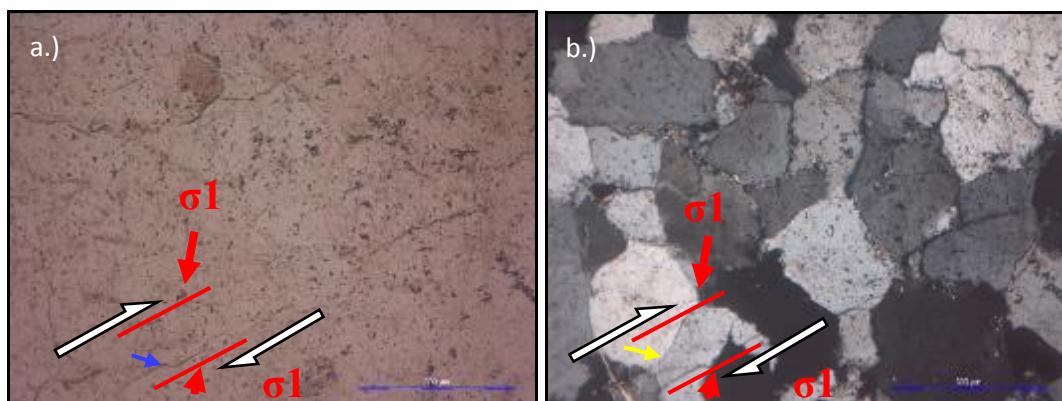
### Muestra N° 4

Muestra de afloramiento de arenisca de la Fm. Farrat del área de estudio con ubicación, E: 783323, N: 9204197, C: 2834.



**Foto 43.** Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas de a.) Nícoles paralelos, b.) Nícoles cruzados, muestra N° 4 – vista 1

Muestra de areniscas de la Fm. Farrat, arenisca de grano medio a grueso, deformación de granos de cuarzo, orientado por el eje mayor de elongación (flecha color amarilla), zona de cizalla (flecha color azul), con fracturas de cizalla R generados por componente compresivo ( $\sigma_1$ ), con movimiento sinistral.



**Foto 44.** Microfotografía de sección delgada, escala 500um, propiedades ópticas de a.) Nícoles paralelos, b.) Nícoles cruzados, muestra N° 4 – vista 2

Muestra de areniscas de la Fm. Farrat, arenisca de grano medio a grueso, zona de cizalla, microfractura con salto transcurrete destal (flecha color azul), estructuras tipo sigmoides (flechas color amarillo) producto de la deformación de un grano de cuarzo, indicando también el sentido del movimiento; generados por componente compresivo ( $\sigma_1$ ).

## **CAPÍTULO IV.**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Se han estudiado 26 estaciones de fallas, seis de ellas situadas en rocas detríticas de la Formación Carhuáz ubicadas al SE del área de investigación, y veinte en areniscas de la Formación Farrat en la parte N y SW. La orientación de los planos de fallas medidos en campo se resume en la Tabla 03, estas estructuras presentan una orientación preferencial NW-SE y otro de menor tendencia NE-SW como se aprecia en la rosa estructural de la Fig. 20; su buzamiento es de ángulos elevados.

De esta información, se derivan paleo-tensores de esfuerzos elaborados con el software FaultKin 6 basado en el método de los diedros rectos, que se aplicaron a todas las fallas medidas en cada estación. Este método es un procedimiento gráfico que proporciona la orientación aproximada de los ejes de esfuerzos ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ).

Al SE del área de investigación encontramos las estaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6, referente a planos de fallas con orientaciones NW-SE, buzando predominantemente al SW con valores que varían entre 55° a 85°. Los indicadores cinemáticos que predominan son estrías de fallas y en algunas estaciones sistemas de fracturas tipo Riedel (indicadores cinemáticos) que han permitido identificar el tipo de falla. Los datos tomados en campo y el análisis con el método de diedros rectos de la estación 1 y 6 se determinó que son fallas destral normal, en ambos casos también se basó en el ángulo pitch (cabeceo) para definir su cinemática. En cuanto a las estaciones 2 y 3 son fallas normales, mientras la 4 y 5 son fallas inversas, estas presentan ángulos de pitch alto entre 80° a 90°.

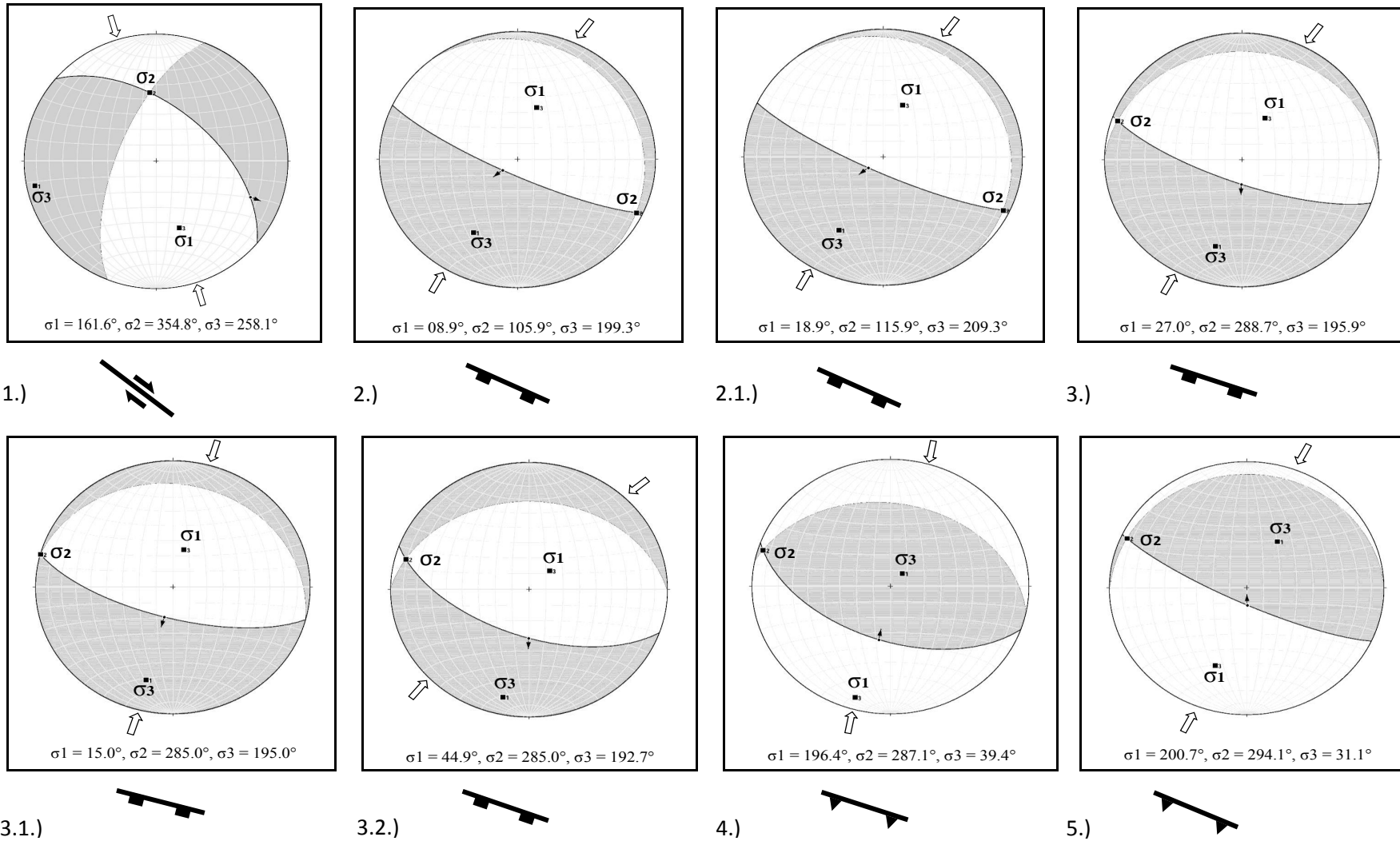
De las estaciones 7, 8, 9, 10, 11 y 12 ubicados al NE del área, los planos de fallas presentan una orientación preferencial NE-SW a diferencia de dos estaciones con orientación SE-NW. Se ha determinado que la estación 7 y 12 presentan una cinemática de falla normal con ángulo de pitch de 90° y 80°, buzamiento al NE y SW respectivamente, generados en regímenes extensionales con el esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) vertical. De las estaciones 8 y 11 la cinemática identificada es sinistral y destral con ángulo de pitch de 20° y 15°.

buzando al SW y NE respectivamente cuyo esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) es horizontal y el esfuerzo principal menor ( $\sigma_2$ ) es vertical. En cuanto a la estación 9 y 10 presenta una cinemática de falla normal sinestral y falla normal dextral con pitch de  $70^\circ$  y  $60^\circ$ , buzando al SE y SW; generados en regímenes extensionales.

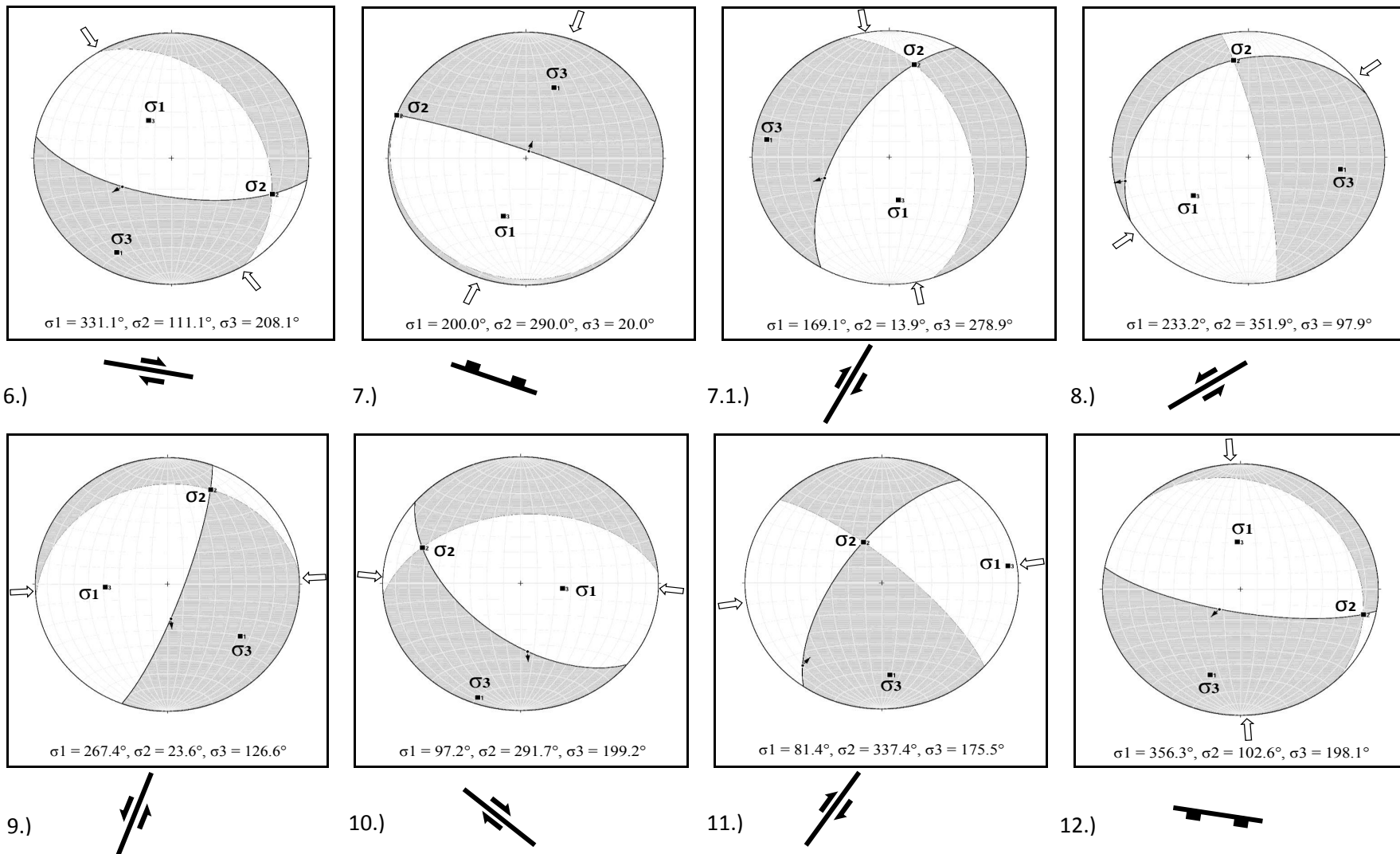
En las estaciones 13, 16, 19, 21, 22 y 23 ubicadas al NW del área, presentan planos de fallas con orientación NE-SW y NW-SE, buzando al NW y SW con valores entre  $45^\circ$  a  $85^\circ$ ; estas estructuras presentan cinemáticas características de fallas normales con componentes tanto dextral como sinestral correspondientes a las estaciones 13 – 21 y fallas inversas con componente sinestral y normal de la estación 22 y 23 respectivamente, estas estructuras han sido generadas en regímenes de esfuerzo extensional y compresivos, con la ubicación del esfuerzo principal mayor ( $\sigma_1$ ) vertical y en ocasiones horizontales. Analizando la estación 14 y 15 presenta una cinemática normal, de la 17 y 18 cinemática dextral y la estación 20 presentan cinemática inversa.

Las estaciones 24, 25 y 26 ubicadas al SW del área presentan planos de fallas de orientación NW-SE y NE-SW, describen una cinemática de falla dextral, inversa y sinestral respectivamente identificadas mediante sistemas de fracturas Riedel, estas estructuras presentan pitch de  $30^\circ$  y  $50^\circ$  para fallas de cinemática horizontal y pitch de  $85^\circ$  para falla inversa con regímenes compresional.

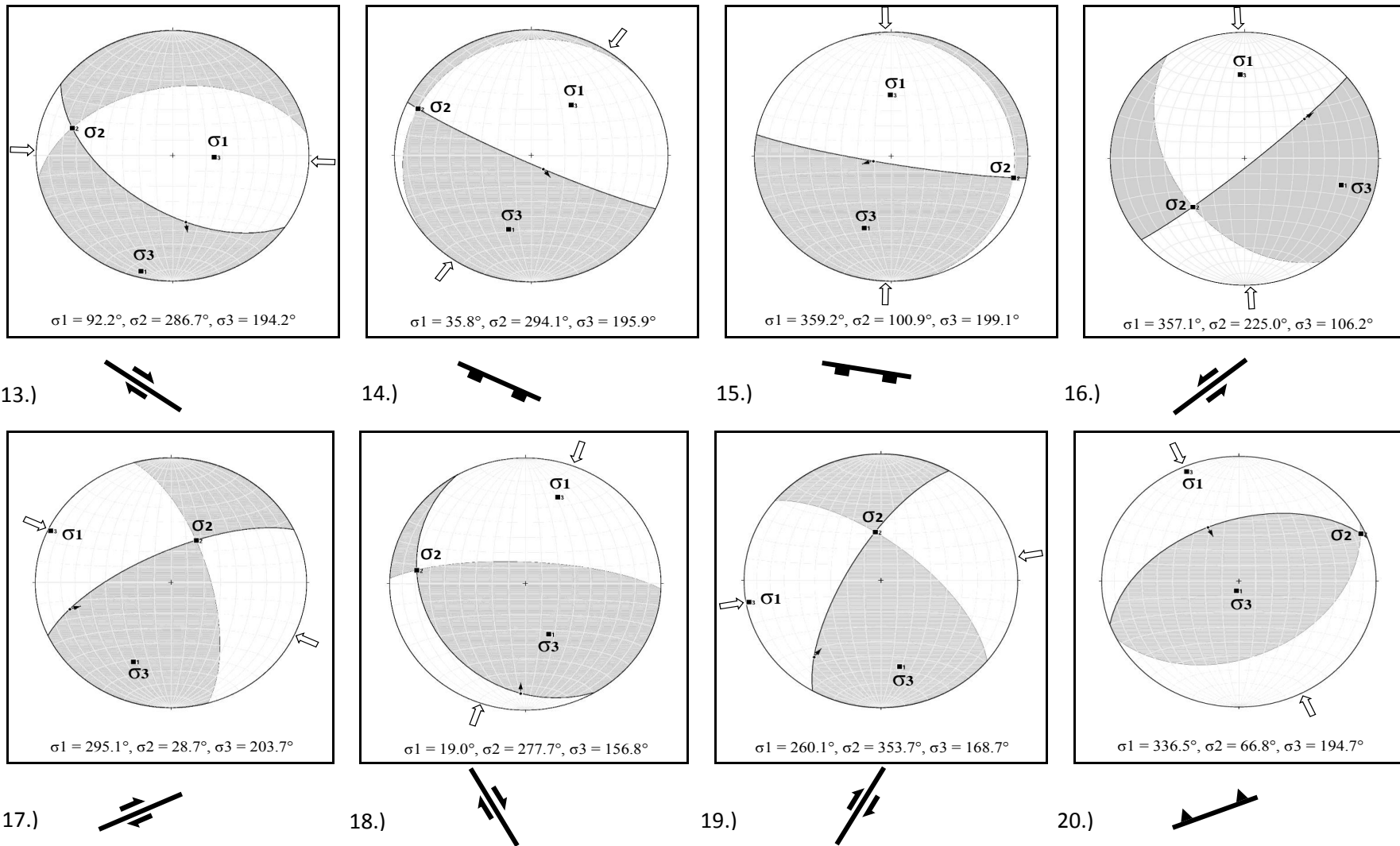
El análisis petrográfico de muestras de rocas, han evidenciado estructuras de deformación a escala microscópica tipo sigmoidal y sistemas de fracturas cizalla sintéticas tipo Riedel. Otro de los criterios del sentido de movimiento es la orientación preferente de cristales de cuarzo, cuya oblicuidad indica el sentido del movimiento, de acuerdo al eje mayor de deformación (foto 37 – foto 44). Estos indicadores cinemáticos a escala microscópica indican regímenes de esfuerzo compresivo acordes al comportamiento de la falla regional (Falla Cajamarca) de dirección NW-SE, con una cinemática inverso dextral.



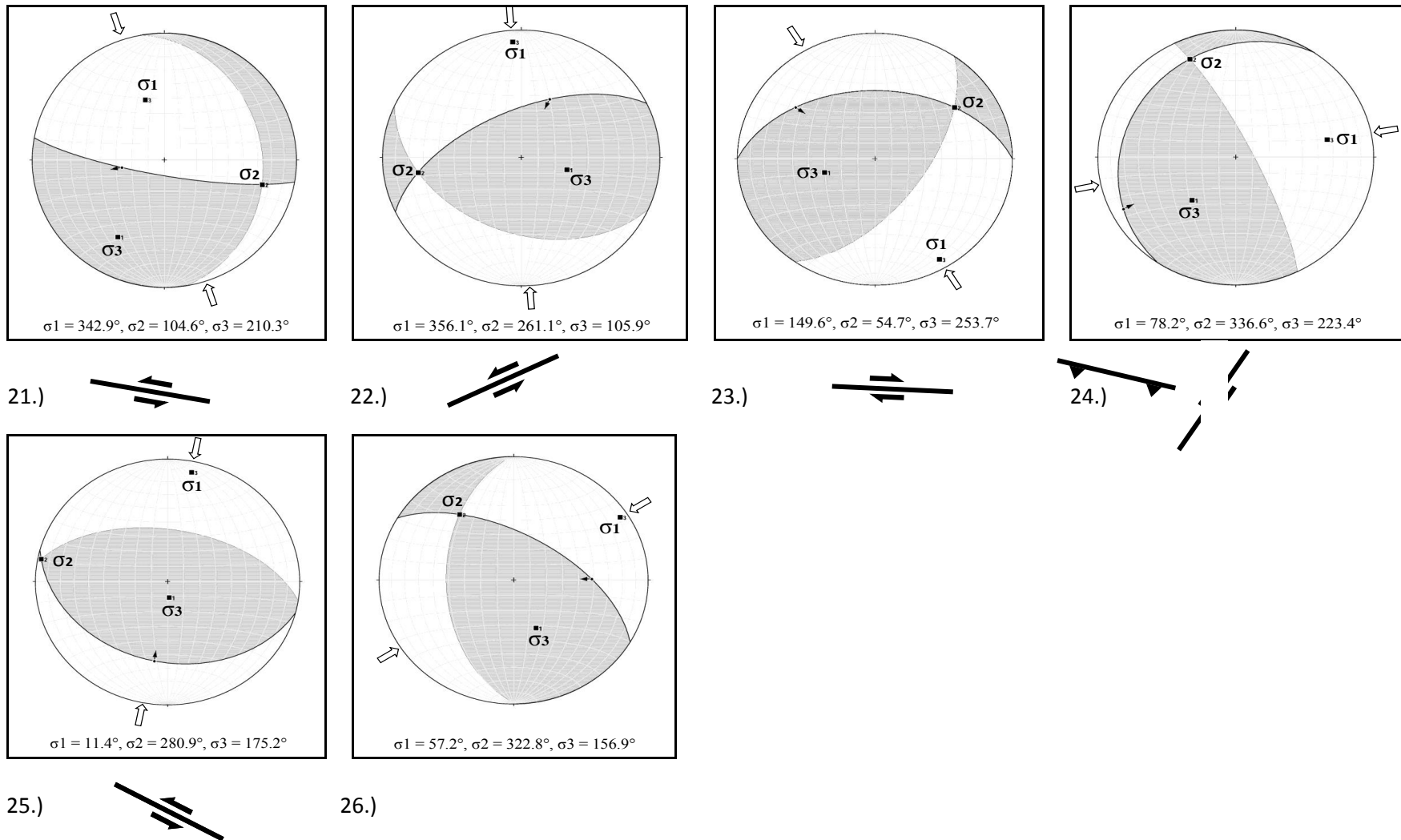
**Figura 51.** Análisis de resultados dirección de esfuerzos versus rumbo de falla, estación N° 1 – estación N° 5



**Figura 52.** Análisis de resultados dirección de esfuerzos versus rumbo de falla, estación N° 6 – estación N° 12



**Figura 53.** Análisis de resultados dirección de esfuerzos versus rumbo de falla, estación N° 13 – estación N° 20



**Figura 54.** Análisis de resultados dirección de esfuerzos versus rumbo de falla, estación N° 21 – estación N° 26

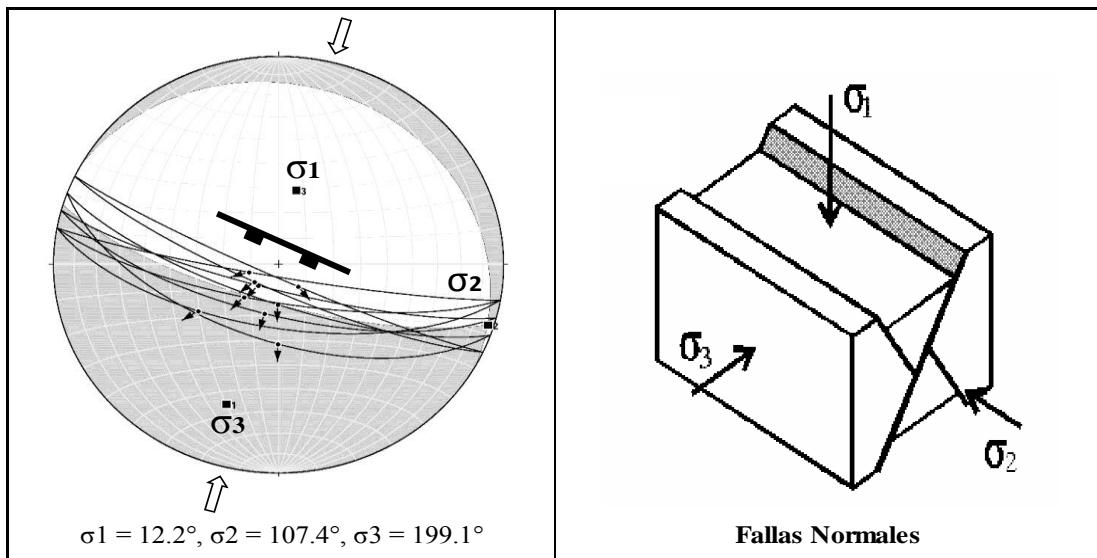


Finalmente se hizo un análisis en conjunto, agrupándolos por tipo de fallas, según los datos obtenidos en campo se recopiló 9 datos de fallas normales, 4 datos de fallas inversas y 17 datos de fallas de rumbo, de las cuales se obtiene el siguiente análisis.

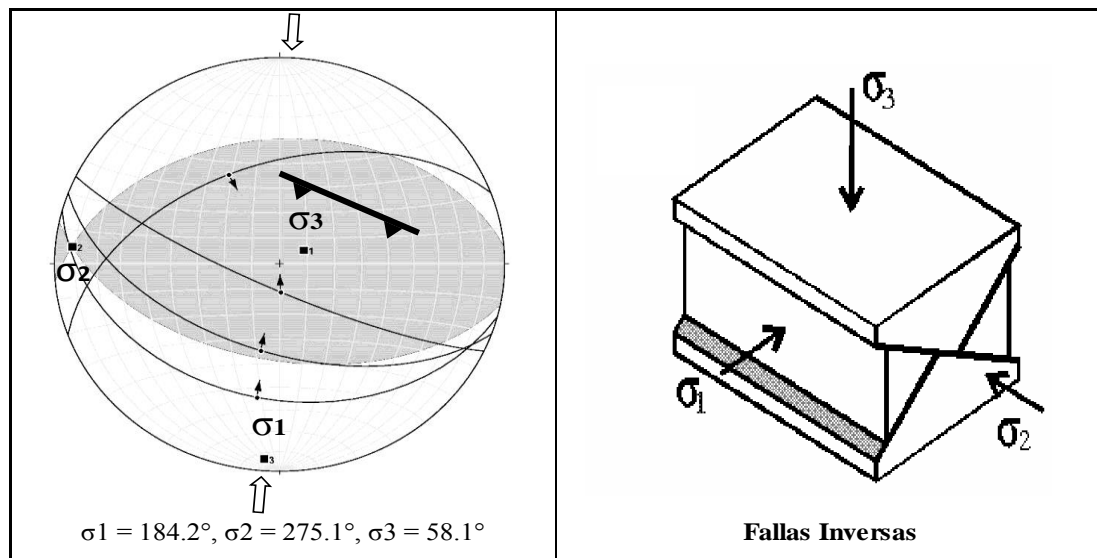
En la figura 55 se tiene un análisis en conjunto para fallas normales; con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), con tendencias de rumbos NW-SE, cinemática con una tendencia de SE a SW con mayor cantidad al SW, según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos de componente compresivo vertical ( $\sigma_1$ ) con dirección N12.2° (NE-SW), componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N107.4° (NW-SE) y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N199.1° (NE-SW).

En la figura 56 se tiene un análisis en conjunto para fallas inversas; con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), con tendencias de rumbos NW-SE, cinemática con una tendencia al NE, según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos de componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N184.2° (NE-SW), componente extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) con dirección N275.1° (NW-SE) y componente extensivo vertical ( $\sigma_3$ ) con dirección N58.1° (NE-SW).

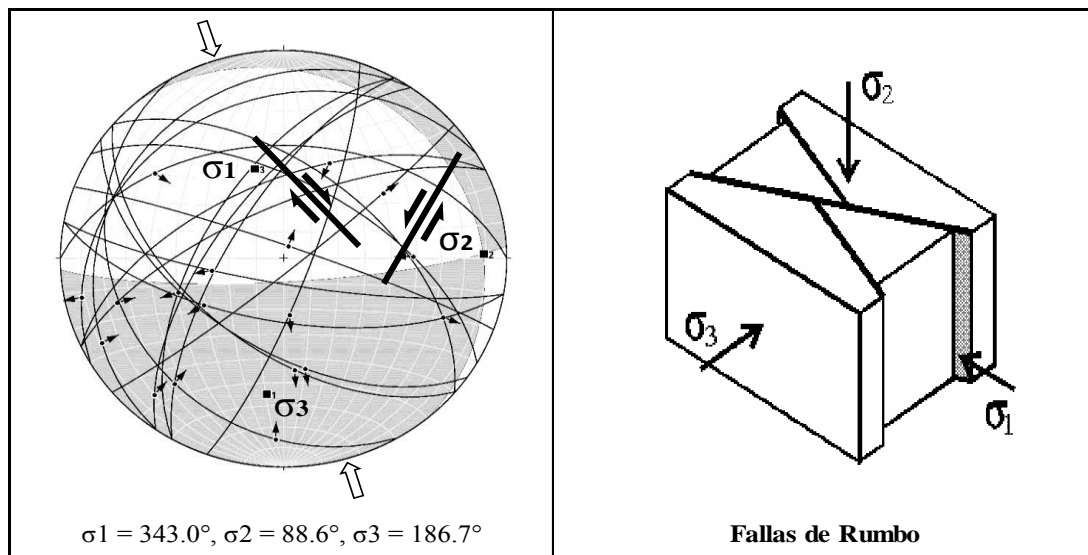
En la figura 57 se tiene un análisis en conjunto para fallas de rumbo; con respecto a la estereografía según el método de Diedros Rectos y FaultKin de Allmendinger (Marret y Allmendinger, 1990, 1991) muestra campos de extensión (Color gris) y campos de acortamiento (Color blanco), con tendencias de rumbos NW-SE y NE-SW, cinemática con tendencias de SE a SW y en menor cantidad al NE, según el método de Anderson, 1905 son causados por esfuerzos de componente compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ) con dirección N343.0° (NW-SE), componente extensivo vertical ( $\sigma_2$ ) con dirección N88.6° (NE-SW) y componente extensivo horizontal ( $\sigma_3$ ) con dirección N186.7° (NE-SW).



**Figura 55.** Resultados de dirección de esfuerzos de fallas normales y conceptos teóricos de Anderson, 1905.



**Figura 56.** Resultados de dirección de esfuerzos de fallas inversas y conceptos teóricos de Anderson, 1905.



**Figura 57.** Resultados de dirección de esfuerzos de fallas de rumbo y conceptos teóricos de Anderson, 1905.

En la figura 58 se tiene como resultado final la interpretación de la dirección de esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ), ( $\sigma_2$ ) y ( $\sigma_3$ ) que dieron lugar a la formación de la falla inversa dextral denominada Falla Cajamarca, las cuales dichos esfuerzos tiene como componente compresivo ( $\sigma_1$ ) con dirección NE-SW, componente extensivo ( $\sigma_2$ ) con dirección E-W, componente extensivo ( $\sigma_3$ ) con dirección NW-SE, según el método de Anderson estos esfuerzos sería de carácter compresivo horizontal ( $\sigma_1$ ), de carácter extensivo horizontal ( $\sigma_2$ ) y carácter extensivo vertical ( $\sigma_3$ ); dichos esfuerzos han tenido influencia generando estructuras secundarias como fallas normales con dirección NW-SE y esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ) con dirección NE-SW, fallas inversas con dirección NW-SE y esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ) con dirección NE-SW y fallas de rumbo con dirección NW-SE y NE-SW y esfuerzo principal ( $\sigma_1$ ) con dirección NW-SE, detallados en la descripción de las figuras 55, 56 y 57.

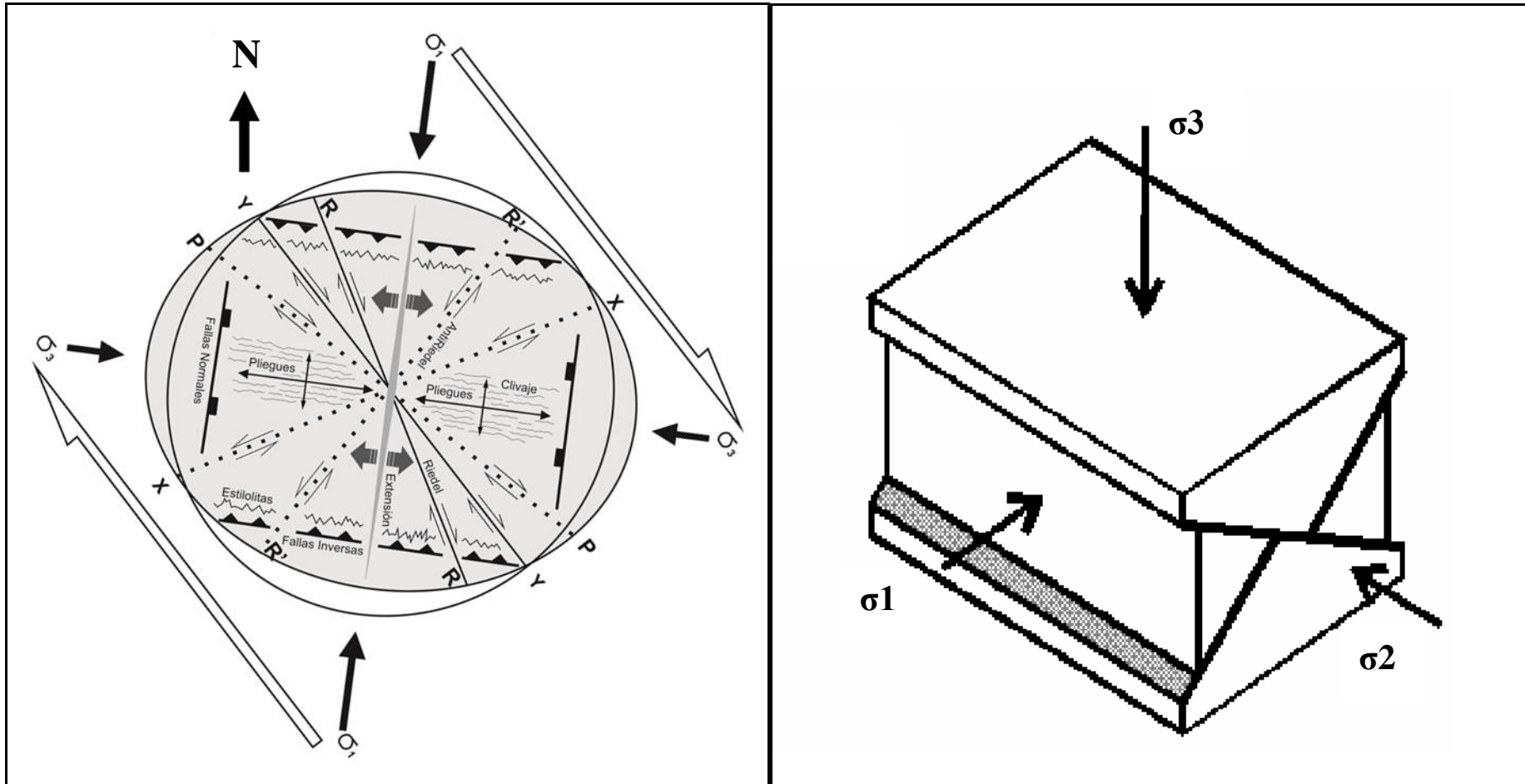


Figura 58. Resultado final de dirección de esfuerzos de la Falla Cajamarca y concepto teórico de Anderson, 1905.

## **CAPÍTULO V.**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

Del análisis del estudio de influencia microtectónica de la Falla Cajamarca, a partir de sus regímenes tectónicos compresivos, han generado estructuras secundarias como fallas normales, inversas y de rumbo, las cuales son de influencia local y de acuerdo al análisis poblacional de dichas estructuras secundarias presentan tendencia de rumbo similar a la falla principal (Falla Cajamarca) que es NW-SE.

Del análisis microtectónico mediante secciones delgadas se afirma la influencia microtectónica de la Falla Cajamarca existe, y se manifiesta mediante deformación de granos de arenisca y microestructuras de cizalla.

Se determinó que los esfuerzos secundarios generados por la Falla Cajamarca son de orientación NE-SW para fallas normales, NE-SW para fallas inversas y NW-SE para fallas de rumbo; notándose que las dos primeras presentan la misma dirección de esfuerzos que la falla principal y la tercera su componente de rumbo NW-SE.

Según la tendencia de la dirección de los esfuerzos secundarios que han dado origen estructuras secundarias, estos presentan una dirección NE-SW por lo que se puede afirmar que la dirección de los esfuerzos principales de la Falla Cajamarca es  $\sigma_1$  con dirección NE-SW componente compresivo de carácter horizontal,  $\sigma_2$  con dirección E-W componente extensivo de carácter horizontal,  $\sigma_3$  con dirección NW-SE componente extensivo de carácter vertical.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Realizar análisis de indicadores cinemáticos a partir de espejos de falla y ampliación con estudios de reología en zonas aledañas a estructuras principales.

Replicar la metodología empleada en esta investigación, considerando mejoras en la determinación de indicadores cinemáticos a nivel microscópico con mayor número de muestras.

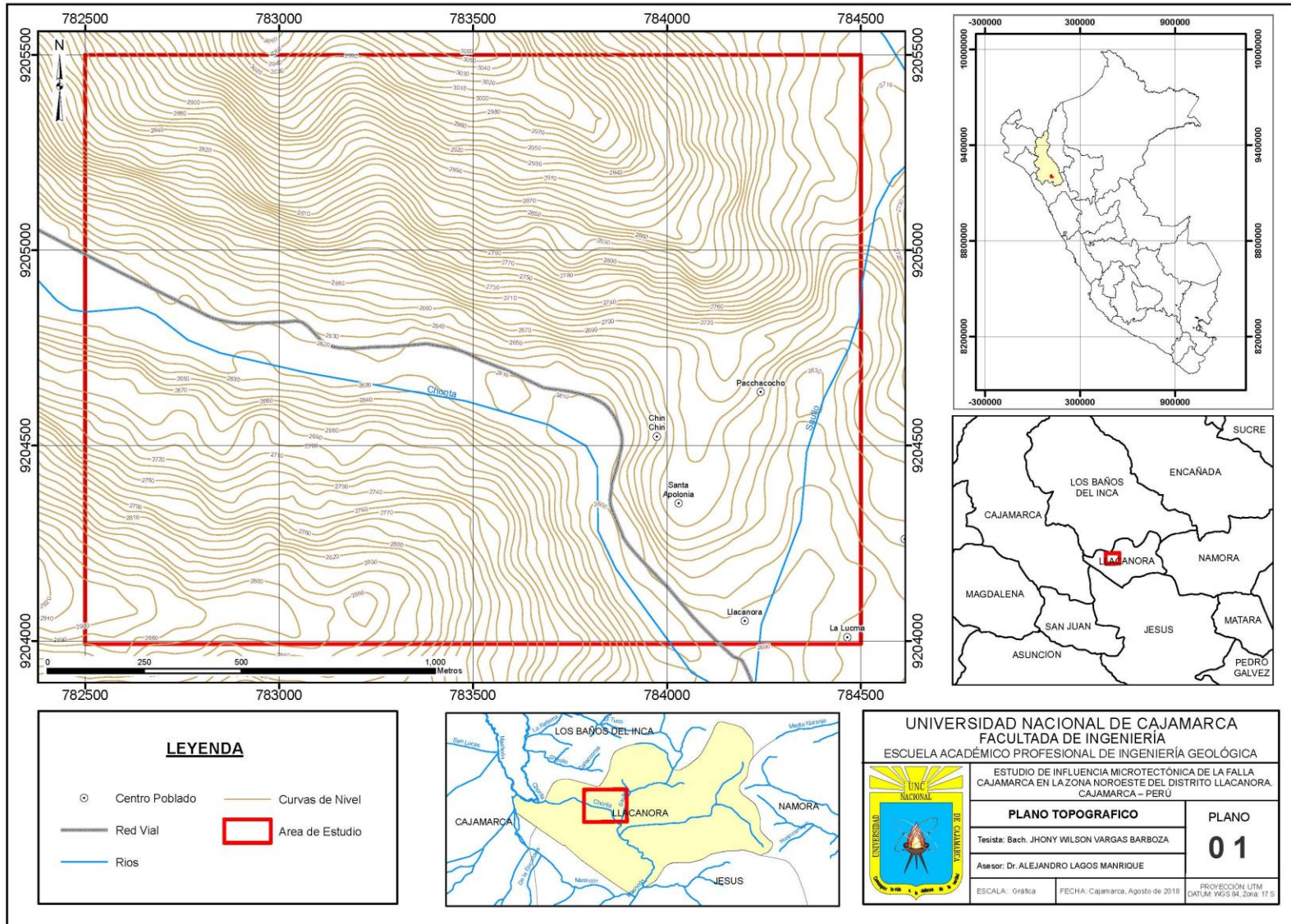
Utilizar softwares estructurales y estadísticos que permitan un mayor análisis de paleoesfuerzos con enfoque a la aproximación de la realidad.

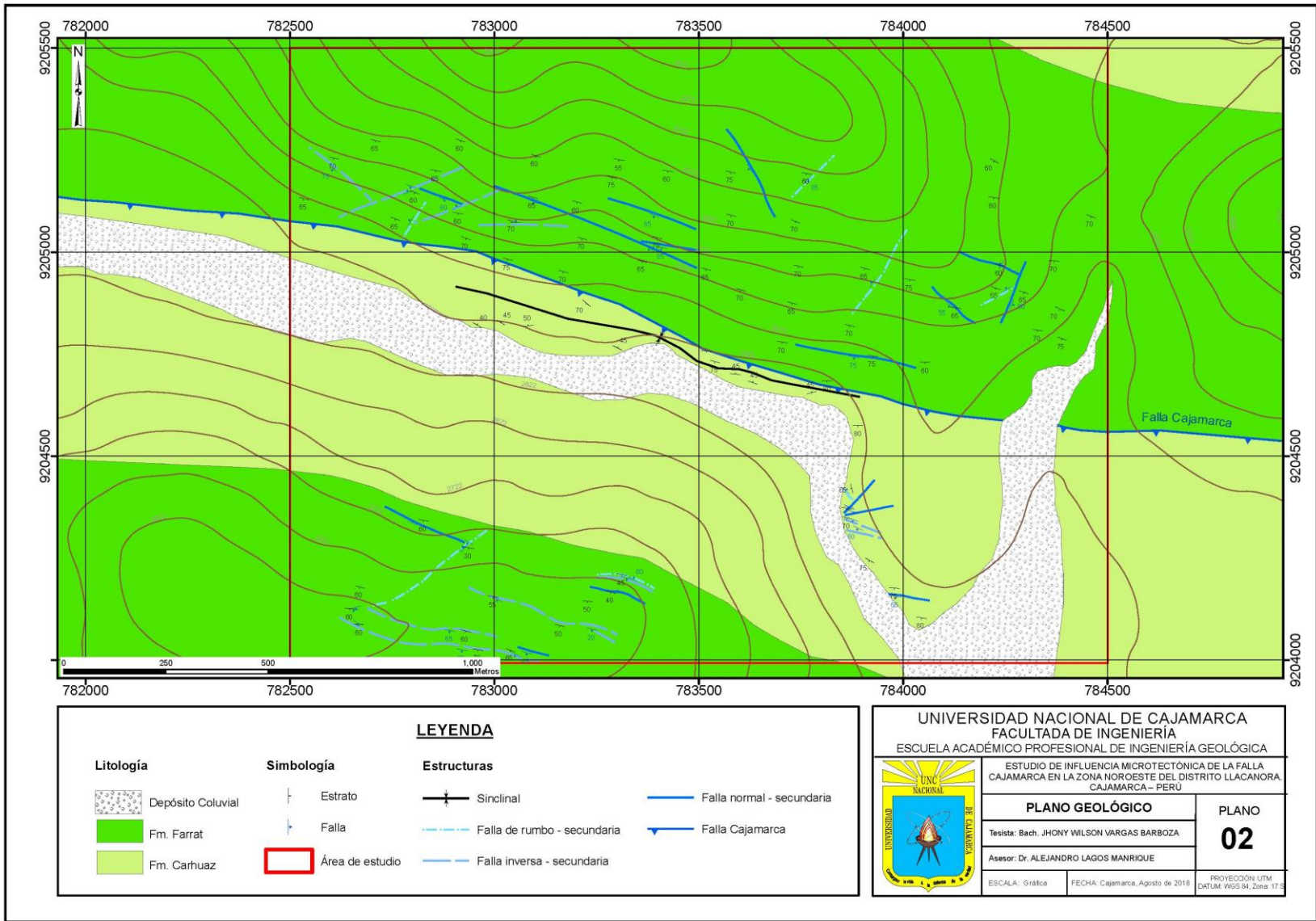
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, E.M. 1951. The dynamics of faulting, 2nd ed., Edimburgo (Olivet y Boyd Eds).
- Antón, L. 2003. Análisis de la Fracturación en un área granítica intraplaca: el domo del Tormes, Univ. Complutense de Madrid, España.
- Baratoux, L, et al. 2006. Síntesis de la geología estructural e hidrogeología de Cajamarca.
- Bastida, F, et al. 2004. La cinemática del plegamiento: algunas claves geométricas para su interpretación, Trabajos de Geología, Univ. De Oviedo, 24: 9-41.
- Benavides, V. 1956. Cretaceous system in northern Peru. American Museum of natural History Bulletin, 108: 355-493.
- Boñon, G. 2012. Cobertura vegetal y uso actual del Departamento de Cajamarca. Consultada: [http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Mapa/Cajamarca/Memoria\\_Descriptiva\\_Uso\\_Actual.pdf](http://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/Archivos/Mapa/Cajamarca/Memoria_Descriptiva_Uso_Actual.pdf)
- Casas, A. M., Gil, I. y Simón, J. L. 1990. Los métodos de análisis de paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: sistemática y técnicas de aplicación. Estudios geol., 46, 385-398.
- Cox, A. y Bryan, H. R. 1986. Plate Tectonics. How it works. Blackwell Scientific Publications. 391 p.
- Davies, R. C. 2002. Tectonic, magmatic and metallogenic evolution of the Cajamarca mining district, Northern Peru (Doctoral dissertation, James Cook University). Australia.
- Doblas, M. 1987. Criterios del sentido de movimiento en espejos de fricción: Clasificación y aplicación a los granitos cizallados de la Sierra de San Vicente (Sierra de Gredos). Estudios Geol. 43: 47-55.
- Hancock, P. L. 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. Journal of Structural Geology 7(3/4), 437-457.
- Herráiz, M., et al. CSN, ENRESA, UCM. 1999. Proyecto sigma: Análisis del estado de esfuerzos tectónicos, reciente y actual a partir de poblaciones de fallas y mecanismos focales de terremotos. Metodología y aplicación a la Península Ibérica, Madrid, España.

- Hobbs B., W. Means & P. Williams. 1981. Geología estructural. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, 518.
- Jasso Saldaña, J.J. 2007. Tesis: Análisis Cinemático De La Zona De La Cabalgadura Frontal De La Sierra Madre Oriental, Cañón “El Alamar”, Linares, Nuevo León, México. Universidad Autónoma de Nuevo León. 211pp. España
- Lagos M., A. & Quispe M., Z. 2007. Aplicación del Análisis de Cuencas Sedimentarias a la Serie Cretácea en el Área de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Lagos M., A. & Quispe M., Z. 2012. Caracterización litológica y paleontológica del Cretáceo Inferior en Cajamarca: las Formaciones Santa y Carhuáz. Cajamarca, Perú. Revistas CONCYTEC. Consultada <http://revistas.concytec.gob.pe/pdf/eciperu/v9n1/a10v9n1.pdf>.
- Laurent, P. 1987. Shear-sense determination on striated faults from e twin lamellae in calcite. *J. Struct. Geol.* 9, 591–595
- Martínez, J. R. 2002-2003. Geología Estructural y Dinámica Global, (Adaptado por Gutiérrez, G. Disponible en <http://web.usal.es/~gabi/APUNTES>. Consulta: febrero 19 de 2018).
- Mercier J. y P. Vergely. 2001. Tectónica. 1ra. reimpresión en español, Edit. Limusa, México, 259 p.
- Mercier, J., Vergely, P. 1992. Tectonique. Dunod, Paris, 214 pp
- Páez, V. 2010. Análisis Estructural en la Región Paso de la Yesca, Límite entre los Estados de Jalisco y Nayarit. Universidad Nacional Autónoma de México. 180 p.
- Petit, J.P. 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *J. Struct. Geol.* 9, 597–608.
- Ramsay J. G. & M. I. Huber. 1993. The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 1: Strain Analysis. Academic Press, New York, 308 p.
- Subieta T. & J. Delair 1984. Introducción al análisis de la deformación de las Rocas. Cuader. Geol. (Min. Ener. y Min. Caracas), 1(1): 1-56



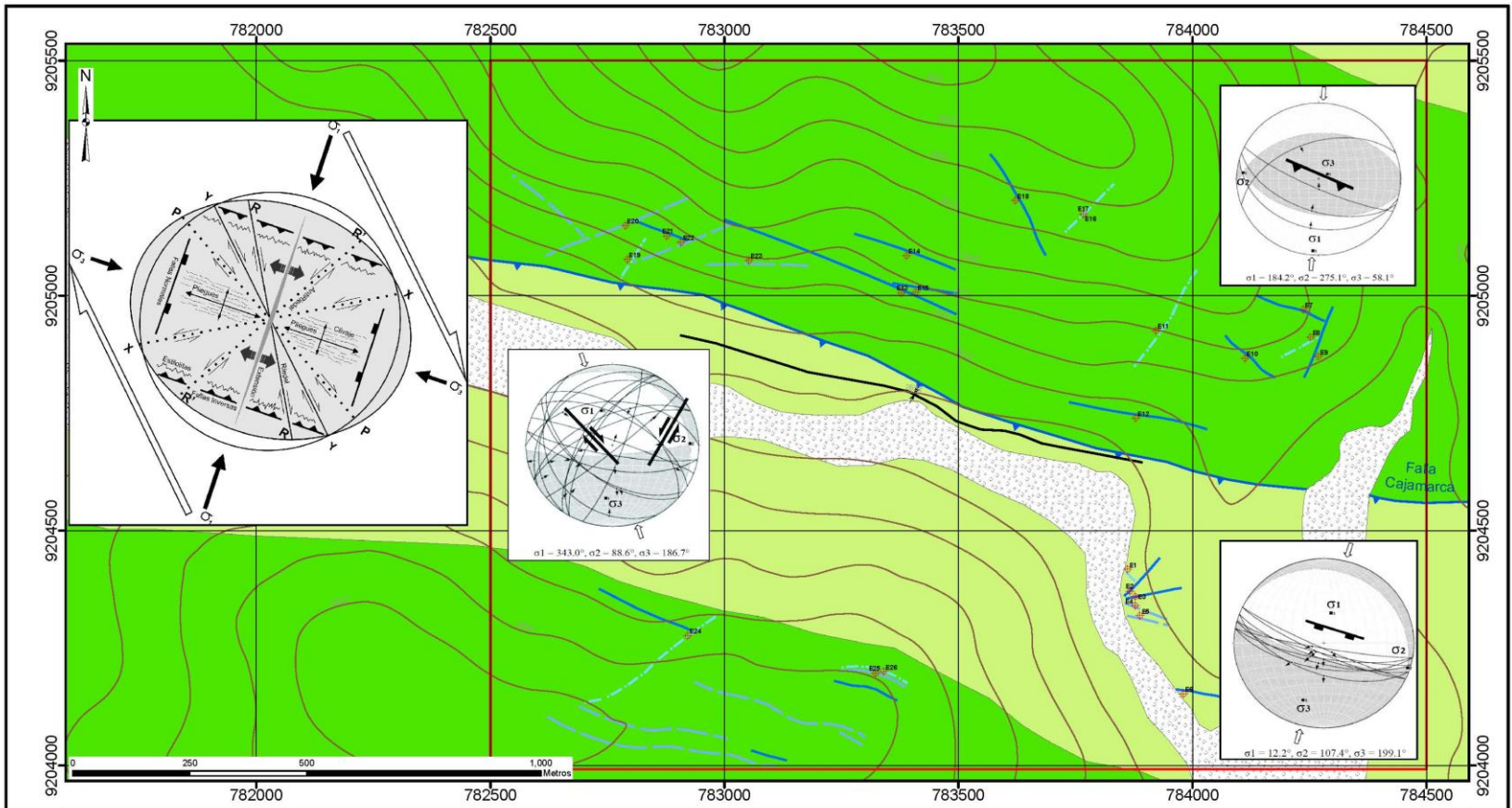




UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

ESTUDIO DE INFLUENCIA MICROTECTÓNICA DE LA FALLA CAJAMARCA EN LA ZONA NOROESTE DEL DISTRITO LLACANORA, CAJAMARCA - PERÚ

	<b>PLANO GEOLÓGICO</b>	<b>PLANO</b>
	Tesisista: Bach. JHONY WILSON VARGAS BARBOZA	<b>02</b>
	Asesor: Dr. ALEJANDRO LAGOS MANRIQUE	
ESCALA: Gráfica	FECHA: Cajamarca, Agosto de 2018	PROYECCIÓN UTM DATUM WGS-84, Zona 17 S



**LEYENDA**

Litología	Simbología	Estructuras
Depósito Coluvial	Estrato	Sinclinal
Fm. Farrat	Falla	Falla de rumbo - secundaria
Fm. Carhuaz	Área de estudio	Falla inversa - secundaria
		Falla normal - secundaria
		Falla Cajamarca
		Estaciones Estructurales

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTADA DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA**

ESTUDIO DE INFLUENCIA MICROTECTÓNICA DE LA FALLA CAJAMARCA EN LA ZONA NOROESTE DEL DISTRITO LLACANORA, CAJAMARCA - PERU

<b>PLANO ESTRUCTURAL</b>	<b>PLANO</b>
Tesisista: Bach. JHONY WILSON VARGAS BARBOZA	<b>03</b>
Asesor: Dr. ALEJANDRO LAGOS MANRIQUE	
ESCALA: Gráfica	FECHA: Cajamarca, Agosto de 2018
	PROYECCIÓN UTM DATUM: WGS 84, Zona: 17 S