

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



TESIS PROFESIONAL

**CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL SINCLINAL DE
LLULLAPUQUIO Y SU RELACIÓN EN LA INTRUSIÓN DEL PÓRFIDO
COLPAYOC, CAJAMARCA.**

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

**Presentado por:
Bach. José Humberto Requelme Quiliche**

**Asesor:
Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani**

Cajamarca – Perú

AGRADECIMIENTO

A Dios por estar en cada momento, por guiar mis pasos y renovar mis fuerzas cada día.

A mis padres y compañeros por su apoyo incondicional, que gracias a ellos fue posible la realización de este trabajo.

A mi alma mater UNC. y Docentes de la EAPIG. En especial a mi asesor, Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani, por la disposición de sus conocimientos y asesoría para desarrollar la presente tesis profesional.

DEDICATORIA

A mis padres Víctor y Leonor que son el pilar de mi vida, que con su gran esfuerzo, consejos y palabras de aliento crecí como persona.

A mis hermanos Víctor, Luz y Miriam por sus apoyos incondicionales, amor y confianza que día a día me brindan.

A mis amigas Diana y Julia que día a día me robaron una sonrisa con sus curiosidades dentro y fuera de las aulas.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	3
MARCO TEÓRICO	3
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1.1. Internacionales	3
2.1.2. Nacionales.....	4
2.1.3. Locales.....	4
2.2. BASES TEÓRICAS	5
2.2.1. Esfuerzo	5
2.2.1.1. Elipsoide de esfuerzos	6
2.2.1.2. Esfuerzo tectónico	6
2.2.2. Deformaciones de la roca.....	7
2.2.2.1. Niveles estructurales	7
2.2.2.2. Tipos de deformación	8
2.2.3. Pliegues	8
2.2.3.1. Forma y orientación.....	9
2.2.3.2. Modelos cinemáticos de plegamiento	13
2.2.4. Fracturas	14
2.2.5. Diaclasas.....	15
2.2.5.1. Ocurrencia.....	16
2.2.5.2. Formación de las diaclasas	17
2.2.5.3. Diaclasas relacionadas con pliegues	18
2.2.5.4. Distribución De Diaclasas.....	19
2.2.6. Venas	20

	Pág.
2.2.6.1. Formación de grupos de venas	20
2.2.6.2. Relleno de venas.....	21
2.2.7. Fallas.....	21
2.2.7.1. Geometría y desplazamiento de la falla	22
2.2.7.2. Separación de fallas	25
2.2.7.3. Curvaturas de falla	26
2.2.7.4. Slickensides y Lineaciones de deslizamiento	27
2.2.7.5. Conjunto de fallas.....	28
2.2.7.6. Pliegues concéntricos y fallas asociadas.....	28
2.2.7.7. Análisis cinemáticos de fallas	30
2.2.7.7.1. Criterio Riedel	30
2.2.7.7.2. Escalones y Fibras recristalizadas	31
2.2.8. Yacimientos tipo pórfido	32
2.2.8.1. Estructuras asociadas a depósitos tipo pórfido.....	34
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	35
CAPÍTULO III.....	37
MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
3.1.1. Geográfica.....	37
3.1.2. Política	37
3.1.3. Accesibilidad	37
3.1.4. Geomorfología.....	37
3.1.5. Geología Local	38
3.1.5.1. Mesozoico	38
3.1.5.2. Cenozoico	40
3.1.5.3. Depósitos cuaternarios.....	41
3.1.5.4. Magmatismo.....	41
3.2. PROCEDIMIENTOS.....	43
3.2.1. Etapa preliminar	43

	Pág.
3.2.2. Etapa de campo	43
3.2.3. Etapa de gabinete	43
3.2.4. Metodología	43
3.2.4.1. Población de estudio	44
3.2.4.2. Muestra	44
3.2.4.3. Unidad de análisis	44
3.2.5. Identificación de variables	45
3.2.6. Técnicas.....	45
3.2.7 Instrumentos y equipos	45
3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	47
3.3.1. Estructuras continuas.....	47
3.3.1.1. Pliegues	47
3.3.2. Estructuras discontinuas	49
3.3.2.1. Fracturas de extensión	49
3.3.2.2. Fracturas de contracción	50
3.3.3.3. Fallas	51
3.4. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	54
3.4.1. Análisis estereográfico	54
3.4.1.1. Análisis estereográfico del plegamiento	54
3.4.1.2. Análisis estereográfico de diaclasas.....	56
3.4.1.3. Análisis estereográfico de fallas	58
3.4.2. Análisis de Relación entre la deformación e intrusión del pórfido Colpayoc 60	
CAPÍTULO IV.....	62
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
4.1. MODELO DE EVOLUCIÓN DE LA DEFORMACIÓN E INTRUSIÓN DEL PÓRFIDO COLPAYOC.....	62
4.2. MODELAMIENTO GEOLÓGICO	68

	Pág.
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	73
CAPÍTULO V.....	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
5.1. CONCLUSIONES	74
5.2. RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. (a) Un punto representa la intersección de infinitos planos, y los esfuerzos en estos planos describen una elipse en el caso bidimensional. En tres dimensiones, esta envoltura de esfuerzos es un elipsoide (b), definido por tres ejes de esfuerzo principal mutuamente perpendiculares: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).	6
Figura 2.2. Relaciones entre la orientación de los esfuerzos principales (regímenes de esfuerzo) y los regímenes tectónicos según Anderson (1951). Los stereonets muestran campos de compresión (P) y tensión (T) (Fossen, 2010).....	7
Figura 2.3. Corte teórico de una parte de la corteza mostrando la superposición de los diferentes niveles estructurales y la forma de las estructuras correspondientes (Mattaer, 1976).	8
Figura 2.4. Aspectos geométricos de los pliegues (Fossen, 2010).....	9
Figura 2.5. (a) Banda de deformación, donde la superficie de bisección, es decir, la superficie que divide el ángulo entre flancos en dos, es diferente de la superficie axial. (b) Pliegues de Chevron (armónicos). (c) Pliegues concéntricos, donde los arcos son circulares. (d) Pliegues en cofre, que muestran dos conjuntos de superficies axiales (Fossen, 2010).....	10
Figura 2.6. Geometría de pliegue cilíndricos y no cilíndricos (Fossen, 2010).	10
Figura 2.7. Clasificación de pliegues en función de la orientación de la línea de charnela y la superficie axial (Fleuty, 1964).....	11
Figura 2.8. Formas básicas de pliegue. (h) ilustra cómo pueden ocurrir varios tipos de sinformes y antiformes en un pliegue replegado (Fossen, 2010).	12
Figura 2.9. Clasificación de pliegues basada en el ángulo entre flancos (Fossen, 2010).....	12
Figura 2.10. (a) Deslizamiento por flexión, muestra un sentido de deslizamiento opuesto en cada flanco, disminuyendo hacia la zona de la charnela. (b) Flujo por flexión, donde se cortan los flancos plegados. Idealmente, el espesor de la capa se conserva en ambos modelos (Fossen, 2010).....	13

Figura 2.11. (a) Ilustra las líneas ortogonales a las capas de la estratificación (b) Distribución de deformación en la zona de charnela de una capa de roca caliza doblada en lutitas. El estiramiento del arco externo está separado del acortamiento del arco interno por una superficie neutral. De Hudleston y Holst (1984) (Fossen, 2010).....	14
Figura 2.12. La orientación de varios tipos de fracturas con respecto a los esfuerzos principales (Fossen, 2010).....	15
Figura 2.13. Intersección entre diaclasas (Letras T, Y, X), normalmente, la población pasante es el primero, las diaclasas más cortas se llenan entre ellas en una etapa posterior, a veces como un proceso continuo (Fossen, 2016).	16
Figura 2.14. Fracturas por cizallamiento que pueden formar conjuntos conjugados. Y fracturas de extensión (venas, fisuras y diaclasas), que no pueden formar conjuntos conjugados (Fossen, 2016).....	18
Figura 2.15. Origen de los sistemas de fallas en anticlinales y sinclinales adjuntos (Sitter, 1976).....	19
Figura 2.16. Conjuntos de venas. (a) Grupo de venas planas. (b) Grupo de venas en stockwork. El relleno de vena es oscuro. (c) Formación de un grupo simple en echelon. (d) Formación de venas sigmoidales en echelon (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).....	20
Figura 2.17. Tipos de relleno de venas. (a) Relleno de vena en bloque. (b) Relleno de vena fibroso (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).	21
Figura 2.18. Bocetos que ilustran las diferencias entre fallas, zonas de fallas y zonas de corte. (a) Falla. (b) Zona de falla, con recuadro que muestra deformación cataclástica adyacente a la superficie de falla. (c) Boceto que ilustra la relación entre una falla principal y ramificación de fallas menores. (d) Fallas anastomosados en una zona de falla. (e) Una zona de corte, que muestra la continuidad de la roca a través de la zona. Se muestra que los desplazamientos se cruzan con la superficie del suelo, mientras que la zona de corte se produce a profundidad en la corteza (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).....	22

	Pág.
Figura 2.19. Boceto de diagrama de bloques que muestra el vector de deslizamiento neto con sus componentes de deslizamiento según el rumbo y deslizamiento vertical, así como el rake y el ángulo de rake (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).....	23
Figura 2.20. Bocetos de diagrama de bloques que muestran los diferentes tipos de fallas (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).	24
Figura 2.21. (a) Horst. (b) Graben simétrico. (c) Graben asimétrico, también conocido como semi graben, se muestran fallas antitéticas y sintéticas (Fossen, 2010).....	25
Figura 2.22. Ilustración de una falla normal que afecta una capa inclinada. La falla es una falla normal con un componente de deslizamiento de rumbo dextral (a), pero aparece como una falla sinistral en la vista de mapa (b, que es la sección horizontal en el nivel A). (c) muestra perfil perpendicular a la falla de rumbo y (d) muestra perfil en la dirección de desplazamiento verdadero (Fossen, 2010).....	25
Figura 2.23. (a) Sección transversal que muestra la geometría de rampas y rellanos a lo largo de una falla de empuje. La geometría de la falla se muestra antes del desplazamiento en la falla. (b) Sección transversal que ilustra los rellanos y rampas de las paredes techo y paredes pie (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).....	26
Figura 2.24. Ilustraciones de vista de mapa de (a) una curvatura de restricción y (b) una curvatura de liberación a lo largo de una falla de deslizamiento de rumbo lateral derecho (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).....	27
Figura 2.25. Vista de mapa de varios conjuntos de fallas. (a) paralelas, (b) anastomosado, (c) echelon, (d) relay, (e) conjugadas y (f) aleatorias (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).....	28
Figura 2.26. Campo petrolífero Elk Basin, con fallas transversales y diagonales (Bartram, 1929).....	29
Figura 2.27. Fallas perianticlinales. a) fallas de tensión normales ordinarias; b) alargamiento por fallas de cizallas; c) cizalla de compresión en el lado convexo y cizalla de compresión en el cóncavo (Sitter, 1976).....	30

Figura 2.28. Un modelo de distorsión que explica el origen de las estructuras subsidiarias a lo largo de una falla de deslizamiento según el rumbo. (a) Una vista de mapa de corte simple dextral. (b) Un detalle de la elipse de distorsión que muestra que los pliegues y las fallas inversas se forman perpendiculares a la dirección de acortamiento, mientras que las fallas normales y venas se forman perpendiculares a la dirección de extensión. (c) Tenga en cuenta que R y R' son similares a las fracturas de cizallamiento conjugado formadas en un cilindro de roca sometido a un esfuerzo axial. (d) Simulación de la deformación de pliegues en echelon con una hoja de papel (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).....31

Figura 2.29. (a) Ilustración del crecimiento de fibras de deslizamiento a lo largo de una falla, y (b) diagrama de bloques que ilustra los escalones a lo largo de una superficie de falla recubierta de fibra. Los escalones de liberación se convierten en el lugar de crecimiento de las venas, y los escalones de restricción oblicuos se convierten en slickolitas (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).....32

Figura 2.30. Anatomía de un sistema telescópico de pórfido Cu que muestra interrelaciones espaciales de un depósito de pórfido Cu ± Au ± Mo, ubicado en el centro en un stock de pórfido multifásico y sus rocas huésped inmediatas; skarn periférico proximal y distal, reemplazo de carbonato (chimenea-manto) y depósitos alojados en sedimentos (distal-diseminado) en una unidad de carbonato y vetas subepitermales en rocas no carbonatadas; y depósitos epitermales suprayacentes de alta sulfuración en el lithocap, e intermedia sulfuración junto al entorno del lithocaps (Sillitoe, 2010).....33

Figura 2.31. Diferentes configuraciones de venas de cuarzo formadas en diferentes configuraciones estructurales. Las venas sheeted en el entorno transtensional pueden elevarse por encima del entorno del pórfido para formar depósitos de pórfido wallrock (Corbett, 2018).35

Figura 3.1. Cierre periclinal del sinclinal de Lullapuquio. Según al eje del pliegue se observa fallas transversales (líneas anaranjadas), y fallas longitudinales (líneas negras).48

Figura 3.2. Conjunto de fallas conjugados, con orientaciones hacia el NW - SE y SW - NE, estas fallas además de deformar el sinclinal también controlan el emplazamiento de intrusiones. También en la figura se puede observar al sinclinal deformado en tres grandes bloques en la Fm. Cajamarca, producto principalmente del movimiento de las fallas de orientación SW - NE.	53
Figura 3.3. (a) Análisis estereográfico típico de un pliegue cilíndrico, círculos azules muestra las concentraciones de polos abarcados en el círculo π , flechas rojas indica la dirección de esfuerzo de compresión paralelo al círculo π . (b) Proyección estereográfica, planos de los flancos (líneas azules), flecha roja indica la orientación de la línea de charnela, además el flanco NE presenta un cabeceo de $3.5^{\circ}E$ y el flanco SW un cabeceo de $2.5^{\circ}S$	55
Figura 3.4. Proyecciones estereográficas. (a) Plano axial (línea roja) con un rumbo de $N115^{\circ}$ y buzamiento de $87^{\circ}SW$, círculo π (línea negra). (b) Ángulo Interflancos (línea roja) de 68°	56
Figura 3.5. (a) Identificación de 4 conjuntos de diaclasas por concentración de proyección de polos. (b) Proyección de planos media de los conjuntos de diaclasas, y orientación de esfuerzos en dirección del ángulo agudo formado por la intersección de las diaclasas.	57
Figura 3.6. Proyecciones estereográficas. (a) Planos de diaclasas perpendiculares a planos de estratos y eje del sinclinal. (b) Planos de diaclasas casi paralelos a planos de estratos y normales a al eje.	57
Figura 3.7. Análisis estereográfico de falla inversa. (a) El paleoesfuerzo principal (σ_1) compresivo tiene un trend 212° de y plunge de 24° , la flecha roja indica el sentido de deslizamiento del bloque techo. (b) Zonas azules (compresión) y zonas rojas (tensión).	59
Figura 3.8. Análisis estereográfico de falla sinestral. (a) El paleoesfuerzo principal (σ_1') compresivo tiene un trend 173° de y plunge de 40° , la flecha roja indica el sentido de deslizamiento del bloque techo. (b) Zonas azules (compresión) y zonas rojas (tensión).	59
Figura 3.9. Análisis estereográfico de falla normal. (a) El paleoesfuerzo principal (σ_1') compresivo tiene un trend 98° de y plunge de 61° , la flecha roja indica el sentido de deslizamiento del bloque techo. (b) Zonas azules (compresión) y zonas rojas (tensión).	60

	Pág.
Figura 3.10. (a) Modelo ideal de estructuras S-C. (b) Incipiente estructura S-C en calizas de la Fm. Cajamarca, rocas caja del pórfido Colpayoc.	61
Figura 3.11. Imagen satelital que muestra la tendencia hacia una forma circular, producto de las intrusiones postectónica.	61
Figura 4.1. Etapa pre-plegamiento, sedimentación de las rocas carbonatadas del Cretácico en una paleosuperficie, y posible desarrollo de estilolitos diagenéticos.....	63
Figura 4.2. Etapa sin-plegamiento I, inicia el plegamiento con el desarrollo de estilolitos tectónicos (E1) y diaclasas correspondientes a los conjuntos 1 y 2 en el área de investigación.....	64
Figura 4.3. Etapa sin-plegamiento II, etapa de cabalgamiento y plegamiento con el desarrollo de fallas inversas paralelas al eje del pliegue.....	64
Figura 4.4. Etapa de replegamiento local, producto del cambio de orientación de esfuerzos. Desarrollo de estilolitos tectónicos (E2), y diaclasas correspondientes a los conjuntos 3 y 4 en el área de investigación.	65
Figura 4.5. Etapa transtensivo, que produce el desarrollo de fallamiento normal paralelo al eje del pliegue.....	66
Figura 4.6. Intrusión y emplazamiento en las zonas de charnela de los pliegues. Y extensión local en dirección NE – SW.	67
Figura 4.7. Etapa de erosión, la chanela del anticlinal Chetilla fue completamente erosionado, evidenciándose en superficie el sinclinal Lullapuquio y el pórfido Colpayoc.....	68
Figura 4.8. Vista de las secciones geológicas (ST y S) y el cartografiado superficial en el software Leapfrog, para la elaboración del modelo 3D.	69
Figura 4.9. Vista del Modelo 3D del área de investigación. Donde se observa el relieve terrestre actual.....	70
Figura 4.10. Vista del modelo 3D, sin las unidades litológicas Po-po y Ks-ca.	71
Figura 4.11. Vista del modelo 3D, sin las unidades litológicas Po-po, Ks-ca, Ks-qu,m	71
Figura 4.12. Vista del modelo 3D, sin las unidades litológicas del cretácico superior y volcánicos.....	72
Figura 4.13. Vista del Modelo 3D, de las unidades litológicas intrusivas y de las fallas principales generadoras para el emplazamiento de estos stocks.	72

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Foto 3.1. Estratos gruesos mayor a 50cm de calizas grises con textura mudstone (bioturbaciones <10%) de la Fm. Yumagual, situado en el flanco NE del sinclinal de Lullapuquio.....	39
Foto 3.2. Estratos delgados de calizas claras nodulares intercaladas con margas y margas pardo-amarillentas. Además, abundante presencia de fósiles del tipo Exogyra.	39
Foto 3.3. Estratos mayores a 60cm de calizas macizas de color blanquecino en la Fm. Cajamarca, fracturadas intensamente, con presencia de lenares producto de la meteorización.	40
Foto 3.4. Rocas andesíticas de color violáceo con textura porfírica, dispuestas en una estructura columnar en el Cerro Soldado Rumi. Además, se observa el contacto con calizas de la Fm. Cajamarca.	41
Foto 3.5. (a) Intrusivo diorítico emplazado en la Fm. Cajamarca al sureste del eje del sinclinal de Lullapuquio. (b) Afloramiento de Brecha Hidrotermal en el flanco SW del sinclinal de Lullapuquio, con textura de clasto soportada silicificada y con presencia de óxidos.....	42
Foto 3.6. En zonas de Skarn se observa que las rocas calizas de la Fm. Cajamarca contienen pirita, y presentan un color gris verdoso por presencia de cloritas y/o piroxenos.	42
Foto 3.7. Se observa los flancos del sinclinal LLullapuquio, en rocas de la Fm. Cajamarca. Los estratos del flanco NE presenta N135° de rumbo y 35°SW de buzamiento, los estratos del flanco SW presentan N315° de rumbo y 62°NE de buzamiento.	47
Foto 3.8. Se observa un monoclinal, donde los estratos del flanco inclinado presentan un rumbo de N312° y 62°NE de buzamiento.	48
Foto 3.9. (a) Sistema pseudo conjugado formado por 2 familias de diaclasas (rojo: N22° de rumbo y 88°SW de buzamiento, azul: N224° de rumbo y 48°NW de buzamiento) en plano de estrato del Gpo. Quilquiñan. (b) Distribución de diaclasas (líneas anaranjadas) en estratos de la Fm. Cajamarca, nótese que en los estratos de espesor menor la distancia entre diaclasas es más corta que en estratos de espesor mayor.	49

Foto 3.10. (a) Venas de calcita en forma de echelon simple, en la Fm. Yumagual, las flechas rojas señalan la zona de cizalla. (b) venas de cuarzo (líneas azules) en forma de stockwork en el pórfido diorítico.	50
Foto 3.11. Estilolitos producto de los esfuerzos tectónicos que provocaron la disolución en rocas carbonatadas. (a) Estilolito asociado a venas rellena de calcita; la dirección de acortamiento es paralela a las venas, la dirección de alargamiento es perpendicular. (b) Intersección de estilolitos con diferente orientación, la cual indican dos eventos de compresión no contemporáneos (σ_1 y σ_1').	51
Foto 3.12. Planos de falla con fibras recristalizadas (indicador cinemático). (a) Falla inversa con componente dextral, en la Fm. Yumagual, con rumbo de N136° y 71°SW de buzamiento, rake de 72°SE. (b) Falla sinistral con componente normal, en el Fm. Cajamarca, con rumbo de N210° y 62° de buzamiento, rake de 30°SW.....	52
Foto 3.13. Falla tijera, producto de la intersección una falla inversa y falla de rumbo el bloque pared ha girado cambiando el sentido de orientación y buzamiento de los estratos. Asimismo, esta estructura es la causante del emplazamiento de una brecha.	52
Foto 3.14. Estructuras horst y graben, producto de fallas de deslizamiento según el rumbo con componente normal e inversa, ubicadas en rocas carbonatadas de la Fm. Cajamarca.	53

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1. Acceso al área de investigación.	37
Tabla 3.2. Clasificación de geomorfología (Rodríguez, 2014).	38
Tabla 3.3. Clasificación y Tipo de investigación.	44
Tabla 3.4. Descripción de Instrumentos y equipos.	46

RESUMEN

La investigación se sitúa en el distrito de Chetilla, provincia y región de Cajamarca. Litológicamente presenta rocas carbonatadas de las unidades litoestratigráficas del Cretácico, rocas volcánicas andesíticas y cuerpos intrusivos del Neógeno. Estos cuerpos intrusivos de composición diorita y granodiorita albergan un depósito mineral tipo pórfido de Au-Cu, por ello se propuso conocer las estructuras que la controlan, teniendo como objetivo principal la caracterización estructural del sinclinal Llullapuquio y su relación en la intrusión del pórfido Colpayoc.

La caracterización estructural se desarrolló con datos obtenidos en campo; donde se tomaron medidas de rumbo, buzamiento e indicadores cinemáticos de las estructuras. Para el análisis de las estructuras se utilizaron los softwares Stereonet, Dips y Faultkin. Determinándose la geometría del plegamiento (sinclinal de Llullapuquio), fracturas, fallas; y la orientación de los paleoesfuerzos principales que provocaron la deformación. Como resultados se desarrolló un modelo de evolución de la deformación e intrusión del pórfido Colpayoc, explicado en siete etapas a través de diagramas de bloques la relación de las estructuras con la intrusión del pórfido (stocks); se elaboró un modelamiento litológico-estructural en el software Leapfrog para observar en tres dimensiones la relación de los stocks con las fallas principales que generaron el ascenso de la intrusión.

Finalmente se concluyó que el sinclinal Llullapuquio tuvo dos mecanismos de deformación (flexión ortogonal y deslizamiento por flexión); y los indicadores cinemáticos de fallas determinó que las fallas con desplazamiento normal presentan componente sinistral, siendo estas las que controlan la intrusión del pórfido Colpayoc.

Palabras claves: Deformación, fallas, fracturas, indicadores cinemáticos, intrusión, plegamiento.

ABSTRACT

The investigation is located in the Chetilla district, Cajamarca region. Lithologically it presents limestones from the Cretaceous lithostratigraphic units, Neogene andesitic volcanic and intrusive. These dioritic and granodioritic intrusives hosts Au-Cu porphyry-type deposit, so it was proposed to know the structures that control it, having as main objective the structural characterization of the Lullapuquio syncline and its relationship in the intrusion of the Colpayoc porphyry.

The structural characterization was developed with data obtained in the field; where measurements of heading, dip and kinematic indicators of the structures were taken. Stereonet, Dips and Faultkin software will be used for the analysis of the structures. Determining the geometry of the folding (Lullapuquio synclinal), fractures, faults; and the orientation of the main palaeo-stresses that caused the deformation. As results, a model of evolution of the deformation and intrusion of the Colpayoc porphyry was developed, explained in seven stages through block diagrams of the relationship of the structures with the intrusion of the porphyry (stocks); A lithological-structural modeling was developed in Leapfrog software to observe in three dimensions the relationship of the stocks with the main faults that generated the rise of the intrusion.

Finally, it was concluded that the Lullapuquio syncline had two deformation mechanisms (orthogonal flexion and flexion slip); and the kinematic indicators of faults determined that the faults with normal displacement present a synestral component, being these the ones that control the intrusion of the Colpayoc porphyry.

Keywords: Deformation, faults, fractures, folding, kinematic indicators, intrusion.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El sinclinal Lullapuquio definido por Sánchez (2013), está conformado litológicamente por rocas del cretácico superior en su núcleo. Este plegamiento al igual que todos los pliegues de la región de Cajamarca se habría formado en la fase tectónica inca I y II del ciclo orogénico andino, caracterizado por un régimen compresivo que se dio entre el paleoceno superior y eoceno medio, originado por esfuerzos tectónicos provenientes del suroeste (Benavides, 1999).

En el cerro Colpayoc, donde se ubica el eje del sinclinal Lullapuquio, se ha emplazado un depósito mineral tipo pórfido de Cu–Au, formada en la edad del Mioceno temprano - medio (Turner, 2012). Este depósito se caracteriza porque tiene dos intrusiones, una de tipo granodiorítica y otra más tardía de tipo diorítica la cual trajo la mineralización.

Es por ello que para conocer las estructuras que controlan la intrusión del pórfido Colpayoc, es necesaria hacer una caracterización estructural del sinclinal de Lullapuquio. Donde a través de la aplicación de conocimientos estructural se identificará los principales plegamientos, fallas y diaclasas favorables que ocasionaron la intrusión del pórfido. Este estudio servirá para dar a conocer las estructuras tectónicas que controlan la intrusión del pórfido Colpayoc, la cual será de gran importancia posteriormente para generar un modelo genético del yacimiento que sirve como base en su cálculo de reserva y método de explotación. Además, da un aporte informativo a los profesionales interesados en realizar estudios complementarios o estudios en otros yacimientos.

Según lo planteado nos preguntamos ¿Cuál es la caracterización estructural del sinclinal de Lullapuquio y su relación en la intrusión del pórfido Colpayoc?

El sinclinal de Lullapuquio presenta fallas de deslizamiento según el rumbo producto de los esfuerzos tectónicos, estas fueron el factor principal para la intrusión del pórfido Colpayoc, teniendo como roca encajonante calizas de la Formación Cajamarca la cual albergan zonas de mineralización de tipo skarn.

Este estudio tiene un alcance descriptivo, correlacional y explicativo, de carácter transversal, en el cual se pretende dar a conocer la caracterización estructural del sinclinal Lullapuquio y su relación en la intrusión del pórfido Colpayoc.

Las limitaciones del presente estudio son de no realizar estudios geofísicos, ni estudios de perforación que profundicen más a detalle la investigación, por lo que el estudio se contrastará con antecedentes previos al objetivo de la investigación.

El objetivo general de la tesis es determinar la caracterización estructural del sinclinal Lullapuquio y su relación en la intrusión del pórfido Colpayoc; y como específicos determinar las estructuras tectónicas principales que controlan la intrusión del pórfido Colpayoc, determinar la cinemática de las estructuras tectónicas y elaborar los planos geológico y estructural del área de investigación.

En el segundo capítulo se describen todo lo concerniente a los antecedentes teóricos locales, nacionales e internacionales; bases teóricas como la teoría de los esfuerzos tectónicos, deformación de las estructuras geológicas, pliegues, fracturas, fallas, cinemática de las estructuras, y por último sobre yacimientos tipo pórfido y sus estructuras asociadas para su emplazamiento. En el tercer capítulo se desarrolla la ubicación del área de investigación; el procedimiento y metodología que se utilizó; el desarrollo del cartografiado geológico-estructural y la caracterización de estructuras en campo; tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados utilizando los Softwares: Dips, FaultKin y Stereonet. En el cuarto capítulo se muestra el análisis y discusión de resultados de la investigación, por medio del modelo de evolución de la deformación e intrusión del pórfido Colpayoc y el modelamiento geológico 3D. Finalmente, en el quinto capítulo consta de las conclusiones para cada objetivo establecidas, y las recomendaciones propuestas para ampliar el conocimiento del tema de la investigación.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Internacionales

Ramírez (2012). Estudio geológico - estructural del anticlinal la caja (área Bonanza – Providencia), sierra madre oriental, NE de Zacatecas. Tuvo como objetivo principal el establecer la relación entre las secuencias sedimentarias deformadas respecto al emplazamiento de los cuerpos magmáticos, teniendo como metodología empleada el trabajo de cartografiado en campo y la interpretación en gabinete. Los resultados de esta investigación es la reconstrucción cronológica de los principales eventos ocurridos en el anticlinal La Caja, las cuales son: etapa de sedimentación, etapa de deformación regional, etapa de replegamiento local y etapa de emplazamiento de magmas.

Tristán et al. (2012), Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas, México. Determinó que el emplazamiento de diques riolíticos y domos estuvo ligado a la primera etapa de fallamiento y mineralización, la cual generó la primera etapa de mineralización; la segunda etapa de fallamiento retomó las estructuras principales definidas en la primera, y por lo tanto una segunda etapa de mineralización determinada por barrenación en la zona de rocas volcánicas ignimbrita en el sur del distrito minero de Zacatecas.

Barrios (2015), Modelo estructural y cinemático del yacimiento de Quebrada Blanca y su relación con la mineralización supérgena, Chile. Estudio el control estructural de la mineralización supérgena y la expresión de esta en los distintos dominios estructurales del depósito: concluyendo que la alteración potásica y fílica muestran en profundidad lineamientos principalmente ENE, y en niveles someros la alteración fílica y argílica toma lineamientos NW-WNW, donde el primer

fenómeno se debe a la impronta hipógena, mientras que el segundo se debe a la impronta supérgena que domina los bancos superiores del yacimiento.

2.1.2. Nacionales

Gonzales (2013), Controles estructurales del pórfido Trapiche Apurímac. Determino la fase tectónica generadora de los principales controles estructurales de los sistemas hidrotermales del pórfido Trapiche; donde concluyó que las zonas favorables para la ocurrencia de un depósito mineral es la fase tectónica Inca II y III por la generación de una serie de estructuras tectónicas andinas y trasandinas.

Orbegozo (2008), Formulación de un modelo Geológico-Estructural, en el sistema de vetas de la franja oeste del yacimiento minero de Parcoy, C.M.H. Definió integralmente el modelo geológico – estructural en el yacimiento minero, donde concluyó que los “blancos” deben orientarse a posibles estructuras tensionales y de tipo criterio riedel producto de la reactivación de estructuras dando como resultado los modelos tipo lazos cimoides y lazos cimoides múltiple.

Coba (2017), Modelo geométrico y características estructurales del sistema de vetas de alto ángulo al norte del Batolito de Pataz mina Poderosa, La Libertad. Desarrollo un modelo geométrico y las características estructurales del sistema de Vetas; concluyendo que el modelo estructural está relacionado a un esfuerzo tensional originando vetas con características de textura brechada, alteración gradacional, mineralización en parches y bandas de sulfuros.

2.1.3. Locales

Lagos (2012), Caracterización litológica y estructural de la serie cretácea en la zona de Urubamba. Cajamarca- Perú; explico la caracterización litológica y estructural de la serie cretácica en el área de Urubamba. Donde concluyo que la serie cretácea de la zona de Urubamba se deposito en forma continua con aparente tranquilidad tectónica y en una cuenca subsidente; también determino que la zona de Urubamba se encuentra de un bloque Occidental caracterizado por tener fallas normales y pliegues abiertos con amplia longitud de onda; así mismo concluyo que los cuerpos intrusivos Chamis, Colpayoc y Chetilla están alineados siguiendo la orientación NE-SW (orientación Transandina).

Lagos (2015), Modelamiento de la relación entre los procesos tectónicos y la inestabilidad en los terrenos de las zonas: Urubamba y Tres ríos, Cajamarca; explicó la relación entre los procesos tectónicos y la inestabilidad de los terrenos en la zona de Urubamba y Tres Ríos. Donde concluyó que la fase tectónica Incaica de mayor intensidad, ha generado fallas, fracturas y pliegues que ha afectado a rocas de edad Cretácicas, y la fase tectónica Quechua de menor intensidad ha generado solo fracturas y ha afectado a rocas de edad Cenozoica.

Sánchez (2013), Estudio geológico de las unidades formacionales Cretácicas, Paleógenas - Neógenas en la zona de Sexemayo. Estableció zonas con potencial geológico por depósitos minerales en la zona de Sexemayo; concluyendo que el domo Colpayoc es el que tiene mineralización de cobre económicamente rentable, la Formación Farrat es la que presenta mayor porcentaje de óxido de silicio y la Formación Cajamarca es la que presenta mayor porcentaje de óxido de calcio.

Turner (2012), Reporte técnico del proyecto Colpayoc - Estrella Gold Corporation. Concluyó que el yacimiento tipo pórfido alberga alteración y mineralización de oro en rocas intrusivas del mioceno, así como estilos asociados de skarn y reemplazo de mineralización en calizas de edad cretácica.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Esfuerzo

El concepto de esfuerzo se aplica a un cuerpo en equilibrio en estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme. El esfuerzo que actúa sobre una superficie está definido por un par de vectores de tracción que tiene la misma magnitud, pero dirección opuesta, la magnitud y orientación de los esfuerzos cambian con la orientación de la superficie. El esfuerzo que actúa en un plano de falla preexistente puede descomponerse en un componente de esfuerzo cortante y un componente de esfuerzo normal, el esfuerzo normal tiende a evitar fallas empujando ambos bloques uno hacia el otro, en contraste, el esfuerzo cortante promueve fallas (Rey, 2016).

2.2.1.1. Elipsoide de esfuerzos

El elipsoide de esfuerzos se caracteriza por tres esfuerzos ortogonales principales σ_1 , σ_2 y σ_3 , es decir 3 pares de tracciones iguales pero opuestas (ver Figura 2.1). Todos los esfuerzos son positivos, las estructuras extensionales resultan del material que se mueve o fluye en la dirección de menor esfuerzo (Rey, 2016).

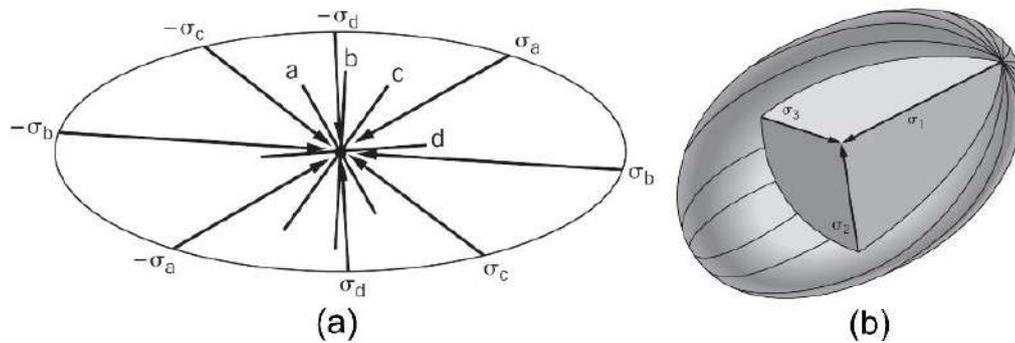


Figura 2.1. (a) Un punto representa la intersección de infinitos planos, y los esfuerzos en estos planos describen una elipse en el caso bidimensional. En tres dimensiones, esta envoltura de esfuerzos es un elipsoide (b), definido por tres ejes de esfuerzo principal mutuamente perpendiculares: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.1.2. Esfuerzo tectónico

El esfuerzo tectónico en muchos casos significa esfuerzo relacionado con los movimientos de las placas y la tectónica de placas. Sin embargo, a nivel local los esfuerzos tectónicos pueden verse influidas por factores tales como la flexión de las capas, por lo tanto, el esfuerzo tectónico local puede ser bastante variable con respecto a la orientación (Fossen, 2010).

En la Figura 2.2. se observa la clasificación clásica de Anderson del esfuerzo tectónico, donde establece que el régimen de falla normal ocurre donde σ_2 y σ_3 son horizontales y σ_1 es vertical, el régimen de falla de empuje ocurre donde σ_1 y σ_2 son horizontales y σ_3 es vertical, y el régimen de falla de deslizamiento según el rumbo ocurre donde σ_1 y σ_3 son horizontales y σ_2 es vertical (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

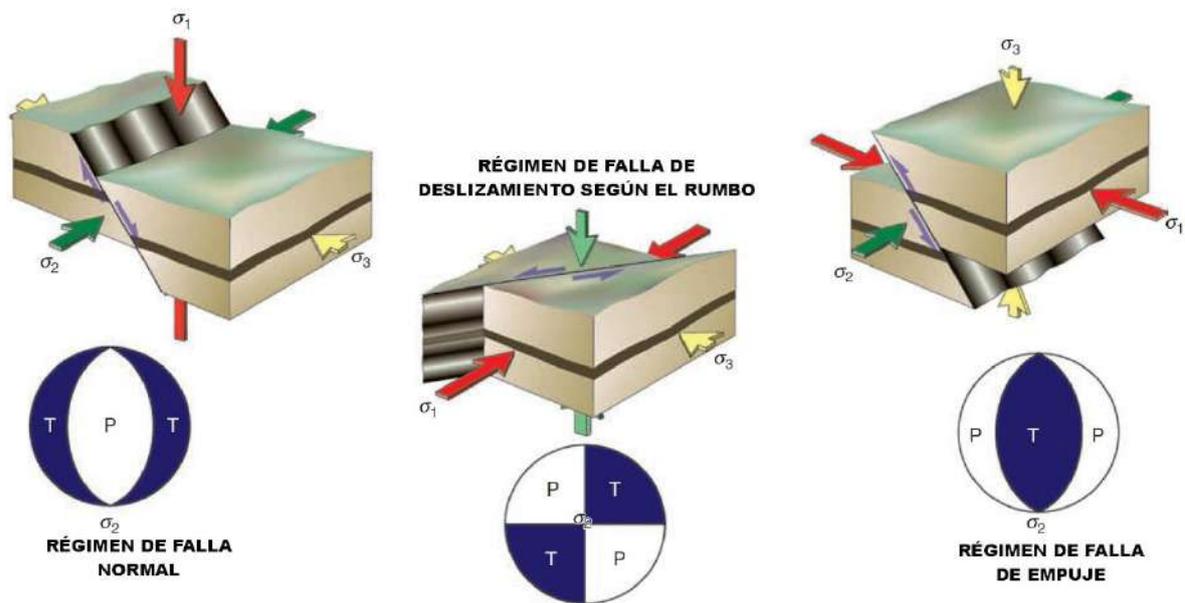


Figura 2.2. Relaciones entre la orientación de los esfuerzos principales (regímenes de esfuerzo) y los regímenes tectónicos según Anderson (1951). Los stereonets muestran campos de compresión (P) y tensión (T) (Fossen, 2010)

2.2.2. Deformaciones de la roca

La deformación es un término general que se emplea para referirse a cambios en la forma y/o volumen que pueden experimentar las rocas. Como resultado del esfuerzo aplicado, una roca puede fracturarse o deformarse arrugándose. Las condiciones y ambientes de deformación de las rocas son muy variados, ya que pueden encontrarse desde niveles muy superficiales hasta los 40 kilómetros de profundidad. Para poder interpretar las condiciones de formación de cada estructura, es imprescindible asociarla a un nivel estructural (García, 2012).

2.2.2.1. Niveles estructurales

Mattauer (1976), manifiesta que niveles estructurales son los diferentes dominios de la corteza en que los mecanismos dominantes de la deformación permanecen iguales. Han sido definidos tres niveles estructurales de manera que se enlacen fácilmente con las subdivisiones tectónicas habituales (ver Figura 2.3.). Nivel estructural superior, el mecanismo dominante es el cizallamiento, dominio de las fallas. Nivel estructural medio, el mecanismo dominante es la flexión, dominio del plegamiento isopaco. Nivel estructural inferior, el primer mecanismo dominante es el aplanamiento y luego el flujo, dominio de los pliegues anisopacos.

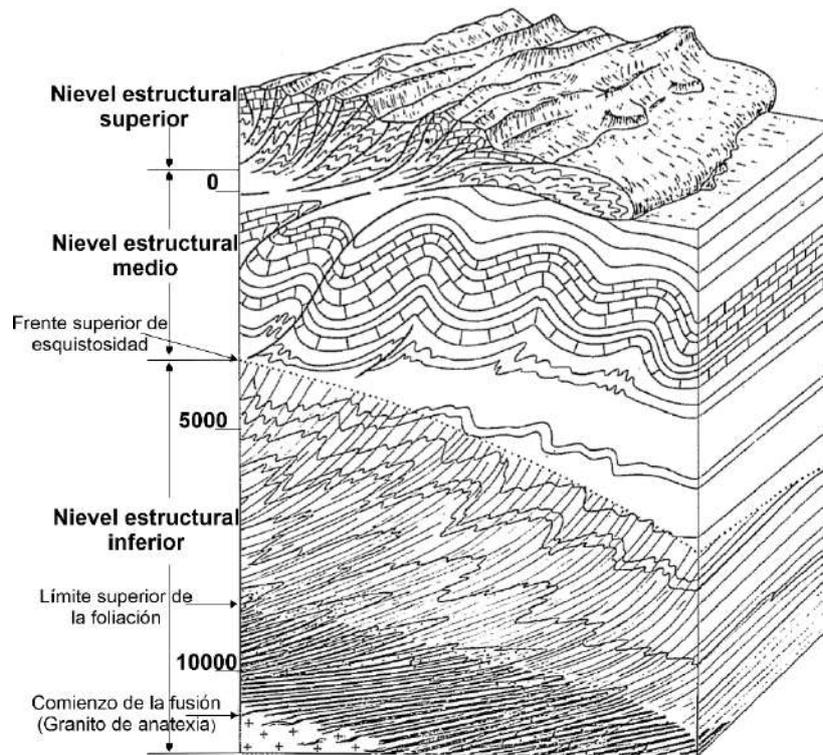


Figura 2.3. Corte teórico de una parte de la corteza mostrando la superposición de los diferentes niveles estructurales y la forma de las estructuras correspondientes (Mattauer, 1976).

2.2.2.2. Tipos de deformación

Según García (2012), cuando los materiales se deforman plegándose se habla de deformación dúctil y cuando se fracturan se habla de deformación frágil. Dependiendo el comportamiento de la roca puede hablarse de deformación elástica y deformación plástica. En la deformación elástica, tras cesar el esfuerzo la roca deformada recupera su forma original, las rocas son poco elásticas, pero suelen serlo en un nivel estructural inferior. Y en la deformación plástica, cuando una roca supera el límite elástico sufre una deformación plástica, tras la que ya no puede recuperar su forma original, si se supera el límite de plasticidad, las rocas se fracturan y pasan a comportarse como cuerpos frágiles.

2.2.3. Pliegues

Fossen (2010), sustenta que los pliegues son estructuras que se pueden formar prácticamente en cualquier tipo de roca, configuración tectónica y profundidad. Los pliegues son claramente algunas de nuestras ventanas más importantes en las historias de deformación local y regional del pasado. Su geometría y expresión

contienen información importante sobre el tipo de deformación, cinemática y tectónica de un área. Además, pueden ser de gran importancia económica, tanto como trampas de petróleo como en la búsqueda y explotación de minerales y otros recursos minerales.

2.2.3.1. Forma y orientación

Según Fossen (2010), los pliegues están formados por una charnela que conecta dos flancos generalmente orientados de manera diferente (Figura 2.4). La charnela puede ser aguda y abrupta, pero más comúnmente la curvatura de la charnela es gradual y se define una zona de charnela. Existe un espectro de formas de charnela, desde las charnelas puntiagudas (pliegues en chevron) hasta las charnelas bien redondeadas (pliegues concéntricos) (Figura 2.5).

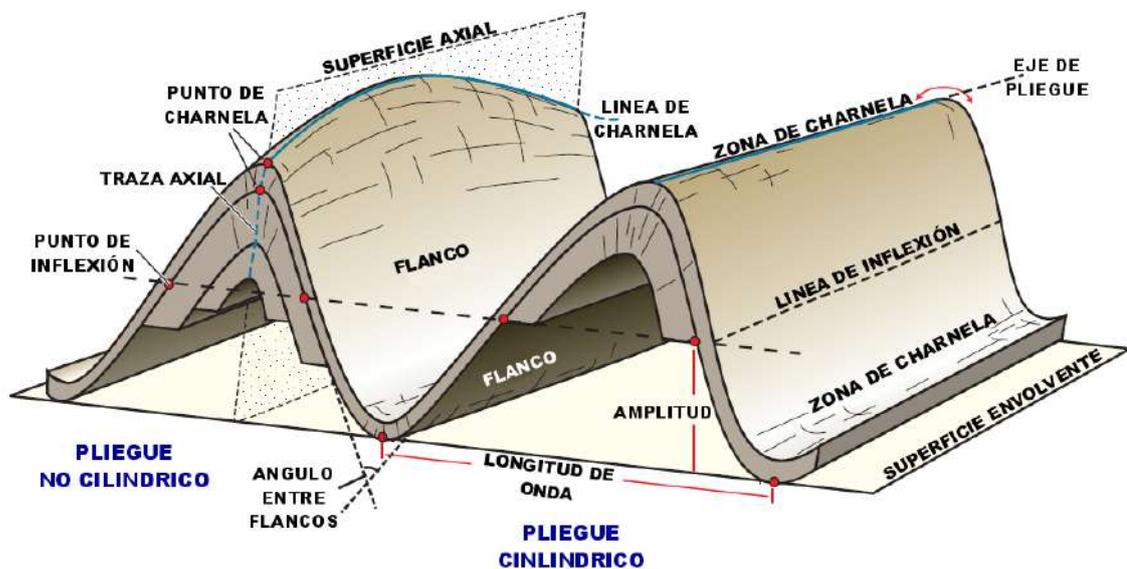


Figura 2.4. Aspectos geométricos de los pliegues (Fossen, 2010).

En rocas de varias capas, los pliegues pueden repetirse con una forma similar en la dirección de la traza axial, como se ve en la Figura 2.5a – c. Tales pliegues se llaman armónicos. Si los pliegues difieren en longitud de onda y forma a lo largo del trazado axial, o se extinguen en esta dirección, se dice que son disarmónicos (Fossen, 2010).

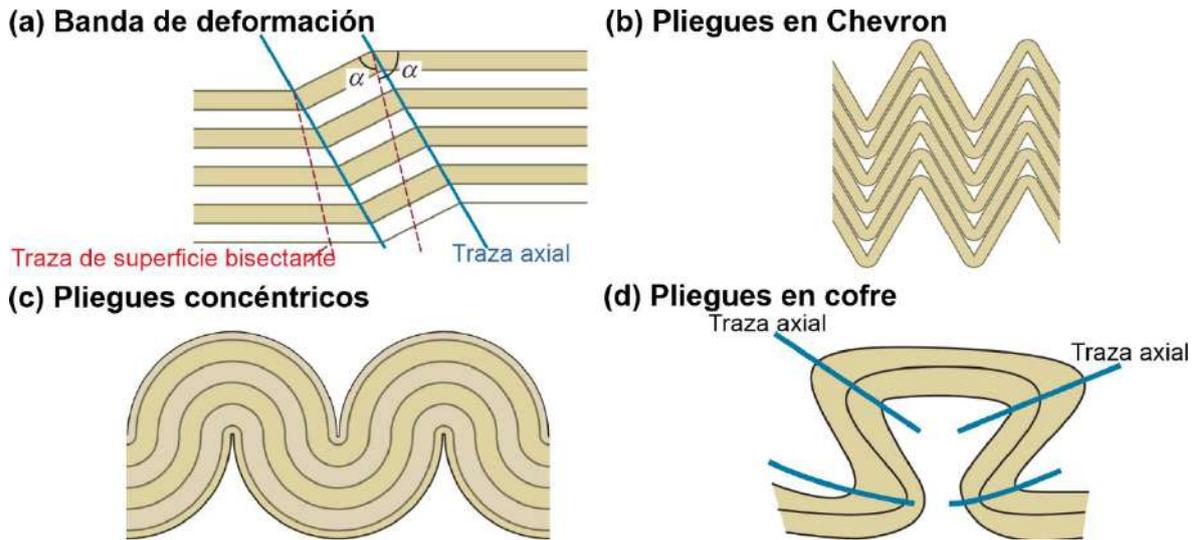


Figura 2.5. (a) Banda de deformación, donde la superficie de bisección, es decir, la superficie que divide el ángulo entre flancos en dos, es diferente de la superficie axial. (b) Pliegues de Chevron (armónicos). (c) Pliegues concéntricos, donde los arcos son circulares. (d) Pliegues en cofre, que muestran dos conjuntos de superficies axiales (Fossen, 2010).

El punto de curvatura máxima de una capa plegada se encuentra en el centro de la zona de charnela y se denomina punto de charnela (Figura 2.4). Los puntos de charnela están conectados en tres dimensiones por una línea de charnela. La línea de la charnela se encuentra comúnmente curvada, pero cuando aparece como una línea recta se llama eje de pliegue.

Los pliegues con líneas de charnela rectas son cilíndricos (ver Figura 2.6a). Todos los pliegues no son cilíndricos, ya que tienen que comenzar y terminar en algún lugar, o transferir la deformación a los pliegues vecinos, pero el grado de cilindridad varía de un pliegue a otro (Fossen, 2010).

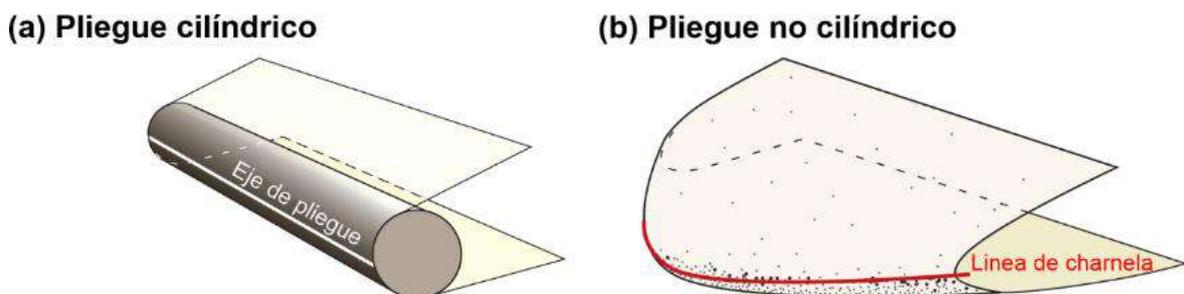


Figura 2.6. Geometría de pliegue cilíndricos y no cilíndricos (Fossen, 2010).

La orientación de un pliegue se describe por la orientación de su superficie axial y línea de charnela. Estos dos parámetros se pueden trazar uno contra el otro, como se hace en la Figura 2.7, y los nombres se han asignado a diferentes orientaciones del pliegue, los términos comúnmente utilizados son pliegues rectos y pliegues tumbados (Fossen, 2010).

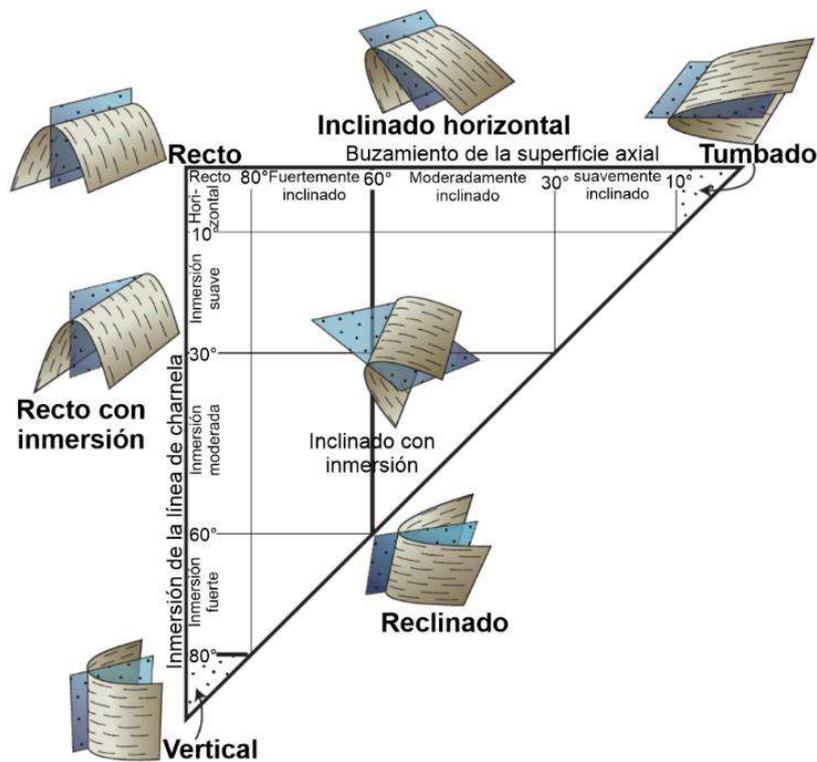


Figura 2.7. Clasificación de pliegues en función de la orientación de la línea de charnela y la superficie axial (Fleuty, 1964).

Fossen (2010), manifiesta que la mayoría de los pliegues que se muestran en la Figura 2.7, son antiformes. Un antiforme es una estructura donde los flancos bajan y se alejan de la zona de las charnelas, mientras que una sinforme es la forma opuesta, similar a una fosa (Figura 2.8b, c), cuando se da una estratigrafía a un antiforme se le llama anticlinal, y a un sinforme se le llama sinclinal. Cuando se repliega un pliegue tumbado isoclinal apretado durante una fase tectónica posterior, formarán un conjunto de sinformes y antiformes secundarias. La dirección de la estratificación joven a través de sus respectivas superficies axiales dependerá de si estamos en el flanco invertido o recto del pliegue tumbado, como se muestra en la Figura 2.8h. Ahora necesitamos dos nuevos términos, anticlinal sinformal y sinclinal antiformal, para separar los dos casos (Figura 2.8f, g).

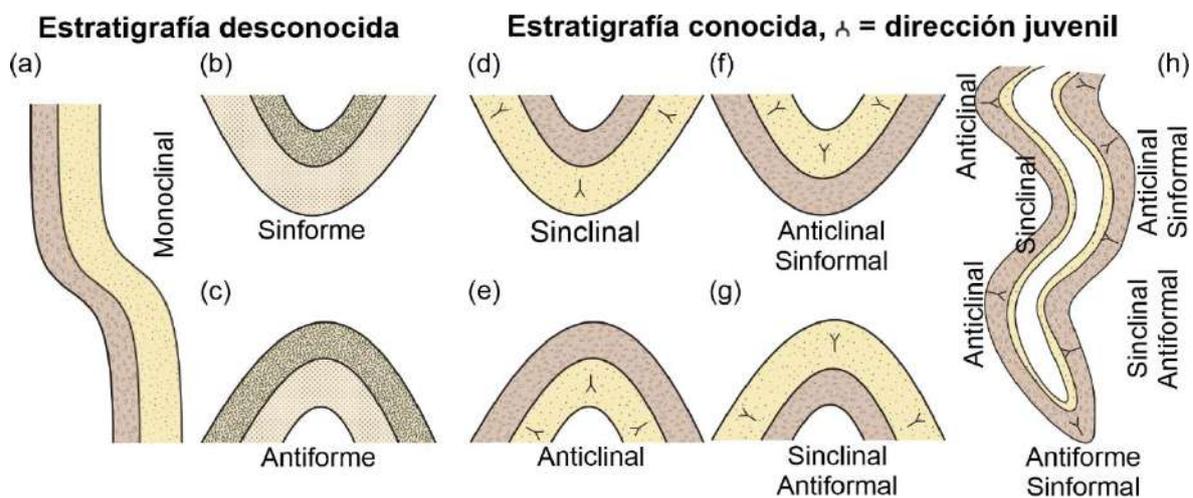


Figura 2.8. Formas básicas de pliegue. (h) ilustra cómo pueden ocurrir varios tipos de sinformes y antiformes en un pliegue replegado (Fossen, 2010).

El pliegue monoclinial es un pliegue sub-cilíndrico con un solo flanco inclinado (Figura 2.8a), los pliegues monoclinales se encuentran comúnmente como estructuras a escala de mapa relacionadas con la reactivación o compactación diferencial a través de fallas subyacentes o estructuras salinas (Fossen, 2010).

Además de la orientación y las relaciones estratigráficas, los pliegues se describen comúnmente o se clasifican según el ángulo entre flancos. Basado en este ángulo, los pliegues se separan en suaves, abiertos, apretados e isoclinales. (Figura 2.9). La apretura generalmente refleja la cantidad de distorsión involucrada durante el plegado (Fossen, 2010).

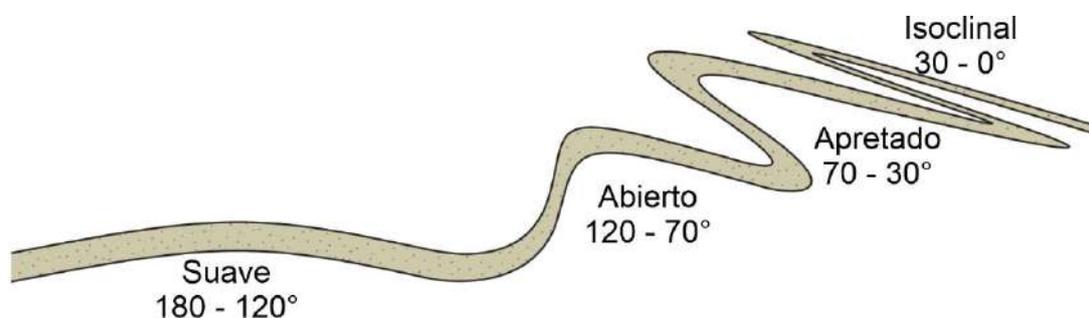


Figura 2.9. Clasificación de pliegues basada en el ángulo entre flancos (Fossen, 2010).

2.2.3.2. Modelos cinemáticos de plegamiento

▪ Deslizamiento por flexión

Según Fossen (2010), el deslizamiento por flexión implica deslizamiento a lo largo de las interfaces de capa o capas muy delgadas durante el plegamiento (Figura 2.10), se mantiene el grosor del estrato, la cual produce pliegues paralelos. Las superficies de la estratificación actúan como fallas y los slickenlines (líneas rojas en la Figura 2.10a) a veces se desarrollan en superficies deslizantes de las capas débiles. El deslizamiento máximo ocurre en los puntos de inflexión y se extingue hacia la línea de charnela, donde es cero.

▪ Flujo por flexión o corte por flexión

Según Fossen (2010), en los casos en que la deformación se distribuye de manera más uniforme en los flancos en forma de deformación por corte, el deslizamiento por flexión se convierte en el mecanismo corte por flexión o flujo de flexión. La deformación es cero en la zona de charnela y aumenta hacia los flancos, esto es así porque la deformación de corte está directamente relacionada con la orientación (rotación) de las capas, como se muestra en la Figura 2.10b: cuanto mayor es la rotación, mayor es la distorsión de corte. Los pliegues flexurales puros no tienen superficie neutra, y la distorsión aumenta lejos de la zona de charnela.

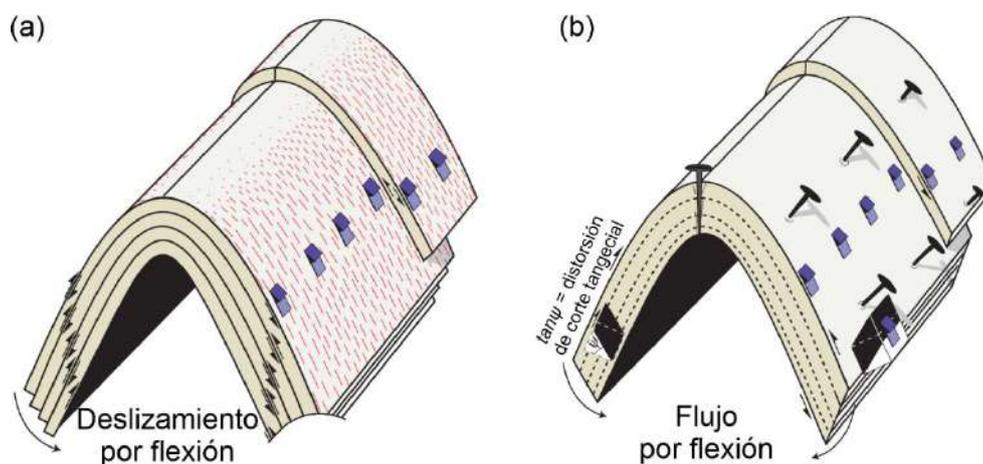


Figura 2.10. (a) Deslizamiento por flexión, muestra un sentido de deslizamiento opuesto en cada flanco, disminuyendo hacia la zona de la charnela. (b) Flujo por flexión, donde se cortan los flancos plegados. Idealmente, el espesor de la capa se conserva en ambos modelos (Fossen, 2010).

▪ Flexión ortogonal

Según Fossen (2010), en la flexión ortogonal todas las líneas originalmente ortogonales a las capas permanecen así a lo largo del historial de deformación; el resultado del plegamiento es el acortamiento de la parte interna, y el estiramiento de la parte externa donde suelen formarse venas convergentes hacia el plano axial. El eje largo de la elipse de deformación es ortogonal a la estratificación en la parte interna de la capa y paralelo a la estratificación en la parte externa, como se muestra en la capa de roca caliza plegada en la Figura 2.11. La flexión ortogonal produce pliegues paralelos con una superficie neutra que separa la extensión del arco exterior de la contracción del arco interior. La flexión ortogonal pura solo es posible para pliegues abiertos. La evidencia de flexión ortogonal se encuentra típicamente en capas rígidas y competentes que resisten la deformación dúctil.

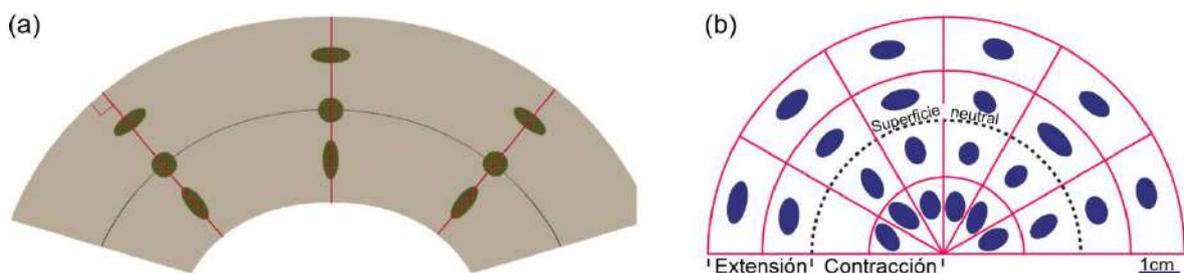


Figura 2.11. (a) Ilustra las líneas ortogonales a las capas de la estratificación (b) Distribución de deformación en la zona de charnela de una capa de roca caliza doblada en lutitas. El estiramiento del arco externo está separado del acortamiento del arco interno por una superficie neutra. De Hudleston y Holst (1984) (Fossen, 2010).

2.2.4. Fracturas

Una fractura es cualquier discontinuidad plana o subplanar que es muy estrecha en una dimensión en comparación con las otras dos y se forma como resultado de un esfuerzo externo o interno. A menudo se describen como superficies, pero a alguna escala siempre hay un grosor involucrado. Las fracturas se pueden separar en fracturas por cizallamiento (superficies de deslizamiento) y fracturas de apertura o extensión (Diaclasas, fisuras y venas), como se ilustra en las Figura 2.12. Además, se pueden definir fracturas de cierre o contracción (Fossen, 2010).

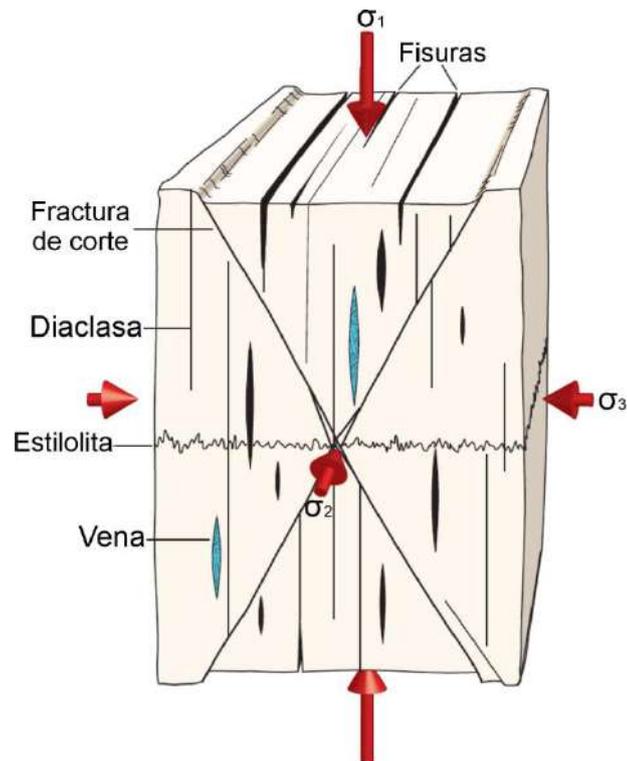


Figura 2.12. La orientación de varios tipos de fracturas con respecto a los esfuerzos principales (Fossen, 2010).

Según Fossen (2010), una fractura por corte o superficie de deslizamiento es una fractura a lo largo de la cual el movimiento relativo es paralelo a la fractura. El término fractura por corte se usa para fracturas con pequeños desplazamientos (escala de mm a dm).

Las fracturas de extensión son fracturas que muestran extensión perpendicular a las paredes. Las diaclasas tienen un desplazamiento extensional diminuto a través de las superficies diaclasadas. Las fracturas de extensión están llenas de gas, fluidos, magma o minerales. Cuando se llena con aire o líquido, usamos el término fisura. Las fracturas de extensión llenas de minerales se llaman venas, mientras que las fracturas llenas de magma se clasifican como diques.

Las estilolitas son fracturas de compactación caracterizada por superficies muy irregulares, es por ello que se considera como fracturas de contracción o de cierre.

2.2.5. Diaclasas

Las diaclasas son fracturas sin desplazamiento visible perpendicular a la superficie de la fractura, probablemente las estructuras frágiles más común que se ve en la superficie de los continentes, por lo general cortan otras estructuras por ser

relativamente tardías. Tienen características morfológicas distintivas que los distinguen de otras estructuras, y pueden funcionar como redes que conducen el flujo de fluidos en el subsuelo. Las diaclasas, fisuras y venas pertenecen a la misma familia de estructuras; son estructuras de extensión, la diferencia es que las fisuras se abren mucho más que las diaclasas, las fisuras y diaclasas llenas de minerales se denominan venas (Fossen, 2016).

2.2.5.1. Ocurrencia

Según Fossen (2016), las diaclasas generalmente ocurren en poblaciones, y con frecuencia hay poblaciones o subpoblaciones de diaclasas que muestran una orientación, morfología y un crecimiento similar. Comúnmente hay más de una población presente en rocas diaclasadas, y el patrón combinado de dos o más poblaciones juntos se le llama sistemas de diaclasas. Estos sistemas suelen ser Ortogonales, pseudo conjugados y poligonales (ver Figura 2.13).

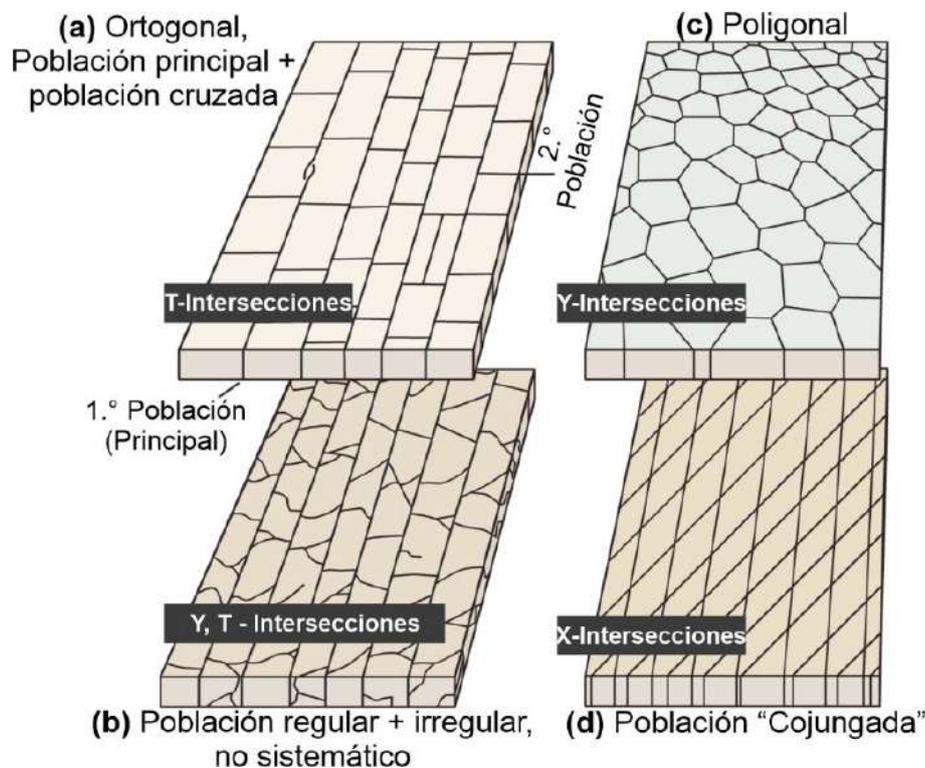


Figura 2.13. Intersección entre diaclasas (Letras T, Y, X), normalmente, la población pasante es el primero, las diaclasas más cortas se llenan entre ellas en una etapa posterior, a veces como un proceso continuo (Fossen, 2016).

2.2.5.2. Formación de las diaclasas

Las diaclasas se forman principalmente en la corteza superior frágil. Son particularmente comunes en rocas rígidas; areniscas, calizas bien litificadas, rocas graníticas y lavas, y pueden estar dispersas en grandes regiones o localizadas en zonas o corredores de fracturas. Se necesita esfuerzo de tensión para formar diaclasas. El esfuerzo de tensión debe exceder la resistencia de la roca., esto puede suceder muy cerca de la superficie, donde uno de los esfuerzos puede volverse tenso, pero también a más profundidad si se acumula una presión de fluido de poro suficientemente grande (Fossen, 2016).

Martínez (2003), propone 5 procesos que provocan la génesis de diaclasas:

- Levantamiento y descompresión: cuando un macizo rocoso está siendo levantada o se acerca a la superficie se ve sometida a esfuerzos tensionales, si estos esfuerzos son lo suficientemente altos, la roca se fracturará dando lugar a diaclasas.
- Diaclasas laminares o descamaciones: son diaclasas paralelas a la superficie, se generan donde los esfuerzos compresivos horizontales son más importantes que los originados por la carga vertical o donde existen esfuerzos residuales que se liberan durante la aproximación de la roca a la superficie, generalmente presentes en rocas intrusivas.
- Fracturación hidráulica: Las diaclasas que se forman en profundidad donde no existen, en principio, esfuerzos tensionales se deben al efecto de la actuación de los fluidos existentes en las rocas a través de la presión de poro, la cual genera esfuerzos tensionales provocando fracturas tensionales debido al efecto del poro elástico.
- Diaclasas ligadas a procesos tectónicos: se relacionan con pliegues y fallas. Las diaclasas relacionadas con pliegues, se identifican 3 tipos (normales al eje, paralelas al eje y perpendiculares a la estratificación). Respecto a las fallas son las que están relacionadas con el mismo campo de esfuerzos en que se está generando la falla, asociadas a las tensiones locales que puedan estar relacionadas con los movimientos de los bloques separados por las fallas, y diaclasas generadas en relación a los esfuerzos tensionales que se producen localmente durante el movimiento de la falla.
- Diaclasas debidas a la intrusión de rocas ígneas o diapiros salinos: El

emplazamiento de rocas ígneas o salinas produce tensiones locales en sus alrededores, dada la forma que tienen estos cuerpos de roca, aproximadamente circulares, se producen dos tipos de diaclasas, unas de carácter radial y otras concéntricas alrededor de la intrusión o del diapiro si no existe un campo de esfuerzos remoto. En el caso de que exista dicho campo de esfuerzos remoto, ese patrón se ve distorsionado perdiendo la simetría radial perfecta.

2.2.5.3. Diaclasas relacionadas con pliegues

Se pueden formar diaclasas y fracturas por cizallamiento durante el plegado de las capas, y si lo hacen, puede surgir un patrón similar al que se muestra en la Figura 2.14. Y algunas diaclasas y venas ya pueden haberse formado antes del plegado, si ese es el caso las venas están orientadas de manera diferente en cada flanco, y que han experimentado un deslizamiento por flexión consistente con el plegamiento de deslizamiento por flexión (Fossen, 2016).

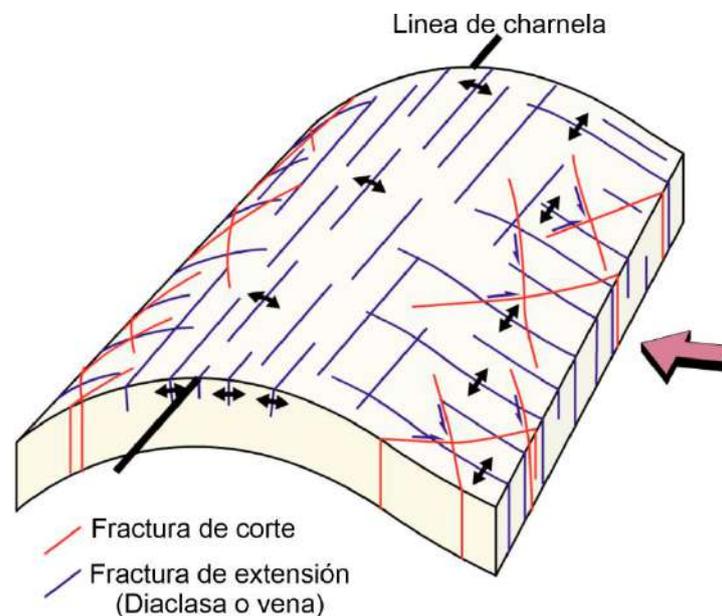


Figura 2.14. Fracturas por cizallamiento que pueden formar conjuntos conjugados. Y fracturas de extensión (venas, fisuras y diaclasas), que no pueden formar conjuntos conjugados (Fossen, 2016).

Sitter (1976), manifiesta que de acuerdo con la teoría de Morh y Anderson, los planos de cizalla, ya sean fallas o diaclasas, se desarrollan en planos paralelos al esfuerzo principal medio y forma un ángulo biseccionado por la dirección del esfuerzo más grande, mientras que las grietas de tensión o fisura se orientan en

sentido paralelo a este esfuerzo mayor y perpendicular al esfuerzo principal menor. Es por ello que se desarrollan en el anticlinal sistemas de fallas pequeñas orientadas de forma distinta que, en el sinclinal. En el arco anticlinal de una capa de caliza compacta puede haber esfuerzos de tensión locales en el arco exterior perpendicular al eje. Esta sería la dirección del esfuerzo menor, con el peso constituyendo el esfuerzo medio y el esfuerzo mayor paralelo al eje (Figura 2.15), por el contrario, puede haber en el sinclinal una compresión local perpendicular al eje, en ambos casos se desarrollan grupos de grietas de cizalla con un ángulo agudo cuya bisectriz es el esfuerzo mayor, pero orientado de forma distinta en relación con la dirección del eje.

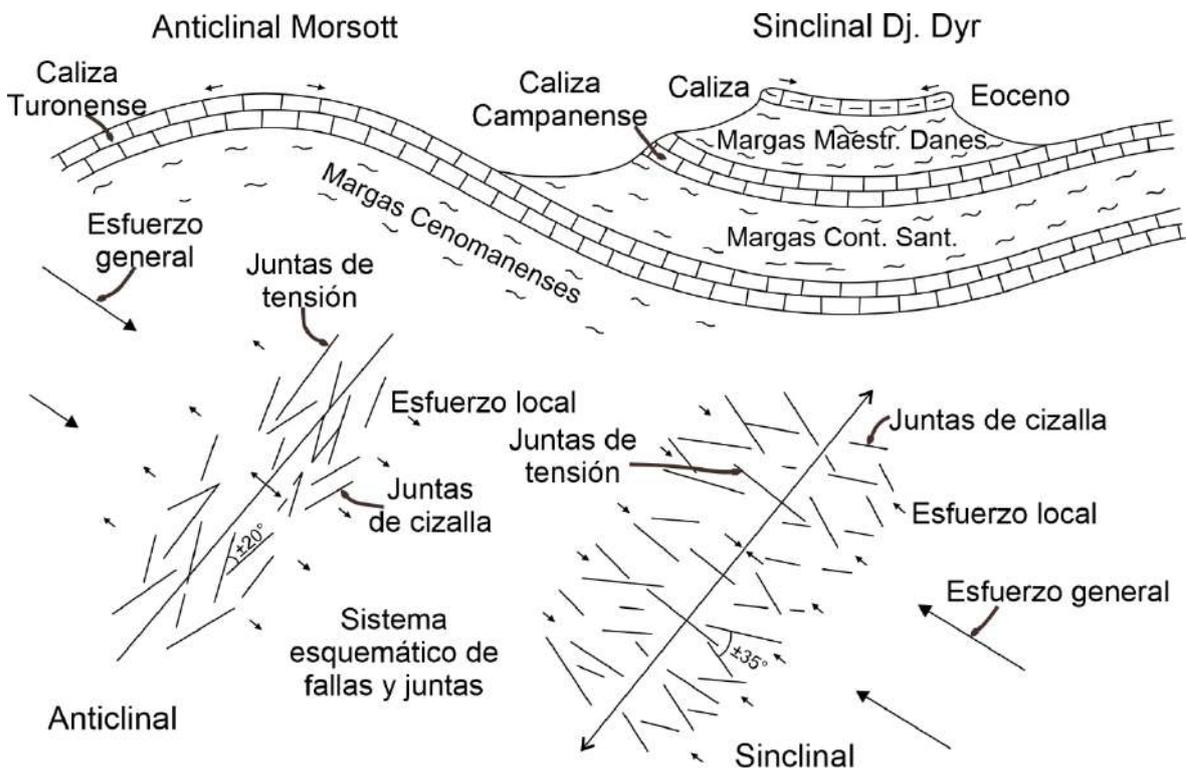


Figura 2.15. Origen de los sistemas de fallas en anticlinales y sinclinales adjuntos (Sitter, 1976).

2.2.5.4. Distribución De Diaclasas

Las diaclasas están típicamente distribuidas de manera más o menos uniforme en áreas amplias; opuesto a las fallas que tienden a localizarse por zonas. En las rocas sedimentarias, las diaclasas también se producen en cantidades mucho mayores en capas rígidas que en las blandas; cuanto más gruesa es la capa rígida, mayor es el espacio, una distancia promedio entre diaclasas (Fossen, 2016).

2.2.6. Venas

Una vena es una fractura llena de cristales minerales que precipitaron de una solución acuosa. Algunas venas se iniciaron como diaclasas, mientras que otras se iniciaron como fallas o como grietas adyacentes a las fallas. Las venas vienen en todas las dimensiones; algunos son más angostos y más cortos que un mechón de pelo, mientras que otros comprenden acumulaciones tabulares masivas de metros de largo y decenas de metros de largo. Los grupos de venas se denominan “vein arrays” y tienen una variedad de formas (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.6.1. Formación de grupos de venas

Van Der Pluijm & Marshak (1997), sustentan tres grupos de venas. Los grupos sistemáticos planos (Figura 2.16a) representan la mineralización de un conjunto de diaclasas sistemático preexistente o la mineralización durante la formación de un conjunto de diaclasas sistemático. Los grupos de venas en Stockwork (Figura 2.16b) se forman donde la roca se ha roto, ya sea por la existencia de una presión de fluido localmente muy alta, o como resultado de una fractura generalizada en asociación con plegamiento. Y los grupos de venas en echelon se forman de dos maneras diferentes; rellenando las diaclasas en echelon en la franja hackle de una diaclasa más grande, y como consecuencia de la cizalladura dentro de un cuerpo de roca que se asocia con el desplazamiento a través de una zona de falla (Figura 2.16c, d).

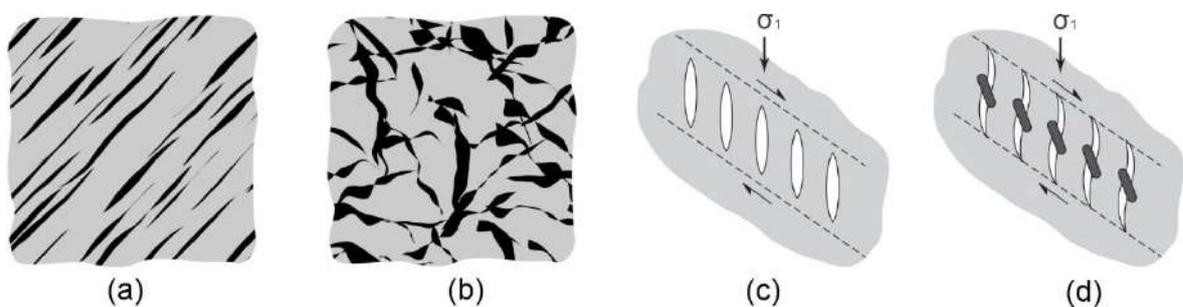


Figura 2.16. Conjuntos de venas. (a) Grupo de venas planas. (b) Grupo de venas en stockwork. El relleno de vena es oscuro. (c) Formación de un grupo simple en echelon. (d) Formación de venas sigmoidales en echelon (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.6.2. Relleno de venas

Van Der Pluijm & Marshak (1997), sustentan dos tipos de relleno. Las venas en bloque, los cristales del relleno de la vena son más o menos equivalentes y pueden presentar caras de cristal (Figura 2.17a), a aparición de venas en bloque significa que la vena era una cavidad abierta cuando el mineral precipitaba. Y las venas fibrosas, los cristales son largos en relación con su ancho, de modo que la vena tiene la apariencia de estar extendida por un montón de pelos (Figura 2.17b).

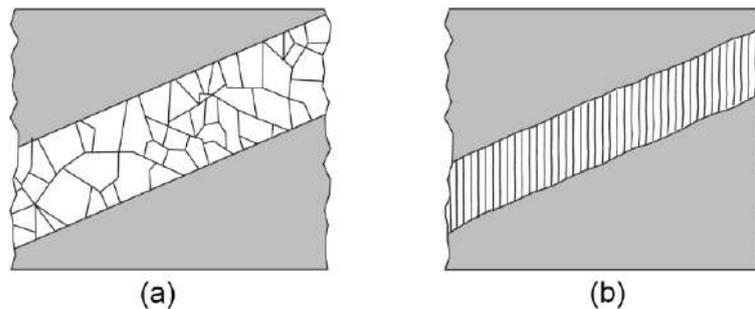


Figura 2.17. Tipos de relleno de venas. (a) Relleno de vena en bloque. (b) Relleno de vena fibroso (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.7. Fallas

En un sentido general, una falla es cualquier superficie o zona en la Tierra a través de la cual se desarrolla un deslizamiento medible (desplazamiento de corte). En un sentido más restringido, las fallas son fracturas en las cuales el deslizamiento se desarrolla principalmente por procesos de deformación frágil. Esta segunda definición sirve para distinguir una "falla", de una zona de falla y una zona de corte (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

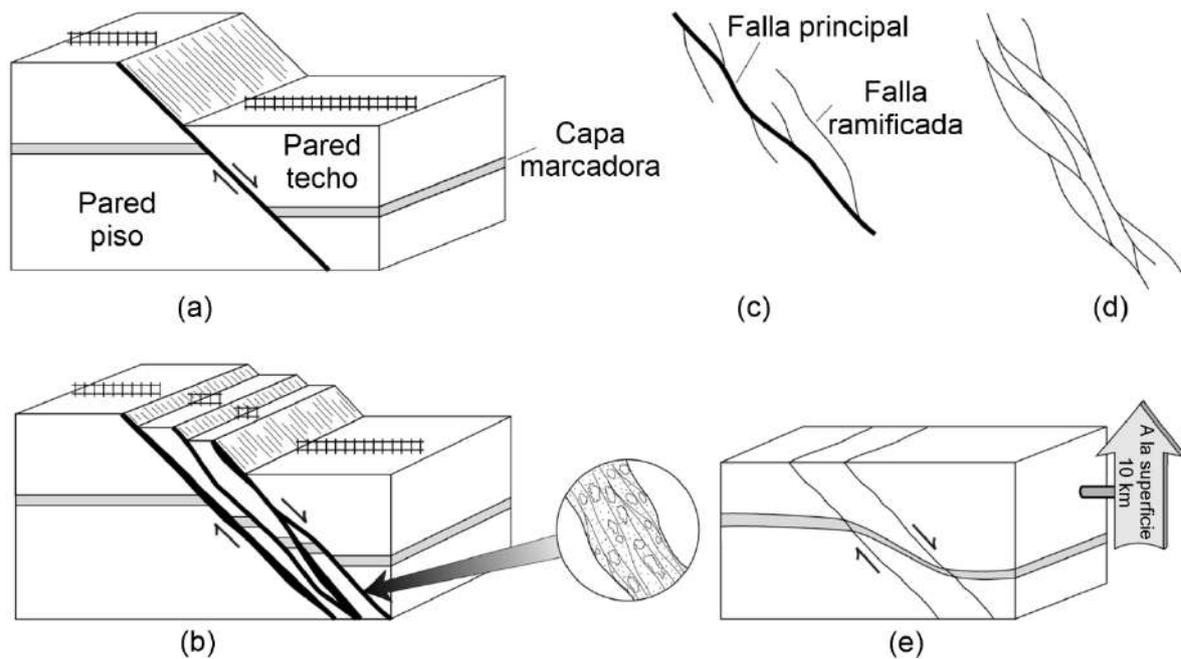


Figura 2.18. Bocetos que ilustran las diferencias entre fallas, zonas de fallas y zonas de corte. (a) Falla. (b) Zona de falla, con recuadro que muestra deformación cataclástica adyacente a la superficie de falla. (c) Boceto que ilustra la relación entre una falla principal y ramificación de fallas menores. (d) Fallas anastomosados en una zona de falla. (e) Una zona de corte, que muestra la continuidad de la roca a través de la zona. Se muestra que los desplazamientos se cruzan con la superficie del suelo, mientras que la zona de corte se produce a profundidad en la corteza (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.7.1. Geometría y desplazamiento de la falla

Una falla se refiere como una superficie geométrica en un cuerpo de roca. La roca adyacente a la superficie de la falla es la pared de la falla, y el cuerpo de roca que se movió como consecuencia del deslizamiento en la falla es un bloque de falla. Si la falla no es vertical, se puede distinguir entre el bloque de pared techo (hanging-wall), que es el cuerpo de roca sobre el plano de falla, y el bloque de pared pie (footwall), que es el cuerpo de roca debajo del plano de falla (Figura 2.18a). Para describir el posicionamiento de una falla con precisión, medimos la dirección (strike) y buzamiento (Dip). Comúnmente, se usan adjetivos como horizontal ($<10^\circ$), bajo ($10^\circ-30^\circ$), moderado ($30^\circ-60^\circ$), fuerte ($60^\circ - 80^\circ$), vertical ($\approx 90^\circ$), para transmitir una imagen aproximada del buzamiento de la falla. A las fallas cuyo buzamiento disminuye progresivamente con la profundidad se les ha dado el nombre especial de fallas lítricas (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

Cuando se produce un movimiento de falla, un bloque de falla se desliza en relación con el otro, lo cual se describe por el deslizamiento neto. Se puede describir completamente el desplazamiento especificando el vector de deslizamiento neto, que conecta dos puntos anteriormente adyacentes que ahora están en paredes opuestas de la falla (Figura 2.19). Para describir un vector de deslizamiento neto, debe especificar su magnitud y orientación (plunge y rumbo, o rake en un plano), y el sentido de deslizamiento (o sentido de corte). Como cualquier vector, el vector de deslizamiento neto puede dividirse en componentes; si el vector de deslizamiento neto es paralelo a la dirección de del buzamiento (dip direction) de la falla, la falla se llama falla de deslizamiento vertical (dip-slip); si el vector es más o menos paralelo a la dirección de la falla, la falla se llama falla de deslizamiento según el rumbo (strike-slip); y si el vector no es paralelo a la dirección del buzamiento ni a la dirección de la falla, llamamos a la falla una falla de deslizamiento oblicuo, como puede ver en la Figura 2.19 (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

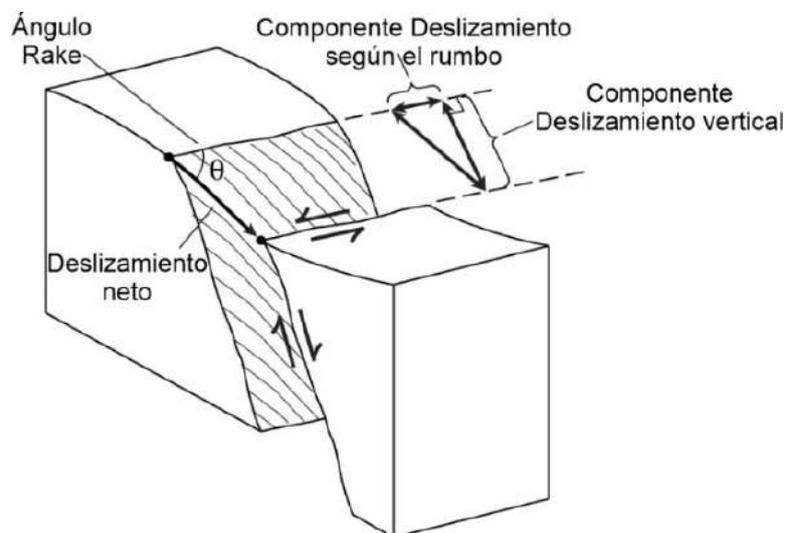


Figura 2.19. Boceto de diagrama de bloques que muestra el vector de deslizamiento neto con sus componentes de deslizamiento según el rumbo y deslizamiento vertical, así como el rake y el ángulo de rake (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

En una falla de deslizamiento vertical, las fallas de pared techo hacia abajo se llaman fallas normales, y las fallas de pared techo hacia arriba se llaman fallas inversas (Figura 2.20a y b). En una falla de deslizamiento según el rumbo, si la pared opuesta de la falla se mueve hacia su derecha, la falla es lateral derecha (dextral), y si la pared opuesta de la falla se mueve hacia su izquierda, la falla es

lateral izquierda (sinestral) (Figura 2.20c y d).

En una falla de deslizamiento oblicuo se especifica los componentes de deslizamiento vertical y deslizamiento según el rumbo (Figura 2.20e– h). Finalmente, en una falla tijera (Figura 2.20i), la cantidad de deslizamiento cambia a lo largo de la dirección de la falla de modo que el bloque de pared techo gira alrededor de un eje que es perpendicular a la superficie de falla (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

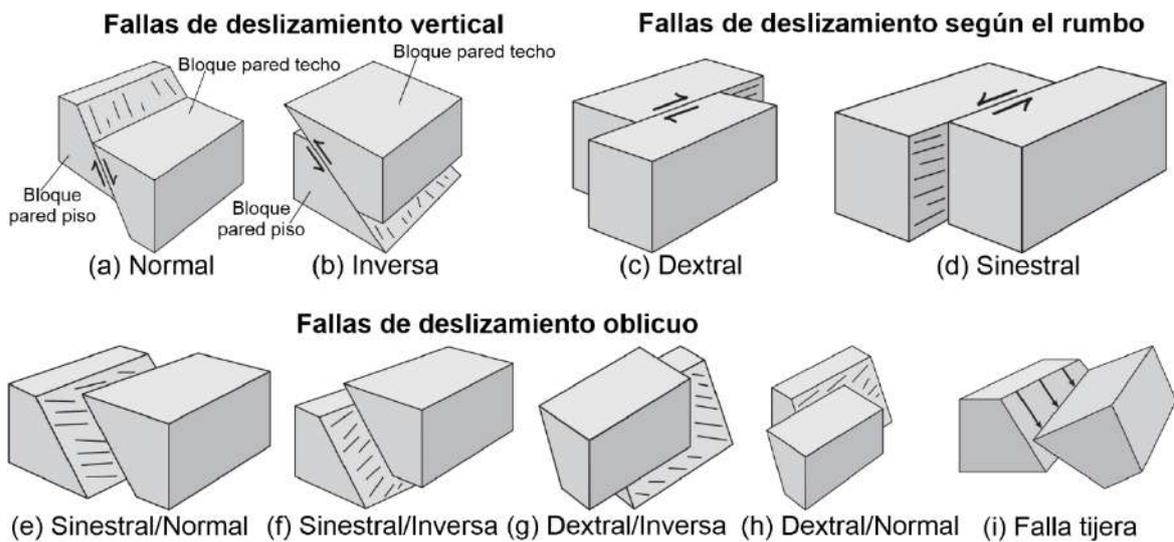


Figura 2.20. Bocetos de diagrama de bloques que muestran los diferentes tipos de fallas (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

Dos fallas normales separadas que buzcan una hacia la otra crean un bloque hacia abajo conocido como graben (Figura 2.21), las fallas normales que buzcan en sentido opuesto el uno del otro crea un bloque hacia arriba llamado horst. Las fallas más grandes en un área con fallas, se llaman fallas maestras, están asociadas con fallas menores que pueden ser antitéticas o sintéticas; una falla antitética tiene buzamiento hacia la falla maestra, mientras que una falla sintética tiene buzamiento en la misma dirección que la falla maestra (Figura 2.21), estas expresiones son relativas y solo tienen sentido cuando fallas menores están relacionadas con fallas específicas de mayor escala (Fossen, 2010).

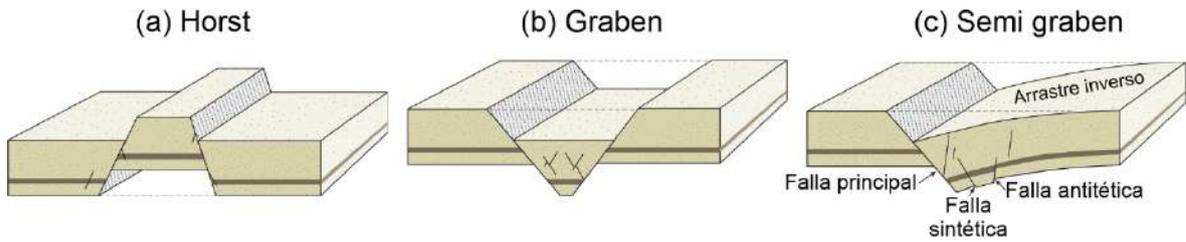


Figura 2.21. (a) Horst. (b) Graben simétrico. (c) Graben asimétrico, también conocido como semi graben, se muestran fallas antitéticas y sintéticas (Fossen, 2010).

2.2.7.2. Separación de fallas

Fossen (2010), manifiesta que, el desplazamiento aparente que se observa en una sección o plano se llama separación (aparente). La separación horizontal es la separación de capas observada en una exposición horizontal o mapa (Figura 2.22b), mientras que la separación por buzamiento es la observada en una sección vertical (Figura 2.22c). En una sección vertical, la separación por buzamiento se puede descomponer en la separación horizontal y vertical, estas dos separaciones registradas en una sección vertical se denominan más comúnmente Heave y Throw (Figura 2.22c). Solo una sección que contiene el vector de desplazamiento verdadero muestra el desplazamiento verdadero o el deslizamiento total en la falla (Figura 2.22d).

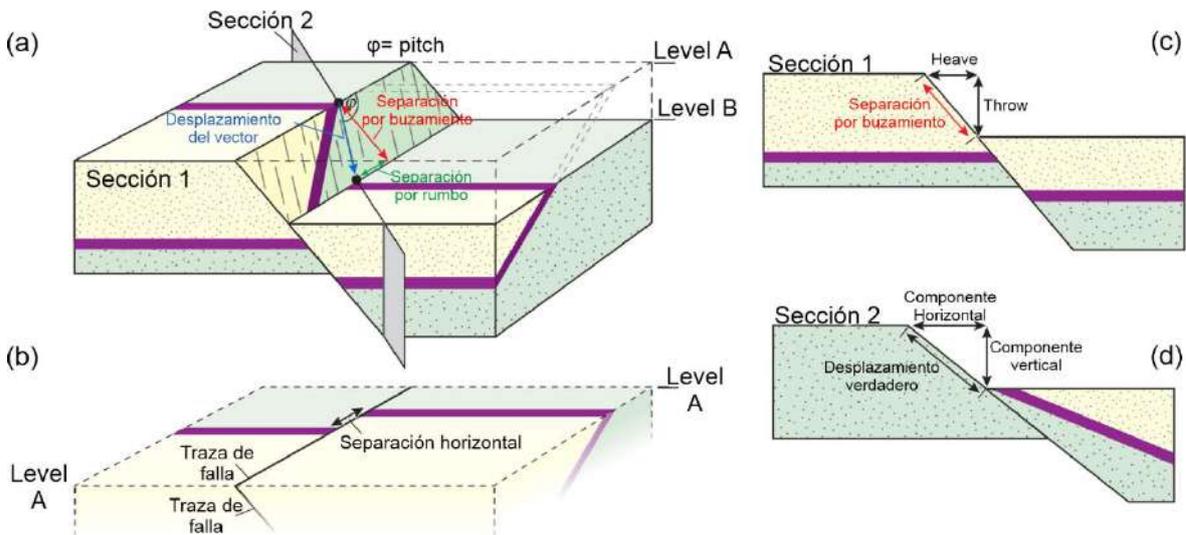


Figura 2.22. Ilustración de una falla normal que afecta una capa inclinada. La falla es una falla normal con un componente de deslizamiento de rumbo dextral (a), pero aparece como una falla sinistral en la vista de mapa (b, que es la sección horizontal en el nivel A). (c) muestra perfil perpendicular a la falla de rumbo y (d) muestra perfil en la dirección de desplazamiento verdadero (Fossen, 2010).

Van Der Pluijm & Marshak (1997), manifiesta que, para determinar el deslizamiento neto, se puede obtener información valiosa sobre el desplazamiento de fallas buscando lineamientos de deslizamiento e indicadores de sentido de corte. Las líneas de deslizamiento solo definen el plunge y el rumbo del vector de deslizamiento neto, y con indicadores de sentido de corte definen la dirección en la que apunta el vector.

2.2.7.3. Curvaturas de falla

Las fallas de deslizamiento vertical que atraviesan una secuencia estratigráfica contienen numerosas curvas que hacen que el trazo de la falla en la sección transversal se parezca a una escalera. Algunos segmentos de fallas corren paralelos a la estratificación, llamados rellanos (flats); y algunos cortan la estratificación, llamados rampas (ramps) (Figura 2.23a). Al describir fallas en escalones en una secuencia estratificada, se debe especificar si un segmento de falla es una rampa o un rellano con respecto a los estratos de la pared techo, la pared pie o ambos (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

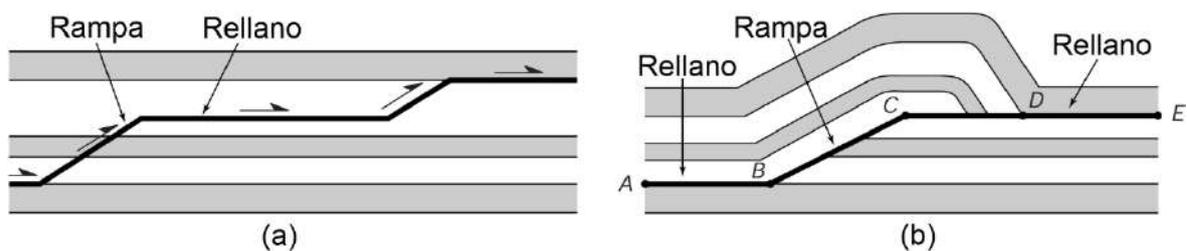


Figura 2.23. (a) Sección transversal que muestra la geometría de rampas y rellanos a lo largo de una falla de empuje. La geometría de la falla se muestra antes del desplazamiento en la falla. (b) Sección transversal que ilustra los rellanos y rampas de las paredes techo y paredes pie (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

La presencia de curvas a lo largo de una falla de deslizamiento según el rumbo provoca una contracción o extensión a través del escalón. Las ubicaciones donde la curva está orientada de tal manera que los bloques en los lados opuestos de la falla están apretados entre sí son curvaturas de restricción, mientras que las ubicaciones donde la curva está orientada de tal manera que los bloques en los lados opuestos de la falla se separan entre sí son curvaturas liberadas como se

muestra en la Figura 2.24. Cuando el movimiento a través de un segmento de una falla de deslizamiento según el rumbo produce algo de compresión, decimos que la transpresión ocurre a través de la falla, y donde el movimiento resulta en alguna extensión, decimos que la transtensión ocurre a través de la falla. En una falla dextral, un escalón hacia la izquierda produce una curva de restricción y un escalón hacia la derecha produce una curva de liberación (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

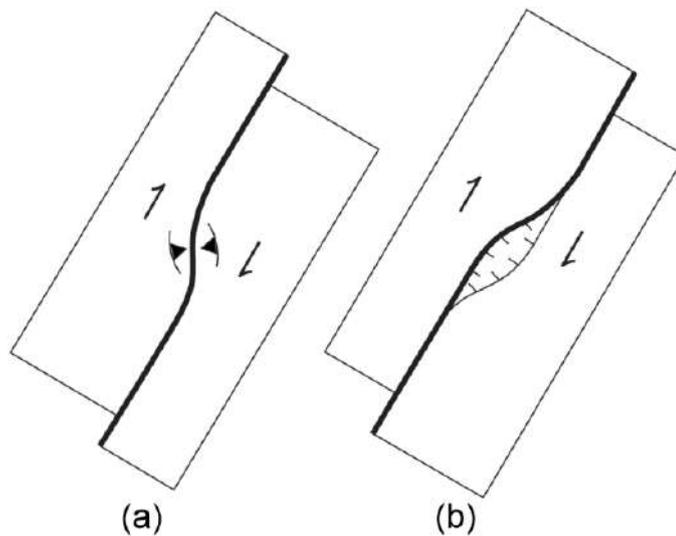


Figura 2.24. Ilustraciones de vista de mapa de (a) una curvatura de restricción y (b) una curvatura de liberación a lo largo de una falla de deslizamiento de rumbo lateral derecho (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.7.4. Slickensides y Lineaciones de deslizamiento

Las superficies de falla que han sido pulidas por el proceso de deslizamiento por fricción se denominan slickensides. Los slickensides se forman en la roca de la pared original de la falla o en la superficie de una capa delgada de gouge/cataclasita. Algunas rugosidades en una pared de la falla se introducen en la superficie de la otra pared, creando lineamientos de estrías en el slickenside, lo que resulta en la formación de un slickenside lineal, también llamado slickenlines. Las líneas de deslizamiento tienden paralelamente a un aumento de desplazamiento neto en una falla y, por lo tanto, le permiten determinar si el aumento dio como resultado un desplazamiento según el rumbo, deslizamiento vertical o desplazamiento oblicuo (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.7.5. Conjunto de fallas

Las fallas no ocurren de forma aislada, sino que son parte de un conjunto de fallas asociadas que se desarrollan durante el mismo intervalo de deformación y en respuesta al mismo campo de esfuerzo regional (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

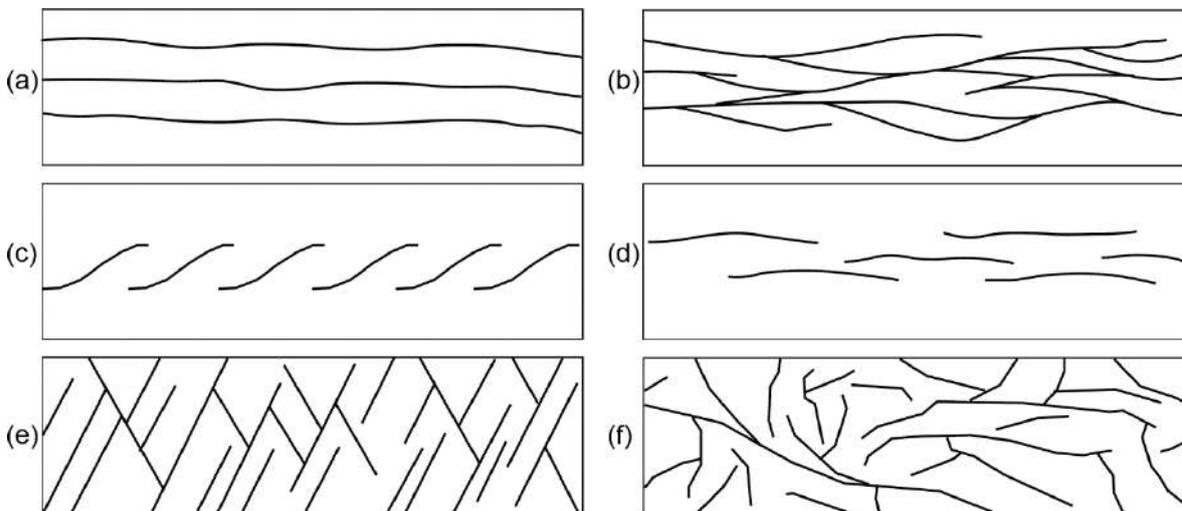


Figura 2.25. Vista de mapa de varios conjuntos de fallas. (a) paralelas, (b) anastomosado, (c) echelon, (d) relay, (e) conjugadas y (f) aleatorias (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.7.6. Pliegues concéntricos y fallas asociadas

Según Sitter (1976), casi todas las estructuras anticlinales van imbricadas con sistemas de fallas, sobre todo cuando el eje anticlinal se sumerge. Todas estas fallas tienen un origen común en las tensiones que resultan de la forma tridimensional producida por el levantamiento. La forma más simple de falla, es falla de corriente transversal perpendicular al eje (Figura 2.26), la cual resulta del esfuerzo del arco longitudinal de culminación del eje anticlinal. La mayoría de las fallas buzcan hacia el punto de culminación y su profundidad máxima la tienen cerca de la crestería. Mueren en los flancos, cuyas líneas estructurales de contorno se ponen paralelas, ya que allí desaparecen las tensiones longitudinales.

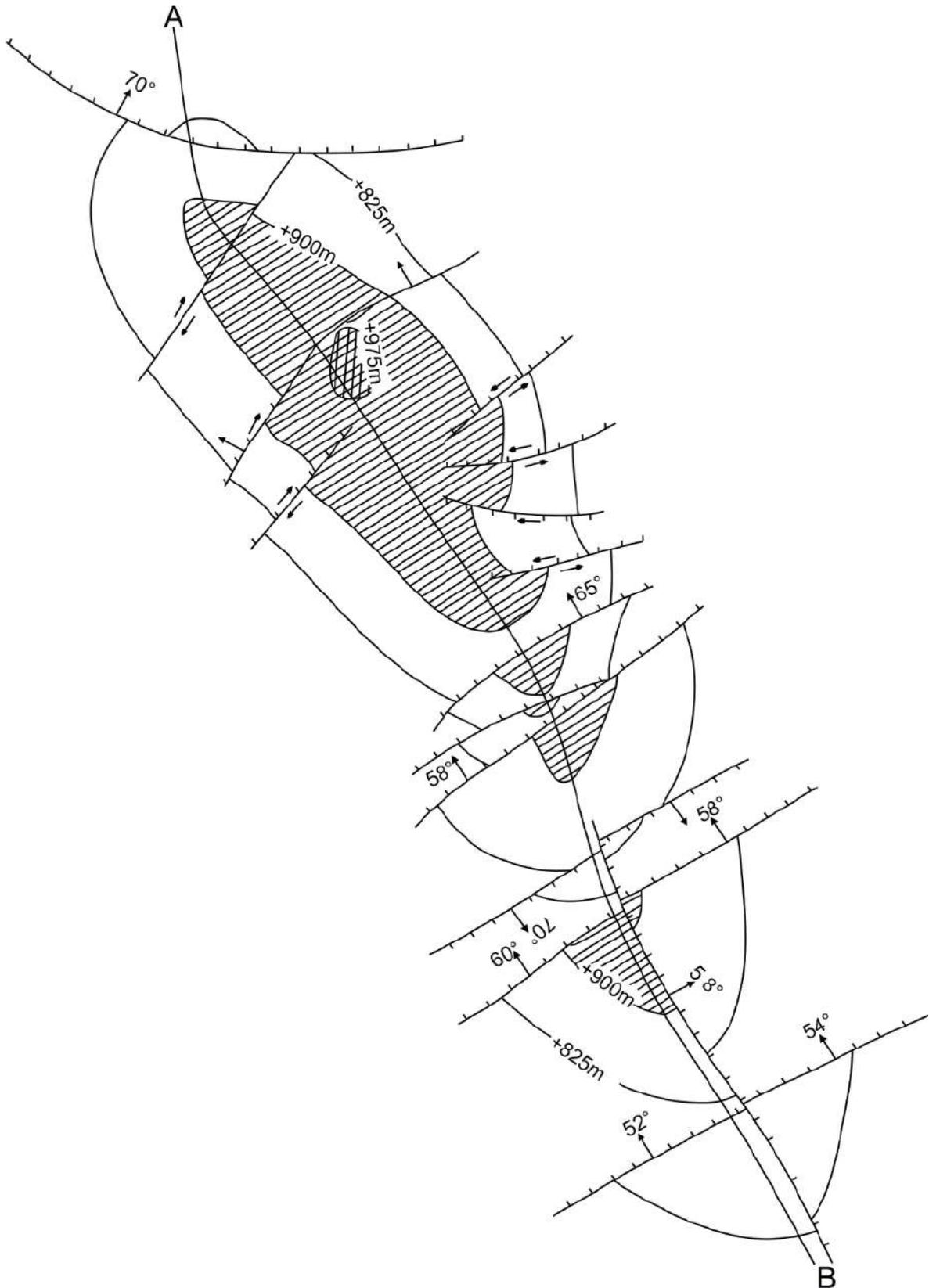


Figura 2.26. Campo petrolífero Elk Basin, con fallas transversales y diagonales (Bartram, 1929).

Según Sitter (1976), las fallas transversales van acompañadas de grupos de fallas de flanco, que desaparecen en las crestas y más allá de los flancos. En la parte donde se sumergen el anticlinal aparecen sistemas de fallas peculiares. Se les puede llamar fallas perianticlinales. En general se distinguen dos clases de fallas perianticlinales: las que tienen efecto de estiramiento y alargan el cierre periclinal, y las relacionadas con una curvatura de perianticlinal (Figura 2.27). Por último las fallas de crestería longitudinales que son las últimas en formarse, se debe a la tensión del arco superior del pliegue, buzan hacia la charnela soportando pequeños bloques hundidos, se cortan mutuamente por debajo y cerca de la superficie actual.

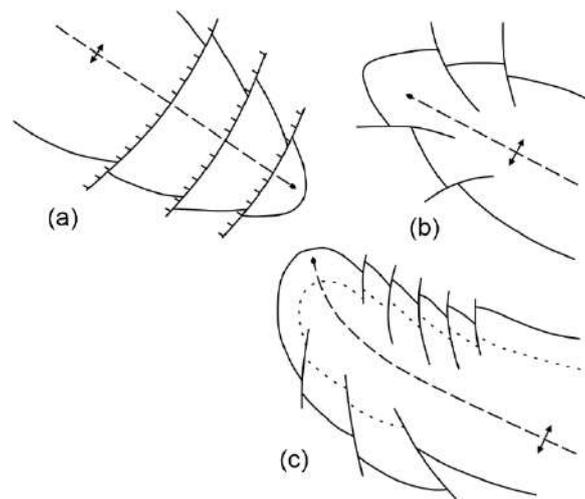


Figura 2.27. Fallas perianticlinales. a) fallas de tensión normales ordinarias; b) alargamiento por fallas de cizallas; c) cizalla de compresión en el lado convexo y cizalla de compresión en el cóncavo (Sitter, 1976).

2.2.7.7. Análisis cinemáticos de fallas

El análisis cinemático es el arte de descubrir el sentido relativo de movimiento a través de fallas y zonas de cizalla. Para hacer esto se utilizan "criterios cinemáticos", es decir, estructuras y microestructuras que se desarrollan durante la falla, y cuyas características geométricas dependen del sentido de corte (Rey, 2016).

2.2.7.7.1. Criterio Riedel

Las fracturas R son sintéticas con el movimiento principal, formando un ángulo de unos $\sim 15^\circ$ con la falla principal. Y las fracturas R' son conjugadas respecto de las fracturas R, con movimiento antitético respecto de la falla principal, con la cual

forma un ángulo de unos $\sim 75^\circ$. En la figura 2.28b se observa que las fracturas R y R' son bisectadas por estructuras de tipo T o tensionales (venas, diaclasas y fallas normales); y las estructuras P (pliegues, fallas inversas, estilolitos y esquistosidad) originadas por presión local entre fracturas Riedel, presentan un ángulo de $\sim 15^\circ$ en sentido contrario a las fracturas R (Niemeyer, 1999).

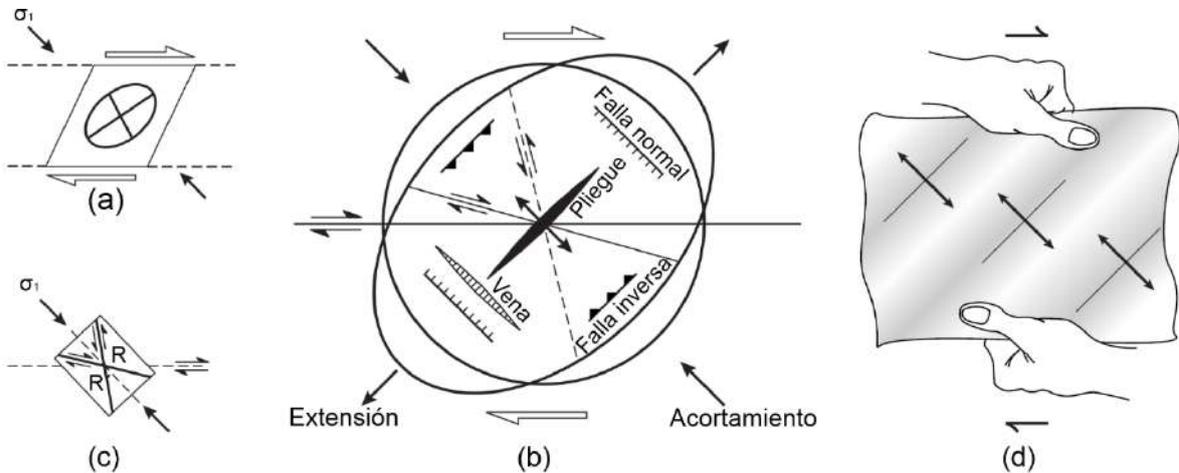


Figura 2.28. Un modelo de distorsión que explica el origen de las estructuras subsidiarias a lo largo de una falla de deslizamiento según el rumbo. (a) Una vista de mapa de corte simple dextral. (b) Un detalle de la elipse de distorsión que muestra que los pliegues y las fallas inversas se forman perpendiculares a la dirección de acortamiento, mientras que las fallas normales y venas se forman perpendiculares a la dirección de extensión. (c) Tenga en cuenta que R y R' son similares a las fracturas de cizallamiento conjugado formadas en un cilindro de roca sometido a un esfuerzo axial. (d) Simulación de la deformación de pliegues en echelon con una hoja de papel (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.7.7.2. Escalones y Fibras recristalizadas

Las fibras de minerales (típicamente cuarzo, calcita o clorita) recristalizadas formadas en escalones de liberación a lo largo de la falla nos proporciona el sentido de cizalla, ver Figura 2.29. En cambio, los escalones de restricción se oponen al movimiento de la falla, por presentar una cara oblicua a la superficie de la falla (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

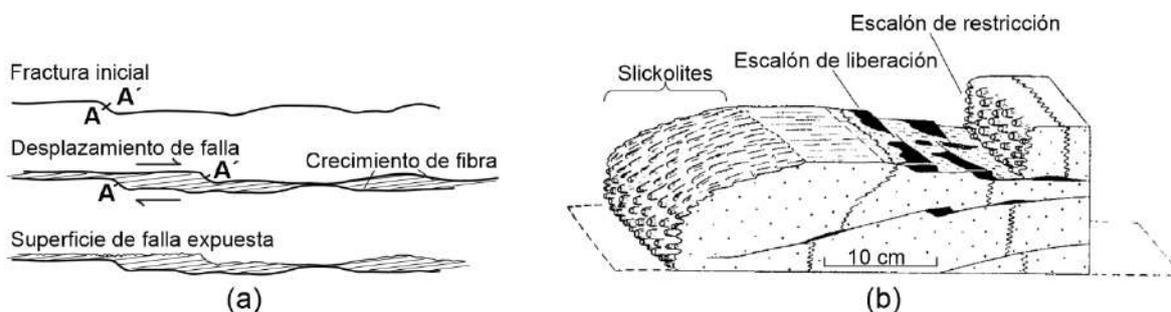


Figura 2.29. (a) Ilustración del crecimiento de fibras de deslizamiento a lo largo de una falla, y (b) diagrama de bloques que ilustra los escalones a lo largo de una superficie de falla recubierta de fibra. Los escalones de liberación se convierten en el lugar de crecimiento de las venas, y los escalones de restricción oblicuos se convierten en slickolitas (Van Der Pluijm & Marshak, 1997).

2.2.8. Yacimientos tipo pórfido

Según Sillitoe (2010), los depósitos de pórfido son de origen magmático – hidrotermal relacionado a rocas intermedias a félsicas, generados en entornos de arco magmático, mostrando una marcada tendencia a ocurrir en cinturones lineales. Las intersecciones entre las estructuras intra-arco y las zonas de fallas transversales a los lineamientos continentales, facilitan el ascenso de los volúmenes de magma y posteriormente el emplazamiento de los depósitos de pórfido.

Su mineralización de los depósitos tipo pórfido consiste en minerales principales de Cu, Au y Mo que se encuentran diseminados en las venillas y brechas que se distribuyen uniformemente en grandes volúmenes de roca. Los depósitos de pórfido de Cu se centran en intrusiones de pórfido que van desde existencias verticales, stocks (Figura 2.30), circulares alargadas en planta, a través de matrices de diques a cuerpos pequeños e irregulares.

Los depósitos de pórfido Cu ± Au ± Mo están centrados en las intrusiones, mientras que las rocas de la pared de carbonato comúnmente albergan skarns proximales de Cu-Au, skarns distales menos comunes de Zn-Pb y/o Au, y, más allá del frente del skarn, Cu de reemplazo de carbonato y/o depósitos de Zn-Pb-Ag ± Au, y/o depósitos de Au alojados en sedimentos (diseminados distalmente).

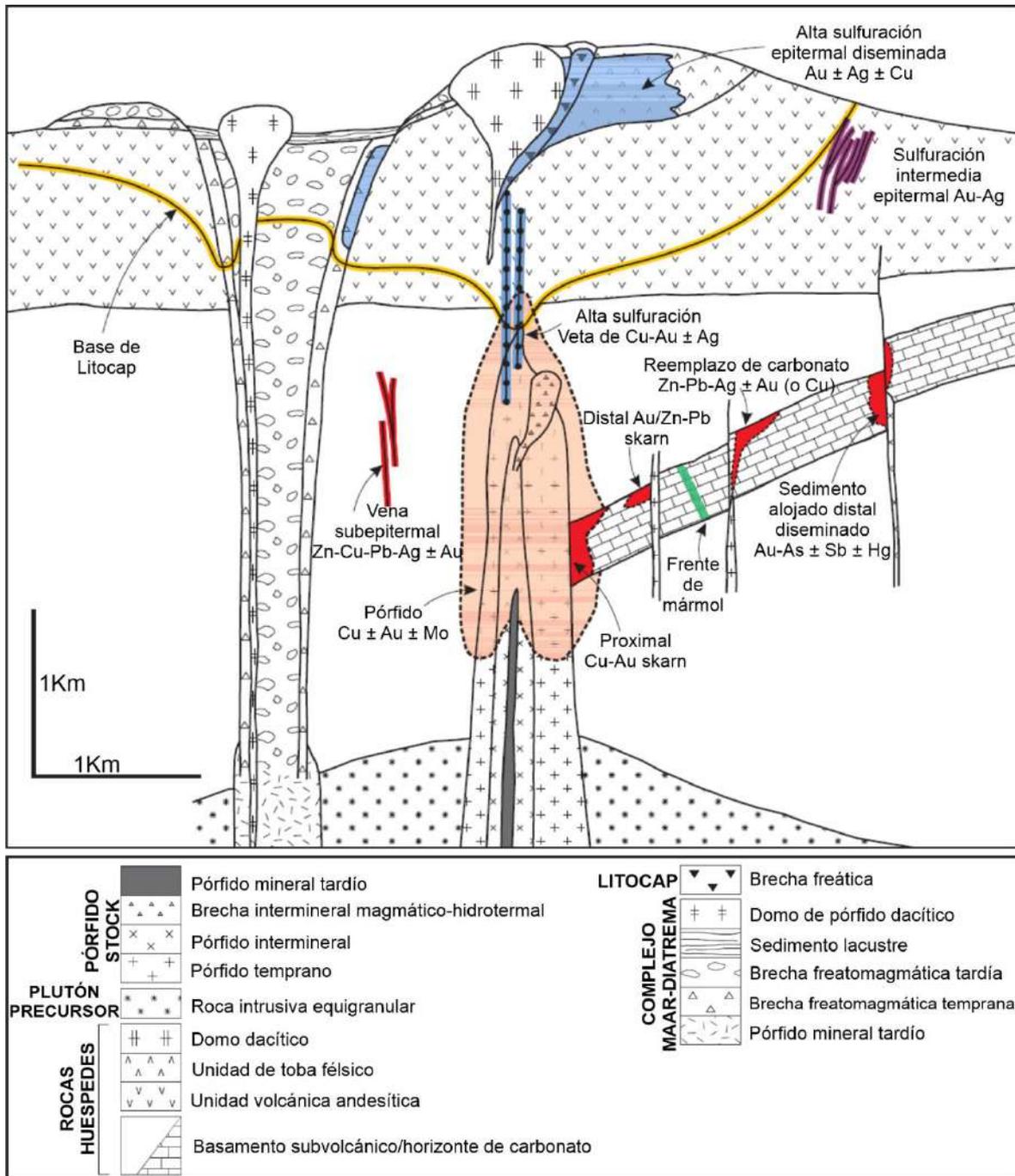


Figura 2.30. Anatomía de un sistema telescópico de pórfido Cu que muestra interrelaciones espaciales de un depósito de pórfido Cu ± Au ± Mo, ubicado en el centro en un stock de pórfido multifásico y sus rocas huésped inmediatas; skarn periférico proximal y distal, reemplazo de carbonato (chimenea-manto) y depósitos alojados en sedimentos (distal-diseminado) en una unidad de carbonato y vetas subepitermales en rocas no carbonatadas; y depósitos epitermales suprayacentes de alta sulfuración en el lithocap, e intermedia sulfuración junto al entorno del lithocaps (Sillitoe, 2010).

2.2.8.1. Estructuras asociadas a depósitos tipo pórfido

Según Corbett (2018), los stockworks de pórfido y las venas sheeted de cuarzo-sulfuro que albergan y transportan localmente la mayor parte de la mineralización de Cu-Au-Mo representan las principales estructuras asociadas con los depósitos de pórfido de Cu-Au, comúnmente desarrollados dentro de los stocks. Los ajustes dilatantes que localizan las intrusiones de pórfido influyen en las orientaciones de las venas, estas orientaciones son usadas para estimar el esfuerzo que prevalece en el emplazamiento del pórfido. Como se observa en la Figura 2.31, los regímenes de esfuerzos que controlan las orientaciones de las venas de pórfidos son:

- Compresión vertical, donde el esfuerzo principal es vertical, la cual promueve venas radiales y concéntricas, dentro de la intrusión, subyacente y suprayacente de la roca pared; las venas concéntricas y radiales cuando se intersecan forman un stockwork.
- Compresión ortogonal puede promover la formación de venas paralelas a la dirección del esfuerzo principal.
- Extensión ortogonal proporciona el desarrollo de venas de cuarzo sheeted perpendiculares al esfuerzo principal, o venas de stockwork formadas por la explotación de diaclasas conjugadas preexistentes.
- La convergencia oblicua (transtensión), proporciona que las estructuras pull-apart localizan la intrusión del pórfido, donde las venas sheeted se desarrollan paralelas a las fallas ramificadas.

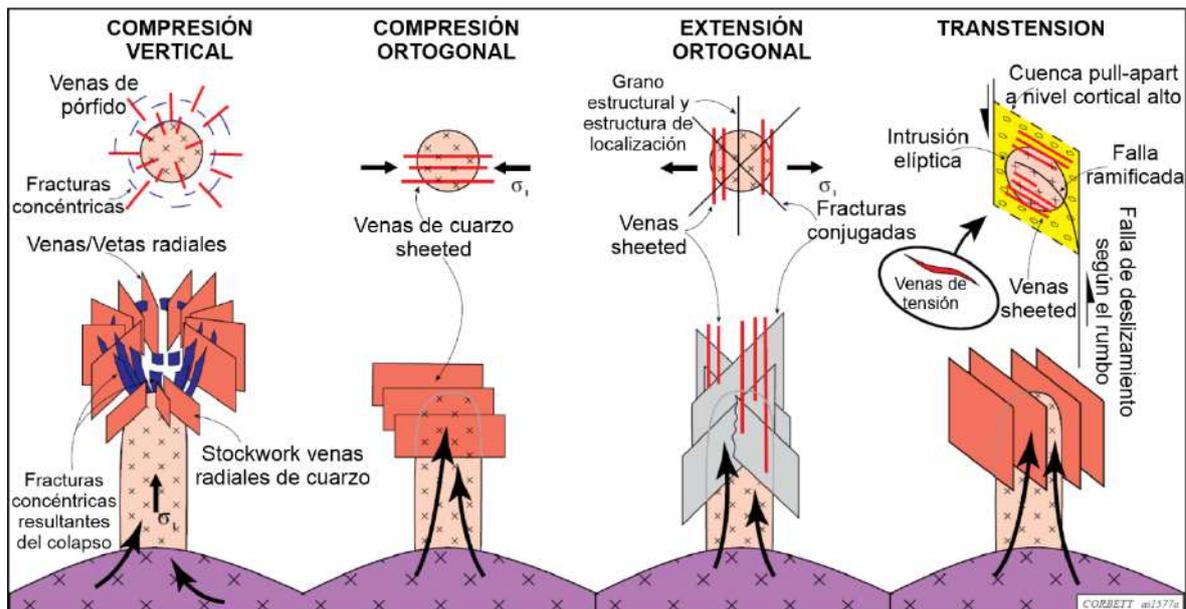


Figura 2.31. Diferentes configuraciones de venas de cuarzo formadas en diferentes configuraciones estructurales. Las venas sheeted en el entorno transtensional pueden elevarse por encima del entorno del pórfido para formar depósitos de pórfido wallrock (Corbett, 2018).

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Esfuerzo. Es la fuerza por unidad de área, que actúa sobre la superficie en un sólido. Se expresa como libras o toneladas por pulgada cuadrada, o dinas o kilogramos por centímetro cuadrado. Extensión, también crea la presión externa y la fuerza interna. Matemáticamente, el esfuerzo tiene componentes normales y componentes de corte, con referencia a tres ejes perpendiculares entre sí. Se usa comúnmente para el esfuerzo diferencial (Saklani, 2008).

Deformación. El cambio de la forma, posición y/o orientación como resultado de fuerzas externas. La deformación se encuentra al comparar los estados y posiciones no deformados y deformados (Fossen, 2010).

Pliegue. Deformación de las rocas estratificadas debido a los esfuerzos de compresión, a las propiedades plásticas de éstas y a las condiciones de elevada presión, la cual toman formas onduladas. Los plegamientos pueden clasificarse en estructuras arqueadas o convexas y cóncavas o en cubetas (Dávila, 2011).

Fractura. Término general que incluye fallas y diaclasas. Las fracturas son consecuencia del comportamiento frágil de las rocas respecto a los esfuerzos deformativos anisótropos (Oyarzún, 2009).

Diaclasa. Fractura extensional, a menudo lateralmente extensa (hasta cientos de metros) con desplazamiento muy pequeño (microscópico) (Fossen, 2010).

Fisura. Fractura extensional llena de líquido (Fossen, 2010).

Vena. Fractura extensional llena de minerales (Fossen, 2010).

Falla. Es una fractura a lo largo de la cual las rocas están relativamente desplazadas unas de otras (Saklani, 2008).

Transpresión. Un régimen tectónico que combina el movimiento transcurrere deslizamiento según el rumbo con compresión oblicua. Las estructuras florales se asocian comúnmente con los regímenes transpresivos (Allaby, 2008).

Transtensión. Un régimen tectónico que combina el movimiento transcurrere deslizamiento según el rumbo con la extensión oblicua. Tal régimen está asociado con la expansión oceánica, crestas y fallas transformantes (Allaby, 2008).

Yacimiento de Pórfido. Esta definición se centra en la textura porfirítica de intrusiones predominantemente calco-alcalinas, que albergan la mineralización de $Cu\pm Au\pm Mo$ asociada con sulfuros (pirita-calcopirita-bornita) diseminados, brechas y principalmente dentro de stockwork y venas de sulfuro de cuarzo (Corbett, 2018).

Stockwork. Cuerpo de roca encajante intensamente fracturado y relleno de venas mineralizadas que se entrecruzan y que puede tratarse de un yacimiento mineral de rendimiento económico (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Geográfica.

El área de investigación se encuentra delimitado por cuatro vértices con las coordenadas en el sistema Unidad Técnica de Medida (UTM) Datum WGS-84. Las coordenadas de los vértices son: E758765, N9209825; E758765, N9213140; E764735, N9213140; y E764735, N9209825 respectivamente (ver Plano 01, de Ubicación).

3.1.2. Política

El área de estudio se sitúa en el distrito de Chetilla. Provincia, Departamento y Región de Cajamarca.

3.1.3. Accesibilidad

El acceso para llegar al área de investigación en primera instancia es por la carretera de Cajamarca – laguna Chamis; luego se toma la carretera Laguna Chamis – Cerro Colpayoc (centro de interés del área de investigación).

Tabla 3.1. Acceso al área de investigación.

Tramo	Distancia (Km)	Vía	Tiempo
Cajamarca (Av. Vía de evitamiento norte) – Laguna Chamis.	10	Terrestre	35 min
Laguna Chamis – Cerro Colpayoc.	12	Terrestre	45 min

3.1.4. Geomorfología

El área de investigación geomorfológicamente se clasificó según su pendiente (ver Plano 05, Geomorfológico). Además, presenta una altitud mínima de 2700 m s.n.m. y una altitud máxima de 3400 m s.n.m.

Tabla 3.2. Clasificación de geomorfología.

Geoforma	Pendiente
Planicie	0° - 8°
Ladera	8° - 20°
Lomada	20° - 50°
Escarpe	> 50°

Fuente: Tomado de Rodríguez 2014.

3.1.5. Geología Local

3.1.5.1. Mesozoico

Grupo Crisnejas

- **Formación Chúlec**

Esta formación está representada por calizas arenosas, lutitas y margas, de color crema a gris amarillento. Los estratos afloran al Noreste en los extremos del área de investigación, el espesor de los estratos varía entre 20 – 50cm.

- **Formación Pariatambo**

Esta formación está representada por calizas, lutitas uniformemente estratificadas, que suprayacen concordantemente a la Formación Chúlec. Los estratos afloran al Noreste y al Suroeste en los extremos del área de investigación. Las calizas y lutitas observadas son oscuras, bituminosas y bien fosilíferas, debido a la presencia de ammonites (*Oxitropidoceras carbonarium*).

Grupo Pullucana

- **Formación Yumagual**

Esta formación está formada por estratos delgados a medianos de calizas hacia el piso, margas fosilíferas en la parte media, y en la parte superior estratos mayores a 50cm de espesor de rocas calizas masivas (mudstone a rudstone) de colores gris clara a parduzca con escasos niveles de lutita.



Foto 3.1. Estratos gruesos mayor a 50cm de calizas grises con textura mudstone (bioturbaciones <10%) de la Fm. Yumagual, situado en el flanco NE del sinclinal de Lullapuquio.

Grupo Quilquiñán, Mujarrún

Formado por calizas nodulares con intercalaciones de margas y lutitas, en algunos estratos se ve la presencia de lutitas arenosas. En el área de investigación el grupo Quilquiñán se encuentra mayormente cubiertas por suelo o terrenos de cultivo.



Foto 3.2. Estratos delgados de calizas claras nodulares intercaladas con margas y margas pardo-amarillentas. Además, abundante presencia de fósiles del tipo Exogyra.

Formación Cajamarca

Formado por calizas macizas de color gris claro a blanquecino, los estratos de esta formación poseen un espesor mayor a 60cm, cuyos afloramientos exhiben una meteorización kárstica con presencia de lenares. En el área de investigación esta litología es la que más aflora, y son precisamente que estas rocas son las que hospedan en su totalidad al intrusivo diorítico hacia el SE del sinclinal Llullapuquio.



Foto 3.3. Estratos mayores a 60cm de calizas macizas de color blanquecino en la Fm. Cajamarca, fracturadas intensamente, con presencia de lenares producto de la meteorización.

3.1.5.2. Cenozoico

Grupo Calipuy

- **Formación Porculla**

Suprayacen a los sedimentos Cretácicos. En el área de investigación aflora una secuencia de flujo de lava andesítica sub-horizontal, dispuesta en una estructura columnar. Los afloramientos de estas rocas andesíticas presentan un color violáceo y gris oscuro producto de la alteración. La alteración es del tipo propilitico en la parte exterior de la estructura columnar, la cual tiene contacto con el intrusivo diorítico.

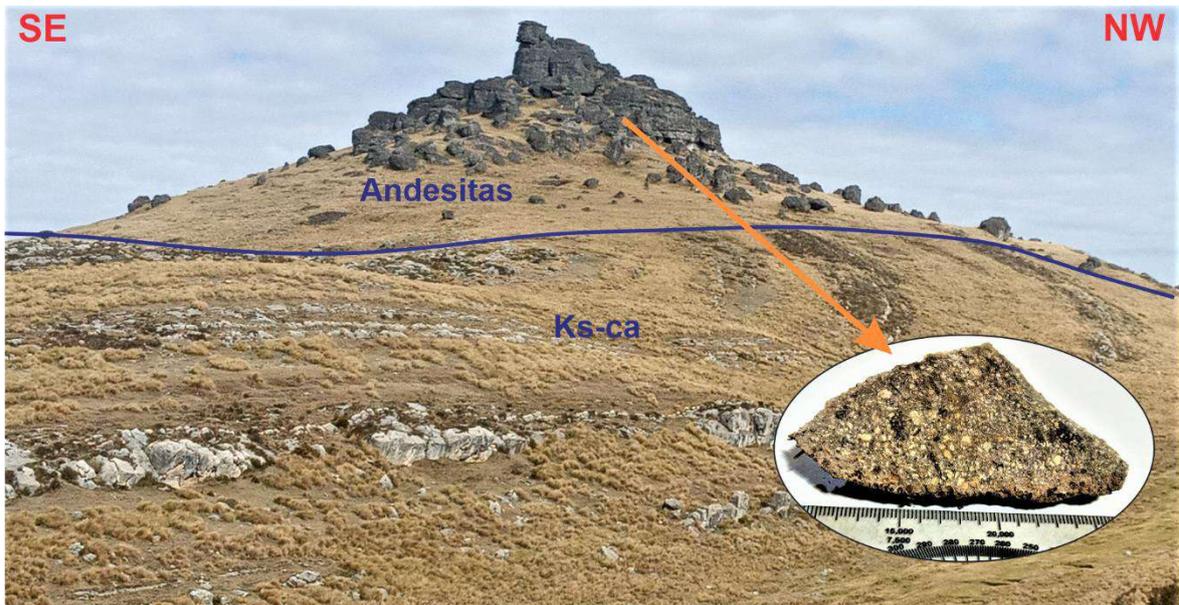


Foto 3.4. Rocas andesíticas de color violáceo con textura porfirítica, dispuestas en una estructura columnar en el Cerro Soldado Rumi. Además, se observa el contacto con calizas de la Fm. Cajamarca.

3.1.5.3. Depósitos cuaternarios

Producto de la fuerte erosión en las rocas Cretácicas y volcánicas, se tiene depósitos Cuaternarios recientes de tipo aluvial-fluvial, formado por clastos de tamaño medio de calizas, limolitas, andesitas y fragmentos de intrusivos porfiríticos variables (diorita-granodiorita), todos ellos dentro de una matriz de limos, arcillas y en menor cantidad de arena fina. La ubicación de estos depósitos se restringe a desembocadura de quebradas, terrazas y áreas planas.

3.1.5.4. Magmatismo

Se ha identificado los dos pulsos magmáticos donde el primero es de tipo granodiorítica que fue Pre-mineral, no tuvo gran aporte de mineralización, pero proporciona un ambiente propicio para que el momento del emplazamiento diorítico enriquezca el yacimiento siendo este el Intra-Mineral (Turner, 2012).

El primer Stock granodiorítico, está en la zona distal de la mayor mineralización, tiene una textura relativamente fresca con alteración propilítica donde se puede ver claramente sus minerales primarios. El segundo stock diorítico donde se ubica las leyes más altas de Au y Cu, aflora al sur del eje del sinclinal de Llullapuquio y en el flanco SW del sinclinal en la parte baja del Cerro Colpayoc. La edad de emplazamiento de estas intrusiones magmáticas varía desde Eoceno superior al

Mioceno medio. Y en algunos sectores de la Formación Cajamarca de los flacos del sinclinal de Lullapuquio se encuentran brechas hidrotermales silicificadas con oxidaciones.

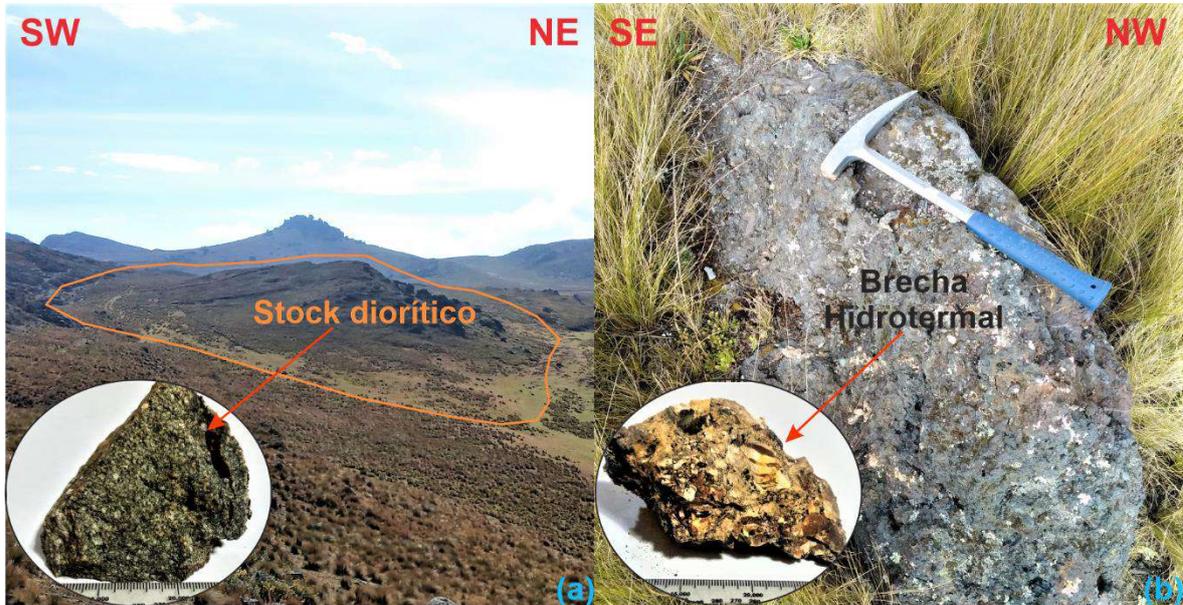


Foto 3.5. (a) Intrusivo diorítico emplazado en la Fm. Cajamarca al sureste del eje del sinclinal de Lullapuquio. (b) Afloramiento de Brecha Hidrotermal en el flanco SW del sinclinal de Lullapuquio, con textura de clasto soportada silicificada y con presencia de óxidos.

Además, se pudo identificar una alteración tipo Skarn en las rocas calizas de la Formación Cajamarca (Foto 3.6), las cuales presentan contenido de sílice debido al intercambio iónico con el intrusivo diorítico, y minerales como granates y piroxenos.

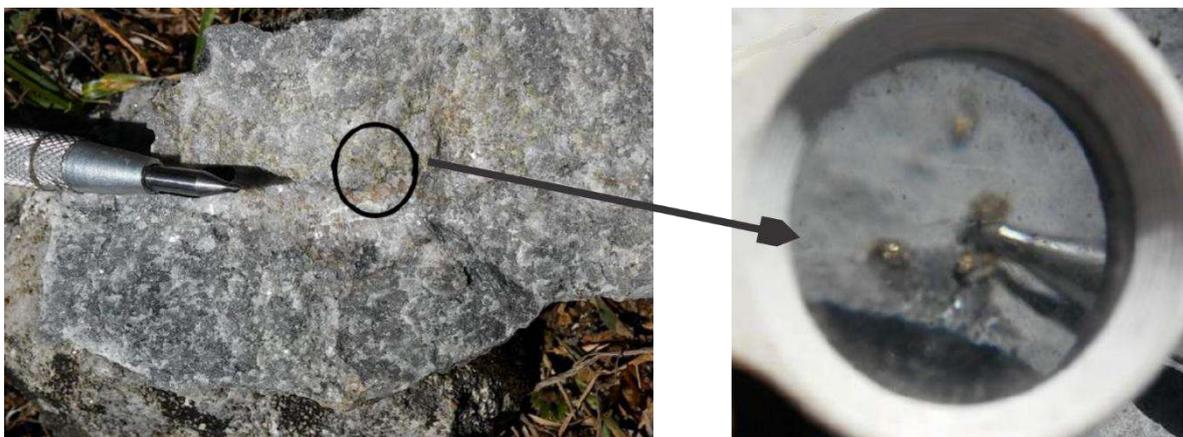


Foto 3.6. En zonas de Skarn se observa que las rocas calizas de la Fm. Cajamarca contienen pirita, y presentan un color gris verdoso por presencia de cloritas y/o piroxenos.

3.2. PROCEDIMIENTOS

3.2.1. Etapa preliminar

La presente tesis inicia con la recopilación de antecedentes teóricos, y la selección de bibliografía especializada para proceder a la investigación del proyecto. También se desarrolló un análisis de imágenes satelitales del área de investigación, dándole énfasis en la interpretación de estructuras geológicas, primordialmente en fallas de deslizamiento según el rumbo.

3.2.2. Etapa de campo

Se procedió a reconocer el área del sinclinal de Llullapuquio, para identificar y cartografiar la litología y primordialmente las estructuras continuas y discontinuas. En el aspecto litológico se identificó los afloramientos rocosos y el tipo de roca (composición, textura, mineralización y alteración) que presentan. Y en las estructuras se interpretó sus cinemáticas; mediciones de rumbo, buzamiento, rake; y toma de coordenadas con el GPS en el sistema UTM. Datum WGS-84.

3.2.3. Etapa de gabinete

En el procesamiento de los datos obtenidos de campo se analizaron con los softwares Dips 7.0, FaultKin y Stereonet v.11 para la interpretación estereográfica de las estructuras geológicas. Luego se usó el software ArcGis 10.5 para la elaboración de planos y perfiles. Posteriormente se elaboró un modelo geológico-estructural 3D en el software Leapfrog Geo 6.0. Finalmente se hizo la discusión de resultados obtenidos y la elaboración final del documento de tesis.

3.2.4. Metodología

En la metodología utilizada se detalló el tipo de investigación, según el nivel, el diseño, su naturaleza, y su finalidad. Todos estos aspectos desarrollados en la presente investigación se describen en la siguiente tabla:

Tabla 3.3. Clasificación y Tipo de investigación.

Clasificación	Tipos de investigación
1. Según el nivel	Explicativa: El nivel de la investigación es explicativa, porque explica la relación que presenta las estructuras geológicas (pliegues, diaclasas, fallas) con los stocks del pórfido Colpayoc.
2. Según el diseño	Transversal en el tiempo: El diseño de la investigación es transeccional en el tiempo debido a que se estudió en un determinado tiempo las estructuras geológicas y su relación en la intrusión del pórfido Colpayoc, en el sinclinal de Llullapuquio.
3. Según su naturaleza	Cualitativa: La naturaleza de la investigación es cualitativa debido a que se basa en sucesos complejos en su medio natural, con información cualitativa como las características de estructuras geológicas (pliegues, diaclasas y fallas).
4. Según la finalidad	Aplicativa: Según la finalidad de la investigación, esta es aplicativa, porque se utilizaron conocimientos teóricos ya existentes para determinar la cinemática de las estructuras, lo que determinó la orientación de esfuerzos tectónicos principales y la intrusión del pórfido Colpayoc.

3.2.4.1. Población de estudio

Los afloramientos rocosos que conforman el sinclinal de Llullapuquio, que comprende $\pm 19 \text{ km}^2$ de área.

3.2.4.2. Muestra

Pliegues, Diaclasas, Fallas.

3.2.4.3. Unidad de análisis

Está constituida por las mediciones de orientaciones y buzamiento de las estructuras.

3.2.5. Identificación de variables

Para la investigación se ha identificado como variables independientes los pliegues, diaclasas, fallas; y como variable dependiente la intrusión del pórfido.

3.2.6. Técnicas

Las técnicas para la recolección de datos son directas en campo a partir de la observación geológica del área, identificación y descripción de estructuras geológicas teniendo en cuenta la medición de azimut y buzamientos con la brújula Geo Bruntos Axis 5012, además este tipo de brújula permite hacer mediciones del rake (pitch, plunge y trend).

Al mismo tiempo se dio la toma de coordenadas con GPS en el sistema UTM. Datum WGS-84, para plotear en los planos el afloramiento de rocas y de estructuras. La toma fotográfica se desarrolló para evidencia del trabajo en campo y una mejor referencia del lugar de investigación. Por último, el análisis e interpretación de las estructuras geológicas se llevó a cabo con los softwares geológicos en el ordenador.

3.2.7 Instrumentos y equipos

En el desarrollo de la presente investigación se utilizaron diversos instrumentos y equipos (Tabla 3.4), que hicieron posible la toma de datos y el análisis e interpretación de estos datos.

Tabla 3.4. Descripción de Instrumentos y equipos.

Instrumentos	Descripción
Planos Satelital y topográfico a escala 1/15000	Para cartografiar en el área de investigación la geología y estructuras.
Libreta de campo	Anotar datos medidos de estructuras, hacer croquis o dibujos observados en campo y anotar algunas observaciones.
Protactor de escalas 1/5000 y 1/2500	Instrumento complementario para plotear datos en los planos a una escala determinada.
Picota de geólogo	Para extraer muestras de mano de rocas.
Lupa de aumento 20x	Observar la textura y mineralogía de las rocas.
Lápiz rayador	Identificar la dureza de algunos minerales.
Ácido clorhídrico de 40%	Detectar rocas con contenido de carbonatos.
Equipos	Descripción
Brújula Geo Brunton Axis 5012	Para medir orientaciones y buzamientos de estructuras y sacar pendientes.
GPS Garmin navegador	Ubicar estructuras geológicas y puntos de control dentro del área de investigación.
Cámara fotográfica digital de 10MP	Tomar fotografías para tener evidencia del trabajo en campo e ilustrar las mejores exposiciones de las estructuras.
Laptop Asus Gamer Rog GL752V	Para desarrollar todo el trabajo en gabinete y el informe final de la presente tesis.

3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

3.3.1. Estructuras continuas

3.3.1.1. Pliegues

El área de investigación abarca específicamente al sinclinal Llullapuquio, este plegamiento presenta flancos al SW y NE. Se estima que esta deformación de las rocas sedimentarias del Cretácico se produjo en la fase tectónica Inca, debido a que el intrusivo posttectónico Colpayoc presenta rocas del mioceno (fase tectónica Quechua). Además, la Formación Celendín, secuencia estratigráfica Cretácica más joven ha desaparecido en este pliegue producto de la fuerte erosión.

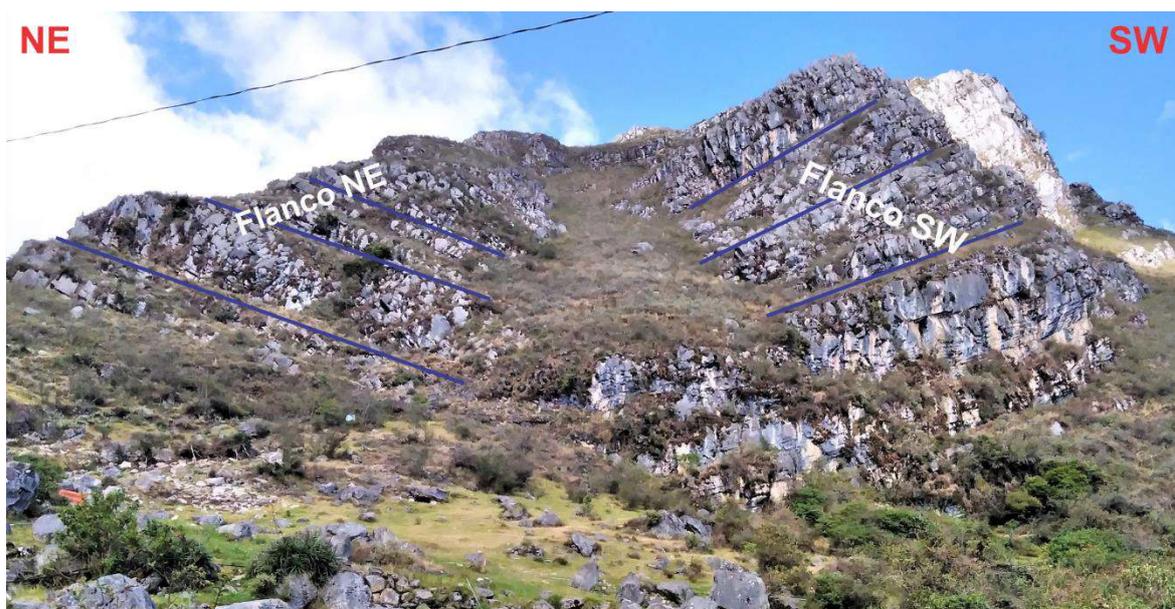


Foto 3.7. Se observa los flancos del sinclinal LLullapuquio, en rocas de la Fm. Cajamarca. Los estratos del flanco NE presenta $N135^{\circ}$ de rumbo y 35° SW de buzamiento, los estratos del flanco SW presentan $N315^{\circ}$ de rumbo y 62° NE de buzamiento.

Longitudinalmente el sinclinal de Llullapuquio presenta una estructura de terminación periclinal. A través de una interpretación de imágenes satelital y por la observación de desplazamiento de bloques en campo, la terminación periclinal se encuentra afectada por fallas transversales al eje denominadas “Fallas perisinclinales”, la cual estiran y alargan el cierre del periclinal. También se observan fallas longitudinales al eje (Figura 3.1.), la cual se produjeron simultáneamente o inmediatamente al plegamiento del sinclinal.

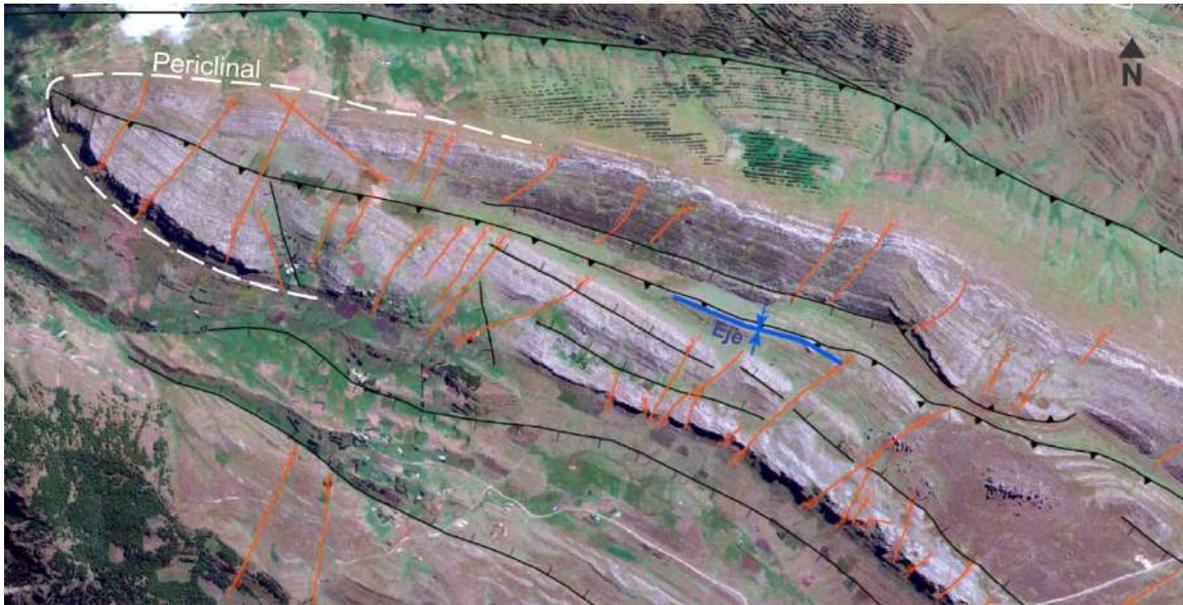


Figura 3.1. Cierre periclineal del sinclinal de Lullapuquio. Según al eje del pliegue se observa fallas transversales (líneas anaranjadas), y fallas longitudinales (líneas negras).

Localmente en las rocas carbonatadas de la Formación Cajamarca del flanco NE del sinclinal Lullapuquio se observa un monoclinial (Foto 3.8.), relacionado a una falla que provocó el cambio de orientación y buzamiento de la estratificación.

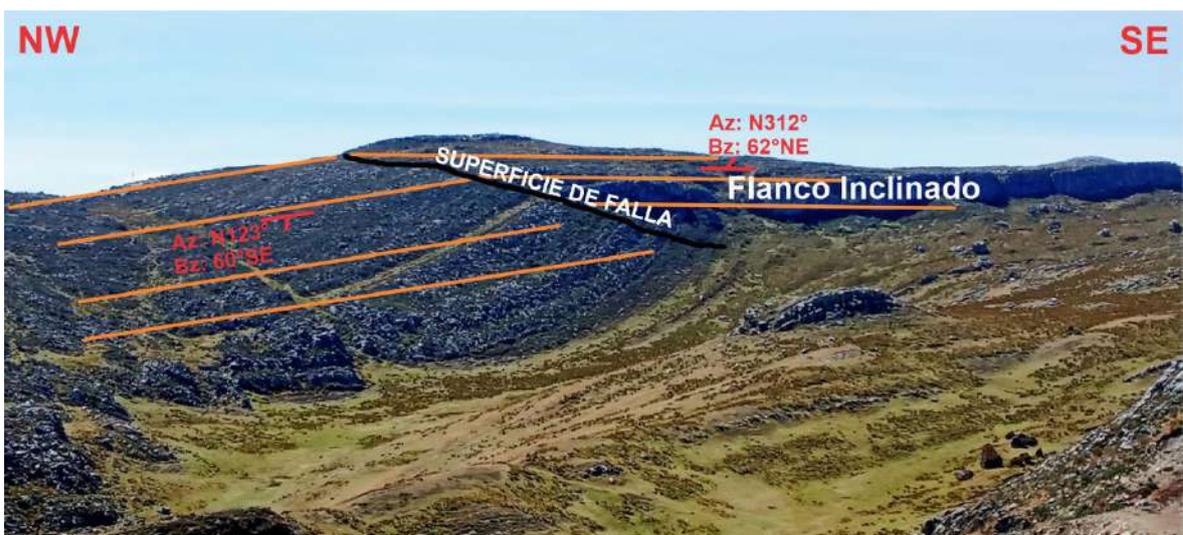


Foto 3.8. Se observa un monoclinial, donde los estratos del flanco inclinado presentan un rumbo de N312° y 62°NE de buzamiento.

3.3.2. Estructuras discontinuas

3.3.2.1. Fracturas de extensión

En el área de investigación se encuentran fracturas de extensión debido a los esfuerzos tectónicos que actuaron sobre rocas rígidas provocando su fracturamiento. Se distinguió 2 sistemas de diaclasas, cada sistema pseudo conjugado está formado por 2 conjuntos de diaclasas, las intersecciones de estos conjuntos por lo general forman una Letra "X" (Foto 3.9, a). Y la distribución de las diaclasas varía según el espesor de los estratos, siendo así que el espacio entre ellas es más grande en la Formación Cajamarca y más pequeñas en el Grupo Quilquiñán, Mujarrún.

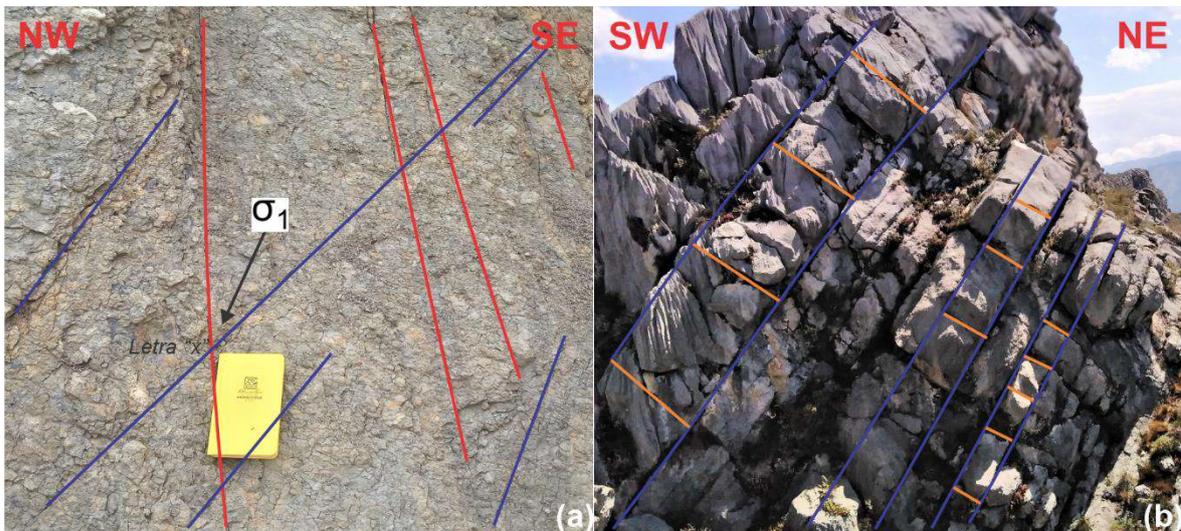


Foto 3.9. (a) Sistema pseudo conjugado formado por 2 familias de diaclasas (rojo: N22° de rumbo y 88°SW de buzamiento, azul: N224° de rumbo y 48°NW de buzamiento) en plano de estrato del Gpo. Quilquiñán. (b) Distribución de diaclasas (líneas anaranjadas) en estratos de la Fm. Cajamarca, nótese que en los estratos de espesor menor la distancia entre diaclasas es más corta que en estratos de espesor mayor.

Algunas diaclasas se encuentran rellenas de minerales denominadas venas. Por lo general en el sinclinal de Lullapuquio el mineral de estas venas son carbonatos (Calcita), próximas al intrusivo la presencia de venas es más intensa con minerales de sílice, y en el intrusivo se tienen venas de cuarzo y sulfuros del tipo stockwork de ocurrencia. Además, el relleno de las venas es del tipo en bloque y en algunos casos se encuentran oxidadas producto de la alteración.

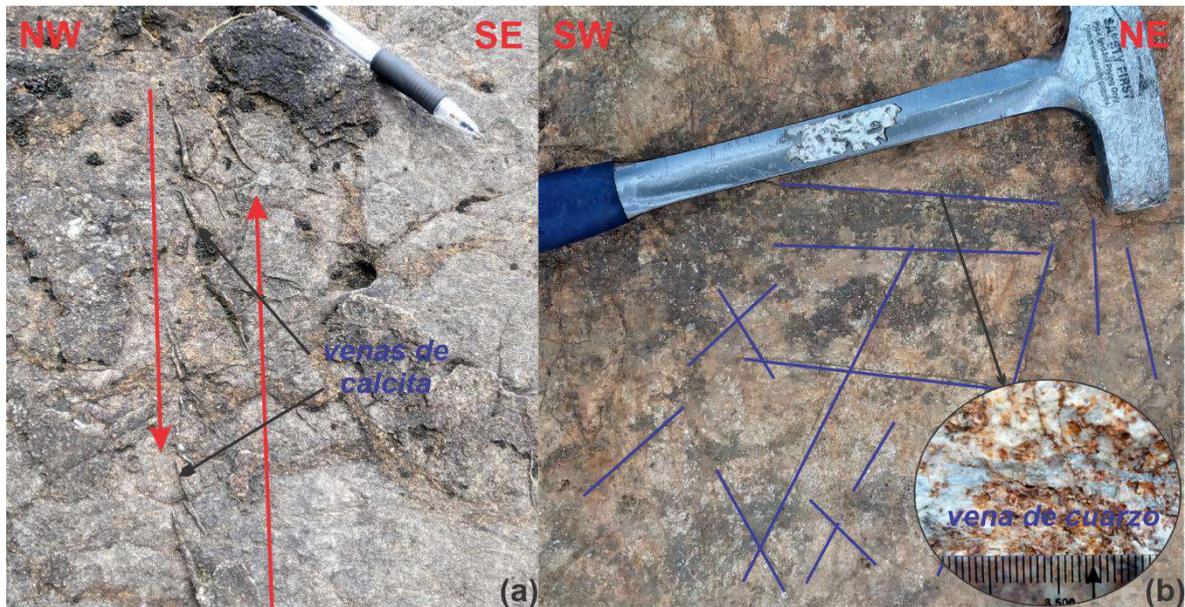


Foto 3.10. (a) Venas de calcita en forma de echelon simple, en la Fm. Yumagual, las flechas rojas señalan la zona de cizalla. (b) venas de cuarzo (líneas azules) en forma de stockwork en el pórfido diorítico.

3.3.2.2. Fracturas de contracción

Al igual que las fracturas por extensión (paralela a σ_1), en el área de investigación también se pudo observar fracturas por contracción (perpendicular a σ_1), estas fracturas se denominan “estilolitos” característico por ser superficies irregulares de disolución en forma de líneas de sutura. En el área de investigación la orientación de los estilolitos permite dar una idea de la dirección de acortamiento y reconocer dos eventos de esfuerzos (σ_1 y σ_1') a la que ha sido sometida.

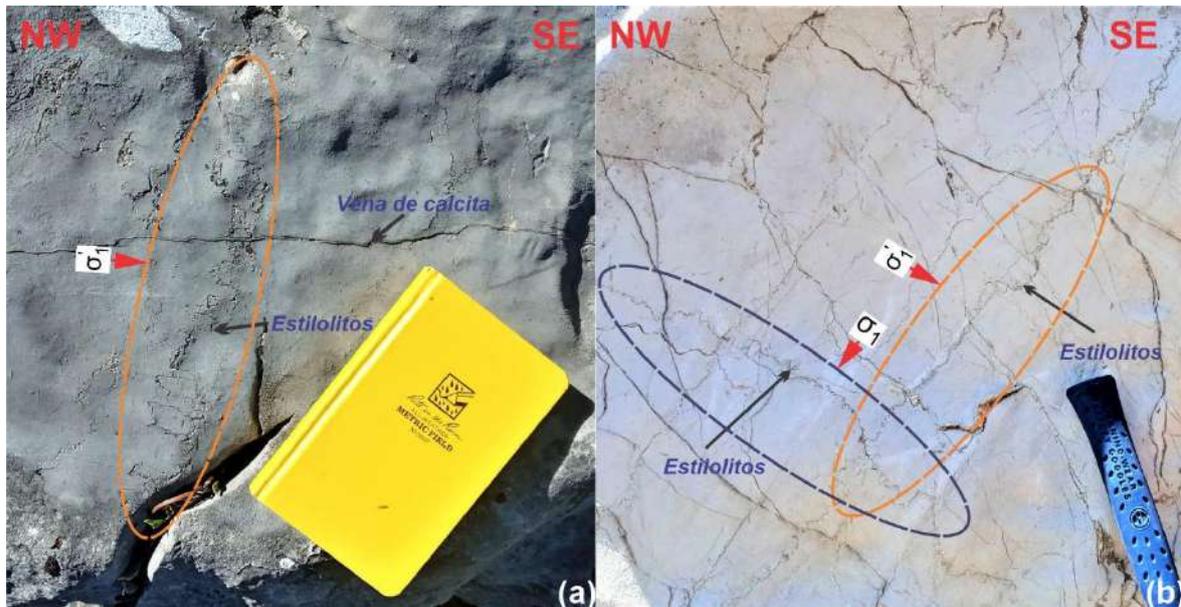


Foto 3.11. Estilolitos producto de los esfuerzos tectónicos que provocaron la disolución en rocas carbonatadas. (a) Estilolito asociado a venas rellena de calcita; la dirección de acortamiento es paralela a las venas, la dirección de alargamiento es perpendicular. (b) Intersección de estilolitos con diferente orientación, la cual indican dos eventos de compresión no contemporáneos (σ_1 y σ_1').

3.3.3.3. Fallas

En el área de investigación predominan fallas de orientación andina (NW) longitudinales al eje del sinclinal de Lullapuquio, se dedujeron fallas normales e inversas por presencia de indicadores cinemáticos determinados en campo (Foto 3.12). Las fallas inversas disminuyen el espesor de las formaciones geológicas, en especial el flanco NE del sinclinal Lullapuquio; también en algunos casos el bloque pared techo de las fallas inversas suelen girar alrededor de un eje que es perpendicular a la superficie de la falla, formando fallas del tipo tijera (Foto 3.13). Por el contrario, las fallas normales expanden los afloramientos rocosos permitiendo el ingreso de intrusiones, el flanco SW del sinclinal Lullapuquio se ve afectado por fallas normales, la cual se consideran que forman parte de una estructura dilatacional de la falla regional Cajamarca con zonas de apertura (posibles pórfidos ocultos) en sus inflexiones.

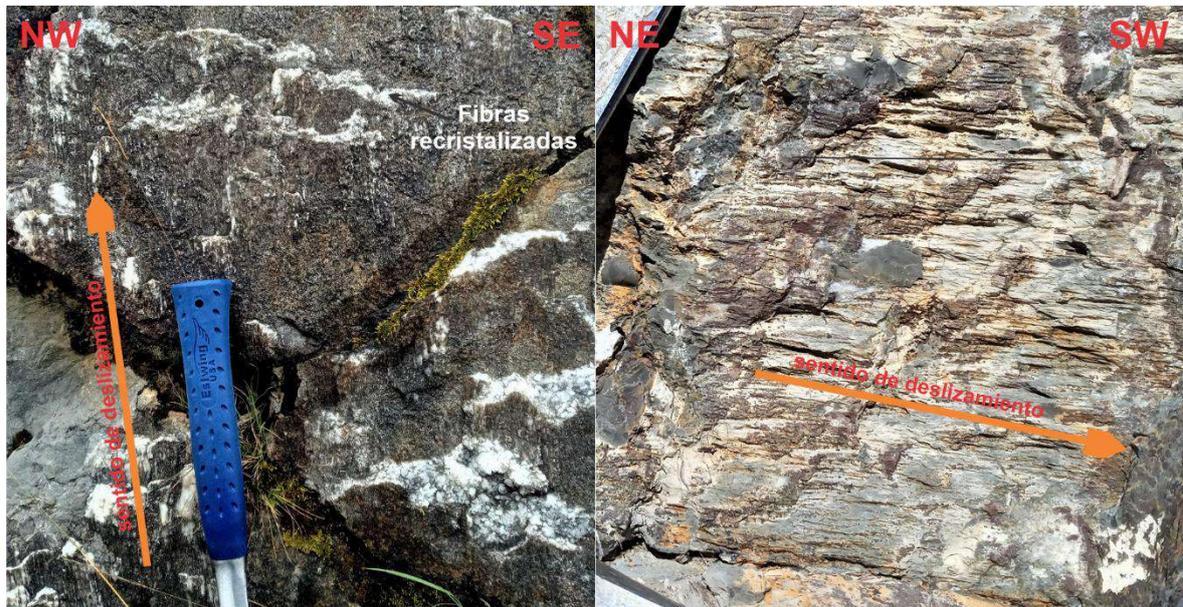


Foto 3.12. Planos de falla con fibras recristalizadas (indicador cinemático). (a) Falla inversa con componente dextral, en la Fm. Yumagual, con rumbo de $N136^\circ$ y 71° SW de buzamiento, rake de 72° SE. (b) Falla sinistral con componente normal, en el Fm. Cajamarca, con rumbo de $N210^\circ$ y 62° de buzamiento, rake de 30° SW.



Foto 3.13. Falla tijera, producto de la intersección una falla inversa y falla de rumbo el bloque pared ha girado cambiando el sentido de orientación y buzamiento de los estratos. Asimismo, esta estructura es la causante del emplazamiento de una brecha.

Junto a las fallas de orientaciones andinas (NW - SE), el área de investigación también predomina fallas de orientaciones transandinas (SW - NE) transversales al eje del sinclinal Lullapuquio, la cual forman un sistema de fallas conjugados (Figura

3.2). Estas fallas transversales son de deslizamiento según el rumbo, la cual controlan el emplazamiento de brechas hidrotermales ubicadas en la Formación Cajamarca. También algunas fallas de rumbo con componentes normal o inversa, localmente suelen formar estructuras del tipo graben y horst (Foto 3.14).

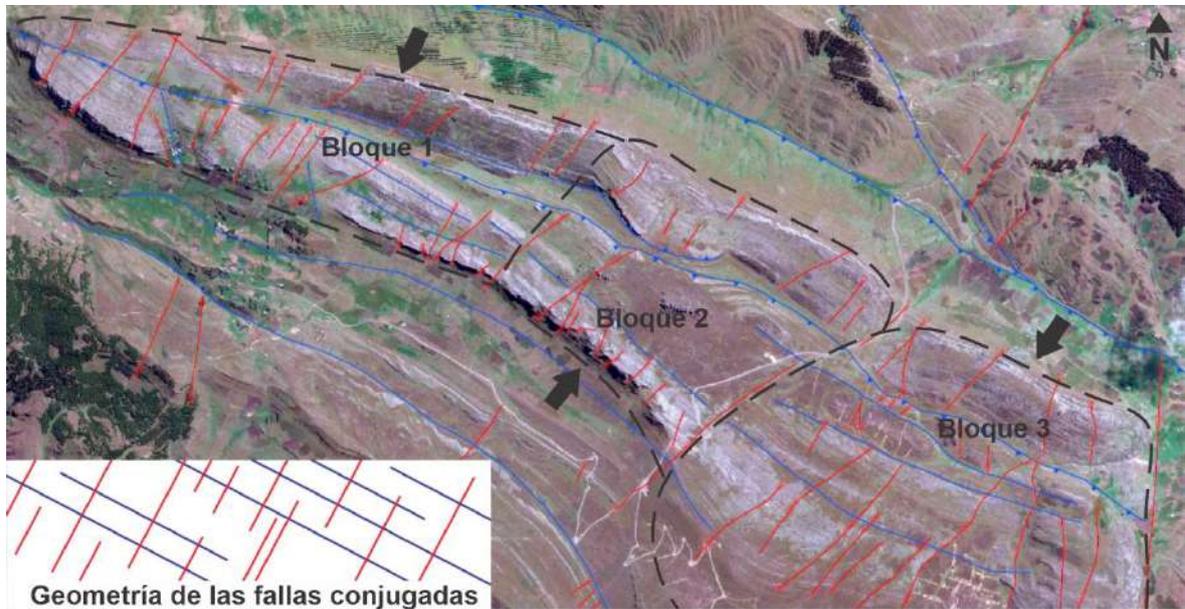


Figura 3.2. Conjunto de fallas conjugadas, con orientaciones hacia el NW - SE y SW - NE, estas fallas además de deformar el sinclinal también controlan el emplazamiento de intrusiones (Porfidos y brechas). También en la figura se puede observar al sinclinal deformado en tres grandes bloques en la Fm. Cajamarca, producto principalmente del movimiento de las fallas de orientación SW - NE.

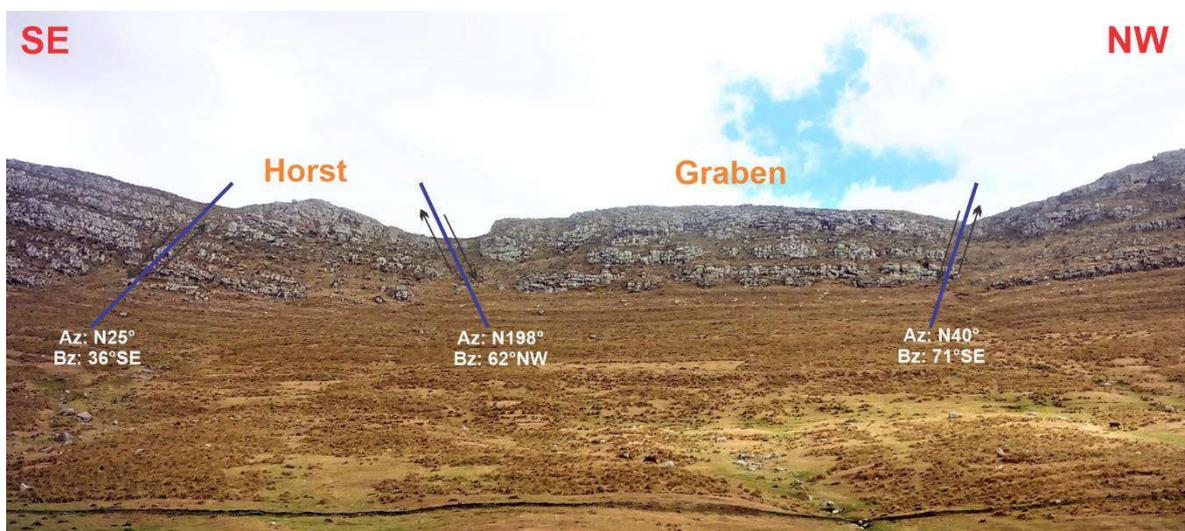


Foto 3.14. Estructuras horst y graben, producto de fallas de deslizamiento según el rumbo con componente normal e inversa, ubicadas en rocas carbonatadas de la Fm. Cajamarca.

3.4. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.4.1. Análisis estereográfico

Los geólogos han diseñado varios métodos para caracterizar la geometría de las estructuras geológicas a partir de datos de campo, en particular cuando el tamaño de las estructuras se extiende por varios cientos de metros más allá de lo que prácticamente se puede medir directamente en el campo. Una de las mejores técnicas para resolver problemas geométricos en geología estructural es la proyección estereográfica, trabaja con líneas y planos sin tener en cuenta sus relaciones espaciales, por tanto, solo se pueden representar valores angulares (Rowland et al., 2007).

3.4.1.1. Análisis estereográfico del plegamiento

Para el análisis estereográfico del sinclinal de Lullapuquio se midió en campo rumbo y buzamiento de las estratificaciones de los flancos, para luego proyectar las medidas en el software Stereonet y obtener los siguientes resultados:

Los polos de los planos de estratificación se generan alrededor del círculo mayor (círculo n), la cual nos indica que la geometría del pliegue es cilíndrica.

Los polos de los planos de estratificación aparecen en dos concentraciones máximas de puntos, indicándonos que el pliegue presenta flancos planares con una charnela angular (Figura 3.3.a).

El círculo mayor tiene una inclinación hacia NW, por ello el plegamiento presenta una vergencia ligera hacia el SE.

La orientación de los esfuerzos compresionales que provocaron el plegamiento del sinclinal de Lullapuquio viene a ser paralelo al círculo mayor, en este caso el esfuerzo compresivo presentaría una orientación de SW-NE como se muestra en la Figura 3.3a.

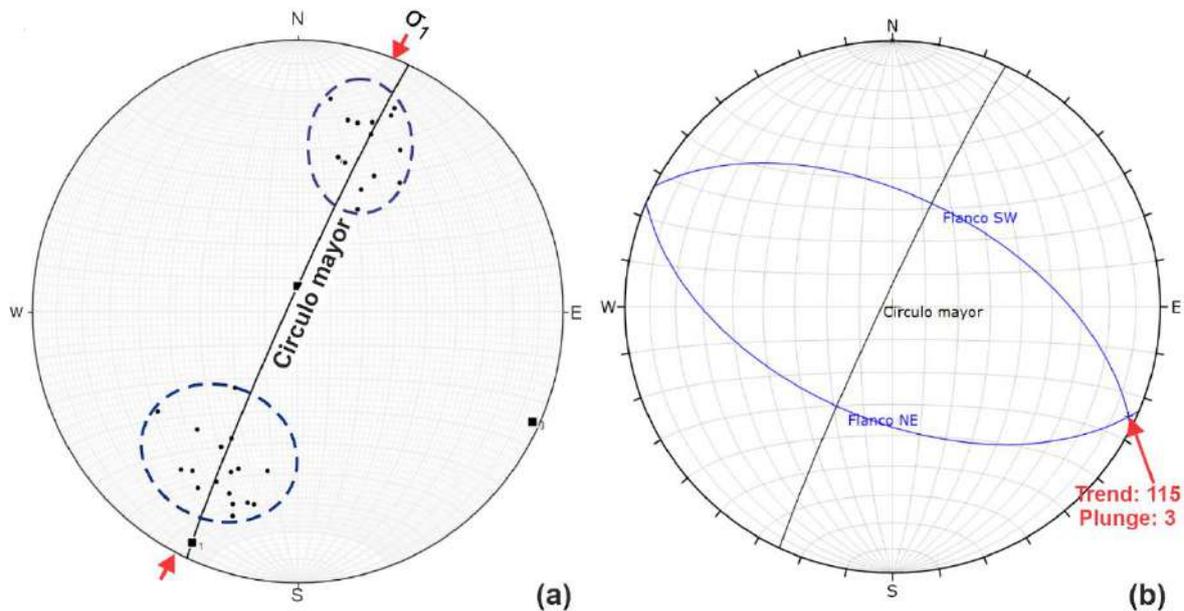


Figura 3.3. (a) Análisis estereográfico típico de un pliegue cilíndrico, círculos azules muestra las concentraciones de polos abarcados en el círculo n , flechas rojas indica la dirección de esfuerzo de compresión paralelo al círculo n . (b) Proyección estereográfica, planos de los flancos (líneas azules), flecha roja indica la orientación de la línea de charnela, además el flanco NE presenta un cabeceo de $3.5^{\circ}E$ y el flanco SW un cabeceo de $2.5^{\circ}S$.

La orientación de la línea de charnela del pliegue del sinclinal de Lullapuquio viene a ser la orientación del polo del círculo n , que viene a ser el punto que corta los planos de los flancos del pliegue (Figura 3.3.b). Y el plano axial del plegamiento viene a ser el plano perpendicular al círculo n y que pasa por el eje de charnela (Figura 3.4.a). Por ello, según el buzamiento de plano axial ($87^{\circ}SW$) y el ángulo de inmersión de la línea de charnela ($3^{\circ}SW$), el sinclinal se clasifica como un pliegue recto horizontal.

Por último, el ángulo interflanco (68°) viene a estar sobre el círculo n delimitado por los planos de los flancos del sinclinal y bisectado por el plano axial (Figura 3.4.b), la cual clasifica al sinclinal como un pliegue apretado.

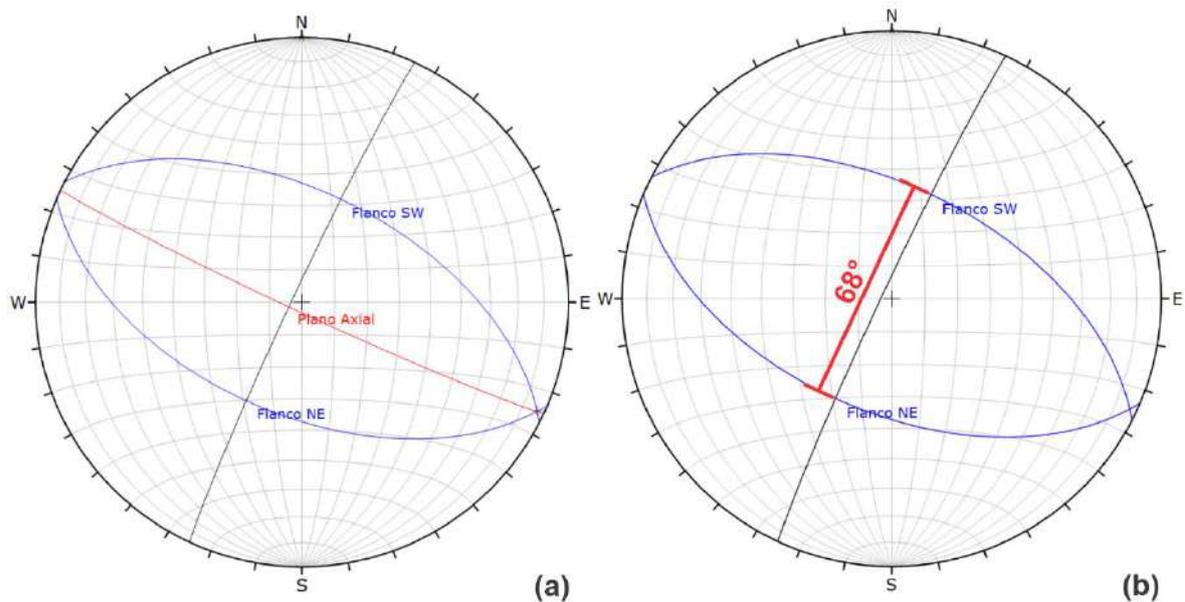


Figura 3.4. Proyecciones estereográficas. (a) Plano axial (línea roja) con un rumbo de N115° y buzamiento de 87°SW, círculo π (línea negra). (b) Ángulo Interflancos (línea roja) de 68°.

3.4.1.2. Análisis estereográfico de diaclasas

Este análisis estereográfico se desarrolló con 206 datos de rumbo y buzamiento de diaclasas medidas en campo, que fueron procesados en el software Dips y obteniendo los siguientes resultados:

Se identificó 4 conjuntos de diaclasas (Figura 3.5.a). Además, El ángulo agudo que se forma por las intersecciones de estas familias de diaclasas nos da una idea de la orientación de los paleoesfuerzos (Figura 3.5.b) responsables de la deformación en el área de investigación.

Los conjuntos de diaclasas tienen una disposición característica respecto a los estratos de los flancos y eje del sinclinal de Lullapuquio. Los conjuntos 1 y 2 son perpendiculares a los estrados y al eje del sinclinal (Figura 3.6.a), y los conjuntos 3 y 4 son paralelos a los estrados y normales al eje del sinclinal (Figura 3.6.b).

Se estima que los conjuntos 1 y 2 de diaclasas son las primeras en formarse por ser producto de orientaciones de esfuerzos (σ_1) compresionales paralelos al esfuerzo compresional que origino el plegamiento y por ser acortadas por los conjuntos 3 y 4 de diaclasas observadas en campo. Por ello los conjuntos 3 y 4 de

diaclasas serían producto de esfuerzos compresionales (σ_1'), este esfuerzo sería posterior con un giro de orientación antihorario respecto a σ_1 .

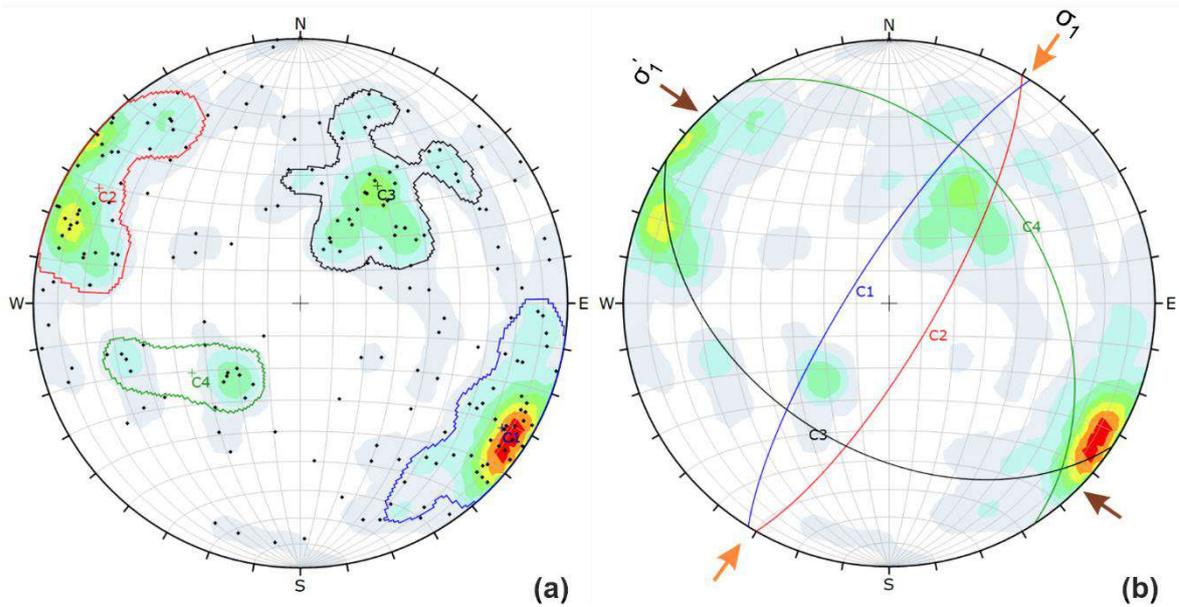


Figura 3.5. (a) Identificación de 4 conjuntos de diaclasas por concentración de proyección de polos. (b) Proyección de planos media de los conjuntos de diaclasas, y orientación de esfuerzos en dirección del ángulo agudo formado por la intersección de las diaclasas.

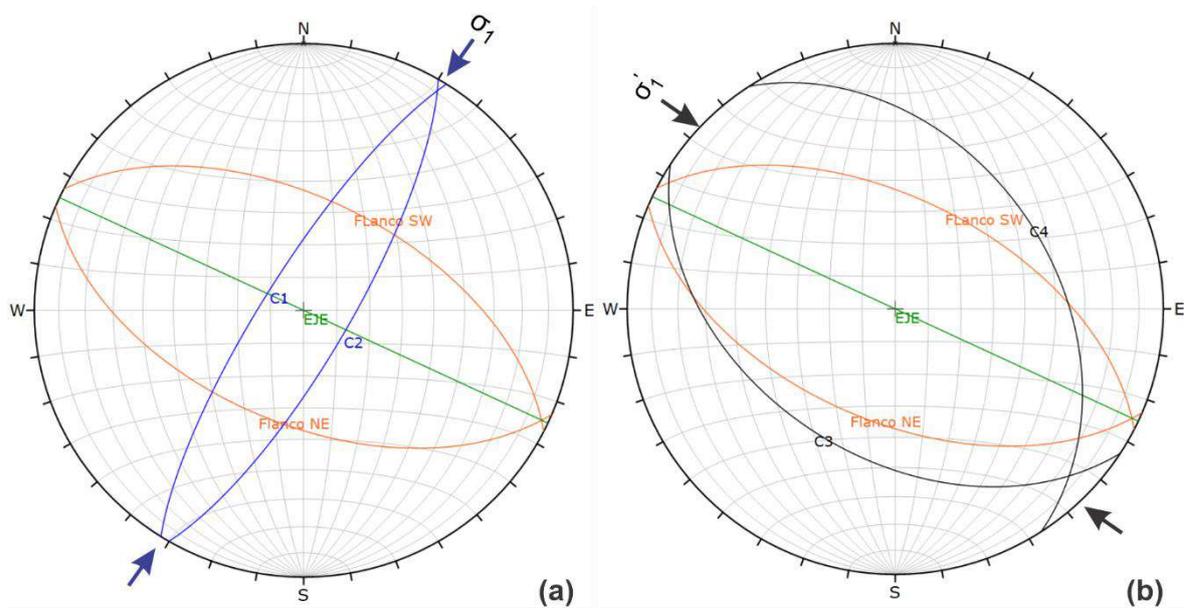


Figura 3.6. Proyecciones estereográficas. (a) Planos de diaclasas perpendiculares a planos de estratos y eje del sinclinal. (b) Planos de diaclasas casi paralelos a planos de estratos y normales a al eje.

3.4.1.3. Análisis estereográfico de fallas

El análisis estereográfico de fallas se desarrolló con datos de plano de falla, indicadores cinemáticos y rake, mencionados en la Foto 3.11. Este análisis se desarrolló en el software FaultKin, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

El análisis estereográfico de las fallas nos indicó el trend y plunge de los paleoesfuerzos, así como las zonas de compresión y tensión de la deformación. Y al igual que en el análisis de diaclasas se encontraron dos eventos de paleoesfuerzos denominados (σ_1 , σ'_1) como se muestra en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9.

En la figura 3.7. se observa el análisis estereográfico de falla inversa, donde el esfuerzo principal compresivo (σ_1), tiene una tendencia similar a la orientación del esfuerzo compresivo que origino el plegamiento del sinclinal Lullapuquio (figura 3.3.), indicándonos que este tipo de fallas se originaron simultáneamente con el desarrollo del plegamiento.

En la figura 3.8. se observa el análisis estereográfico de falla sinistral, donde el esfuerzo principal compresivo tiene un cambio antihorario respecto a σ_1 , la cual se denominó σ'_1 . También este esfuerzo sería responsable de la generación de fallas normales longitudinales al eje del plegamiento, ver análisis estereográfico en la figura 3.9.

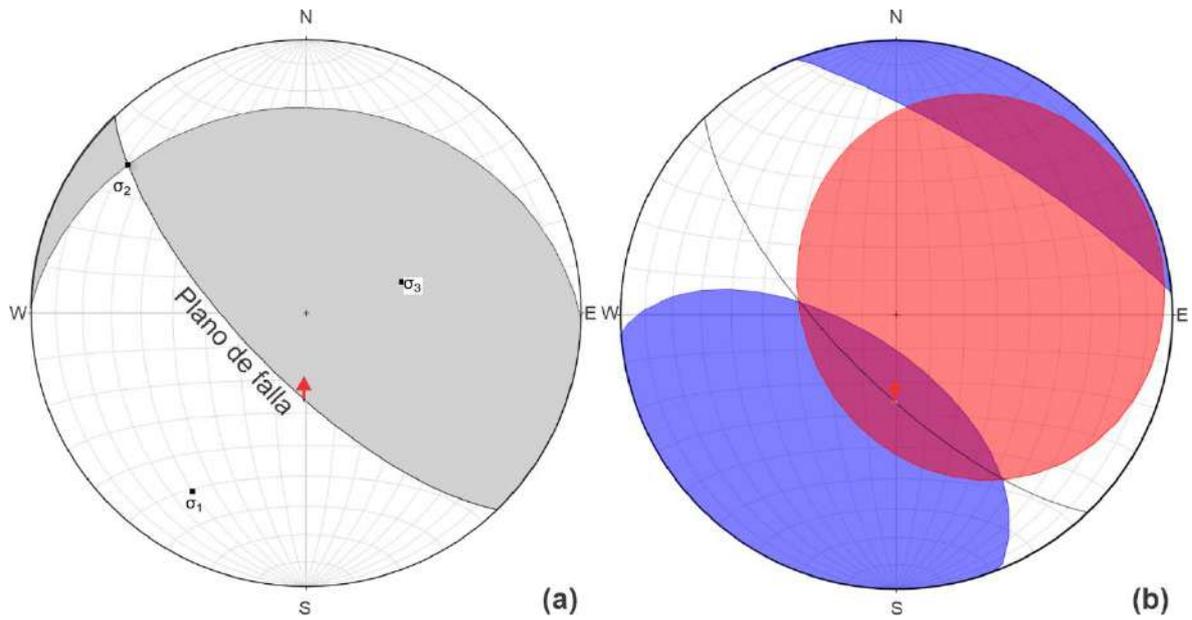


Figura 3.7. Análisis estereográfico de falla inversa. (a) El paleoesfuerzo principal (σ_1) compresivo tiene un trend 212° de y plunge de 24° , la flecha roja indica el sentido de deslizamiento del bloque techo. (b) Zonas azules (compresión) y zonas rojas (tension).

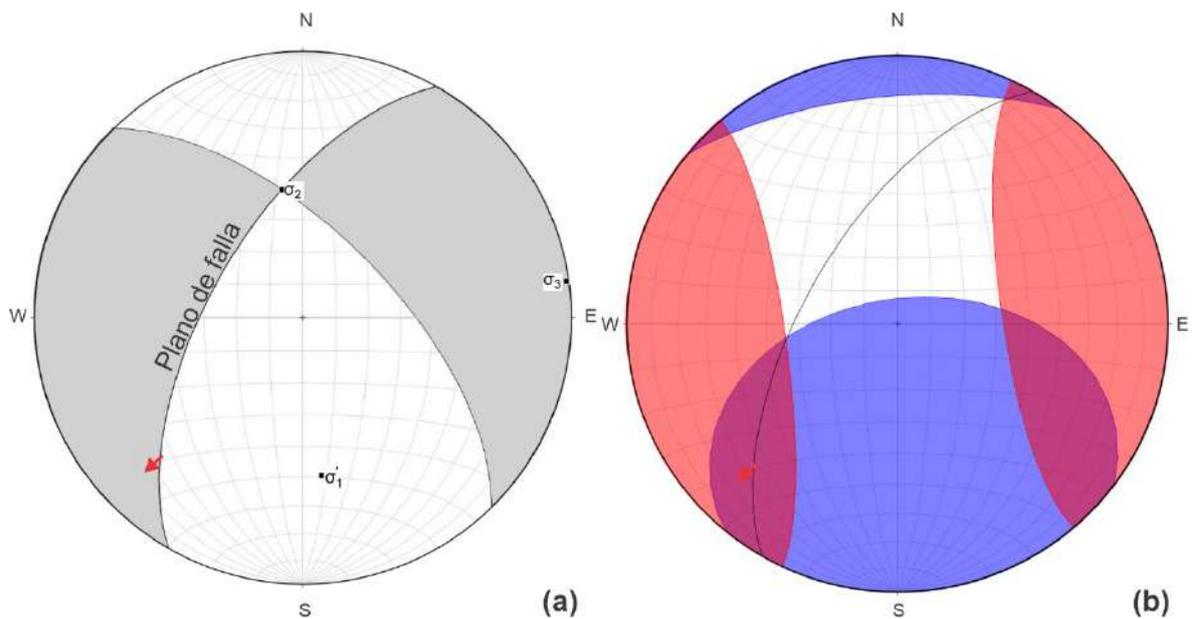


Figura 3.8. Análisis estereográfico de falla sinistral. (a) El paleoesfuerzo principal (σ_1) compresivo tiene un trend 173° de y plunge de 40° , la flecha roja indica el sentido de deslizamiento del bloque techo. (b) Zonas azules (compresión) y zonas rojas (tension).

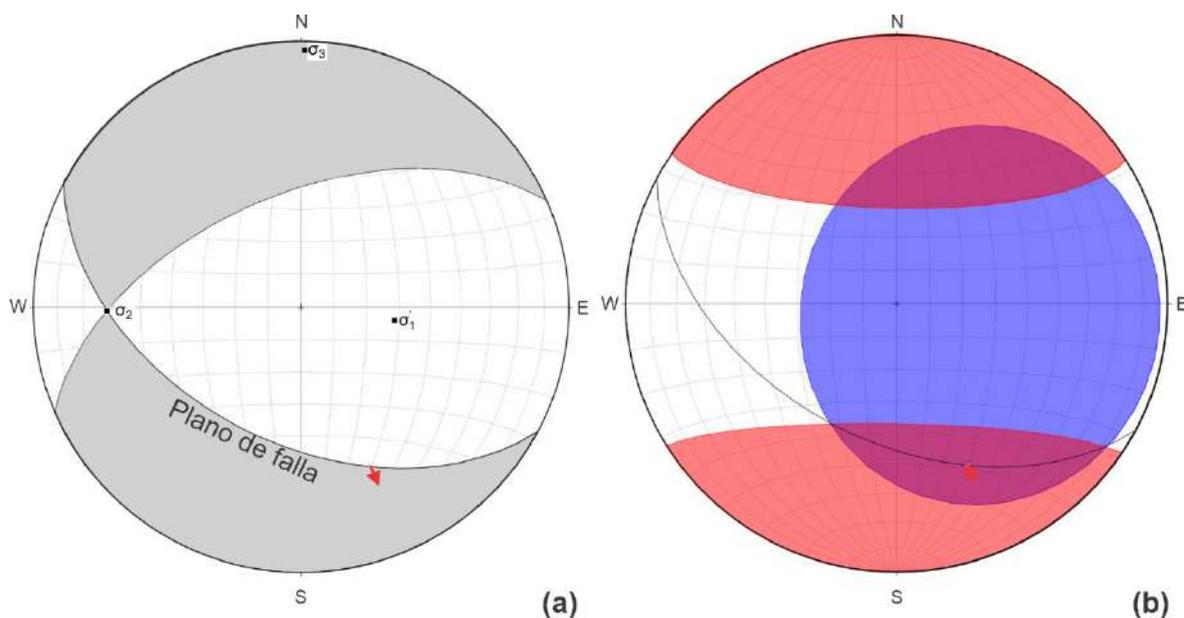


Figura 3.9. Análisis estereográfico de falla normal. (a) El paleoesfuerzo principal (σ_1') compresivo tiene un trend 98° de y plunge de 61° , la flecha roja indica el sentido de deslizamiento del bloque techo. (b) Zonas azules (compresión) y zonas rojas (tensión).

3.4.2. Análisis de Relación entre la deformación e intrusión del pórfido Colpayoc

En la relación entre la deformación y la actividad magmática se considera tres escenarios para establecer la cronología de estos eventos: Pretectónico (El magmatismo es anterior a la deformación), Sintectónico (El magmatismo ocurrió durante la deformación), y Postectónico (El magmatismo es posterior a la deformación). Y las técnicas aplicadas para definir la relación entre la deformación y actividades magmáticas son el uso de las relaciones de corte que guardan los cuerpos magmáticos respecto a las estructuras en las rocas encajonantes, específicamente respecto al plegamiento y el fallamiento regional; y el análisis de las fábricas desarrolladas en las aureolas tectónicas, desarrolladas en los contactos entre las rocas encajonantes y las rocas magmáticas (Paterson et al., 1991).

Tomando en cuenta los criterios mencionados para establecer la relación de intrusivos respecto a la deformación, el intrusivo Colpayoc no presenta foliación tectónica que sugiera que la intrusión sea pretectónica o sintectónica, esto y la incipiente estructura magmática tipo S-C (Figura 3.10) en las rocas encajonantes evidencia que la intrusión ocurrió de manera posterior a la deformación. La

ausencia de deformación tectónica interna en los intrusivos, permite interpretar que el pórfido se emplazó después del fallamiento normal, donde posiblemente es un evento transtensivo local, la cual es un evento posterior al plegamiento del sinclinal Lullapuquio. Del mismo modo los cuerpos tubulares (brechas) se emplazaron después del fallamiento de la zona.

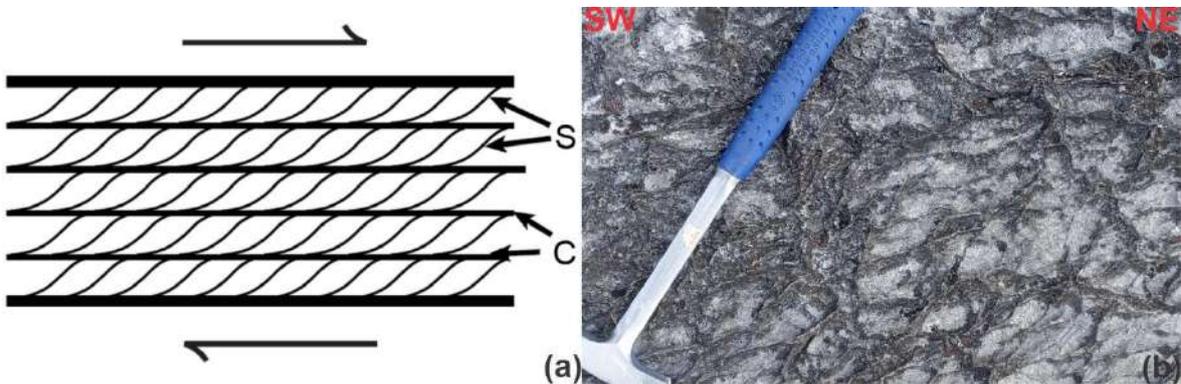


Figura 3.10. (a) Modelo ideal de estructuras S-C. (b) Incipiente estructura S-C en calizas de la Fm. Cajamarca, rocas caja del pórfido Colpayoc.

Además, las intrusiones posttectónicas desarrollan formas circulares por ausencia de un régimen de esfuerzos importante contemporáneo con la intrusión. Esta forma circular se ve reflejado en un marco más amplio del área de investigación, como se observa en la siguiente figura.



Figura 3.11. Imagen satelital que muestra la tendencia hacia una forma circular, producto de las intrusiones posttectónica.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo consiste de tres apartados. El primer apartado contiene el modelo de evolución geológica que integra tanto la evolución de la deformación como la intrusión del pórfido Colpayoc. El segundo apartado contiene el modelamiento geológico, la cual abarca un modelo litológico-estructural tridimensional. Y tercer apartado abarca sobre la contratación de la hipótesis planteada al inicio.

4.1. MODELO DE EVOLUCIÓN DE LA DEFORMACIÓN E INTRUSIÓN DEL PÓRFIDO COLPAYOC

Según Price & Cosgrove (1990), los estilolitos tectónicos paralelas a la orientación de los estratos son atribuidos a un mecanismo de deformación del pliegue de deslizamiento por flexión, y los estilolitos perpendiculares a la orientación de los estratos son atribuidos a un mecanismo de deformación del pliegue por flexión ortogonal. Teniendo en cuenta este criterio y la orientación de los esfuerzos compresivos (σ_1, σ_1'), el plegamiento del sinclinal Lullapuquio generado fue principalmente controlado por estos dos mecanismos de deformación mencionados.

La deformación por flexión ortogonal fue acomodada por el acortamiento de los estratos internos del sinclinal (Formación Cajamarca), donde se han formado diaclasas, venas paralelas al plano axial y estilolitos perpendiculares a la orientación de los estratos. Por otro lado, el deslizamiento por flexión fue acomodado por el fallamiento entre estratos, diaclasas y estilolitos paralelas a la orientación de los estratos.

La deformación en el área de investigación pudo haber ocurrido de manera progresiva, pero las estructuras formadas pueden separarse dentro de diferentes etapas. A continuación, se describe las 7 etapas propuestas en el modelo de deformación e intrusión del pórfido Colpayoc.

Etapas 1

La primera etapa consiste en la sedimentación de las rocas cretácicas y posible desarrollo de estilolitas diagenéticas. Además, en esta etapa previa al plegamiento, se considera la formación de estructuras generadas por deslizamiento gravitacional (slumps), la cual en la superficie del área de investigación han sido erosionadas.

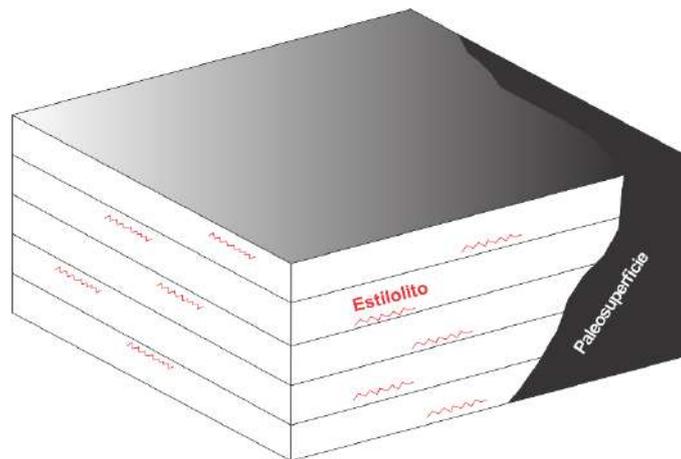


Figura 4.1. Etapa pre-plegamiento, sedimentación de las rocas carbonatadas del Cretácico en una paleosuperficie, y posible desarrollo de estilolitas diagenéticas.

Etapas 2

Etapa inicial del plegamiento. En esta etapa se considera que se formaron las siguientes estructuras:

Fracturas de contracción (estilolitas), cuyas orientaciones son perpendiculares a la estratificación. Fracturas de extensión (conjunto de diaclasas 1 y 2), cuyo ángulo agudo de la intersección de los conjuntos de diaclasas corresponde a un régimen de esfuerzos compresionales de σ_1 .

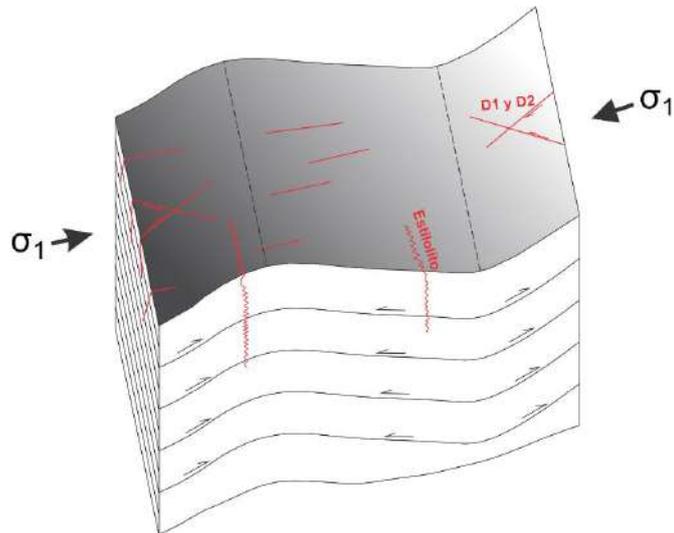


Figura 4.2. Etapa sin-plegamiento I, inicia el plegamiento con el desarrollo de estilolitos tectónicos (E1) y diaclasas correspondientes a los conjuntos 1 y 2 en el área de investigación.

Etapa 3

Consiste en el desarrollo del pliegue, interpretado de acuerdo a sus características geométricas como un pliegue de propagación de falla, el plegamiento se podría haber dado mediante una posible cabalgadura a profundidad. En esta etapa se manifiesta y abundan las fallas inversas paralelas al eje del pliegue. Finalmente se considera que el espesor de las capas es conservado y que la cinemática flexión ortogonal es el mecanismo dominante.

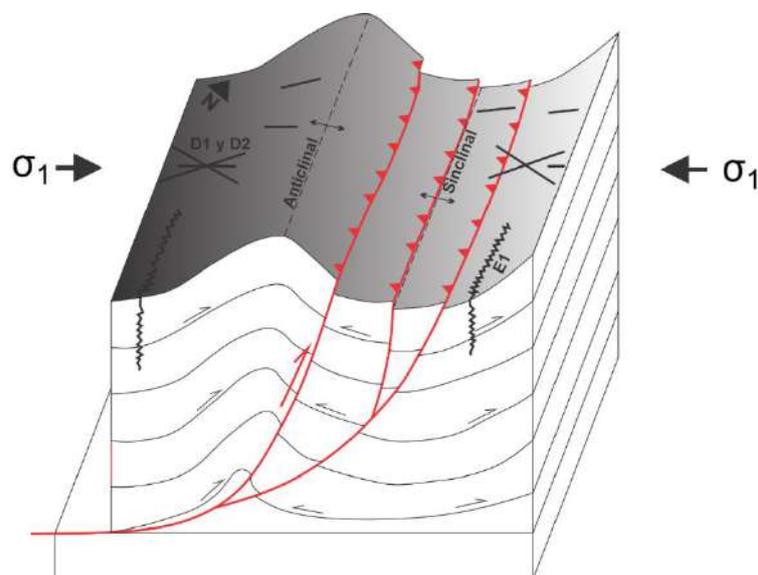


Figura 4.3. Etapa sin-plegamiento II, etapa de cabalgamiento y plegamiento con el desarrollo de fallas inversas paralelas al eje del pliegue.

Etapa 4

Se considera que en esta etapa un plegamiento local ocurrió. Esta etapa generó el replegamiento de las estructuras formadas hasta ese momento, por lo que se le considera como una etapa diferente. Las principales estructuras relacionadas a este evento corresponden a:

Fracturas de contracción (Estilolitas), cuyas orientaciones son paralelas a la estratificación. Fracturas de extensión (conjunto de diaclasas 3 y 4), cuyo ángulo agudo corresponde a un régimen de esfuerzos compresionales a σ_1' . La orientación de su ángulo agudo sugiere que estas fracturas pudieron haberse formado en una etapa avanzada del plegamiento durante el acomodo de pliegues, donde el mecanismo que empezó a manifestarse fue la de deslizamiento por flexión.

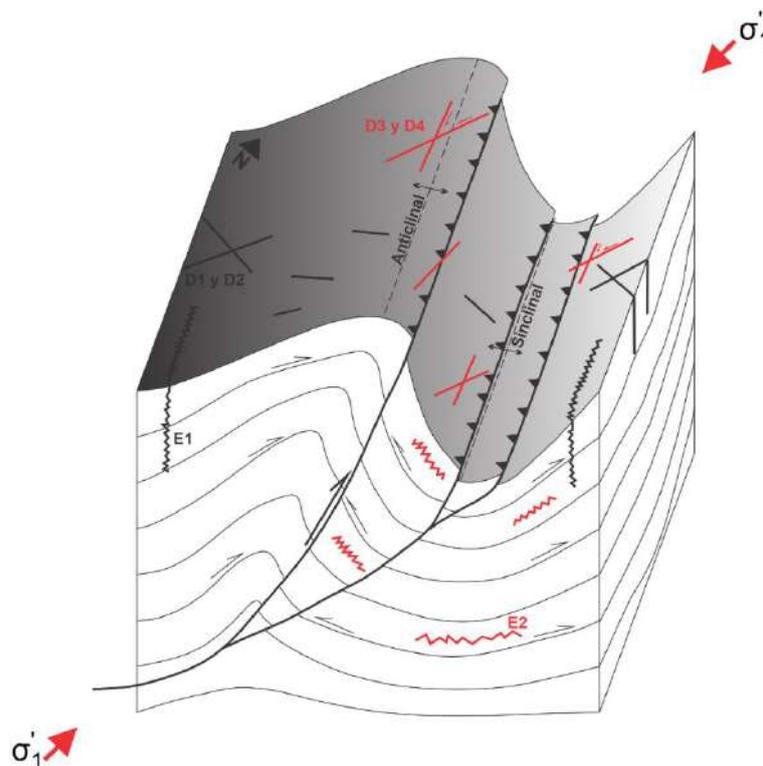


Figura 4.4. Etapa de replegamiento local, producto del cambio de orientación de esfuerzos. Desarrollo de estilolitos tectónicos (E2), y diaclasas correspondientes a los conjuntos 3 y 4 en el área de investigación.

Etapa 5

En esta etapa se considera un evento transtensivo de acuerdo a las fracturas de extensión y al fallamiento normal paralelas al eje del pliegue. Estas fallas normales presentan componentes dextral, y se estima que forman parte de la estructura dilatacional de la falla regional Cajamarca (Lagos et al, 2009). Se considera que durante esta etapa la cinemática que predominó para acomodar la deformación del área de investigación es la de deslizamiento por flexión.

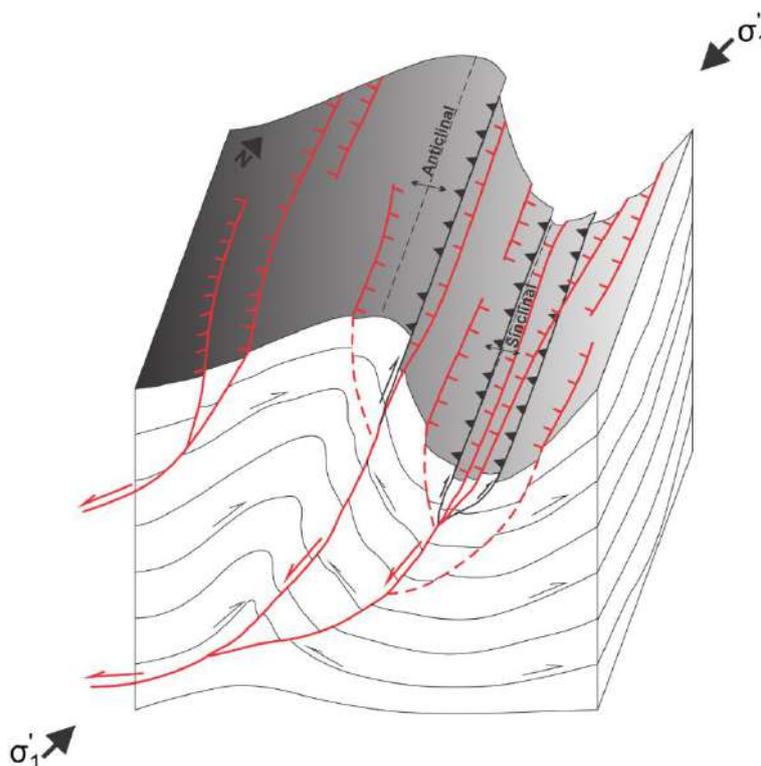


Figura 4.5. Etapa transtensivo, que produce el desarrollo de fallamiento normal paralelo al eje del pliegue.

Etapa 6

En esta etapa corresponde a la intrusión magmática y a una extensión local producto de esta. Dentro de esta intrusión magmática se encuentra el pórfido Colpayoc, que consta de dos eventos (granodiorita y diorita) que provocó el levantamiento y desviación local del eje del sinclinal de Lullapuquio. Además, se interpreta que en el anticlinal denominado "Chetilla", también se produjo la intrusión de stocks por evidencias de rocas alteradas con textura boxwork producto de la lixiviación y venas de sulfuros (ver anexos, álbum de Foto 24).

Durante esta misma etapa se produjo el ascenso de brechas, aprovechando las fallas de deslizamiento según el rumbo especialmente las de orientación transandina (SW -NE), y los planos de estratificación de la Formación Cajamarca y Grupo Quilquiñan, Mujarrún. Y finalmente se estima posibles pórfidos ocultos al NW de los Stocks de granodiorita y diorita, por el afloramiento de brechas hidrotermales (Foto 3.5b) y algunos dígitos de intrusivo.

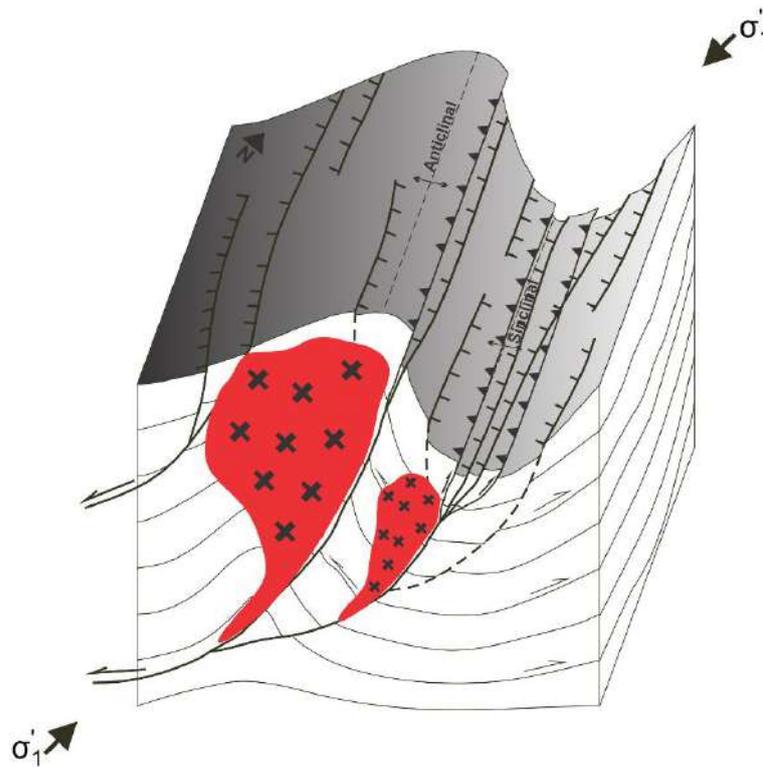


Figura 4.6. Intrusión y emplazamiento en las zonas de charnela de los pliegues. Y extensión local en dirección NE – SW.

Etapas 7

Finalmente, la última etapa corresponde al evento erosivo, y la generación de depósitos cuaternarios. Esta etapa es la encargada de moldear la geomorfología que se presenta hasta la actualidad en el área de investigación y sus alrededores.

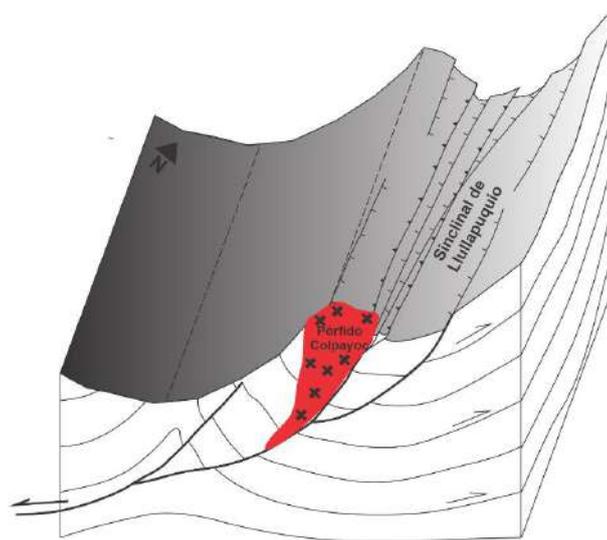


Figura 4.7. Etapa de erosión, la chanela del anticlinal Chetilla fue completamente erosionado, evidenciándose en superficie el sinclinal Lullapuquio y el pórfido Colpayoc.

4.2. MODELAMIENTO GEOLÓGICO

La información geológica ha sido modelada en un ambiente de tres dimensiones (3D), se construyó el modelo litológico-estructural, para entender la relación espacial tridimensional del análisis estructural del sinclinal Lullapuquio con la intrusión del pórfido Colpayoc.

Para la elaboración del modelo se ha utilizado el software Leapfrog Geo 6.0, con información del cartografiado superficial y la interpretación de secciones geológicas. Las secciones están conformadas por dos grupos denominadas "ST" y "S" con direcciones N45°E y S45°E correspondientemente (ver anexos, secciones) y perpendiculares entre sí como se muestra en la Figura 4.8.



Figura 4.8. Vista de las secciones geológicas (ST y S) y el cartografiado superficial en el software Leapfrog, para la elaboración del modelo 3D.

Las unidades sedimentarias modeladas son:

- Ks-ca, Rocas calizas la Formación Cajamarca.
- Ks-qu,m, Rocas calizas del Grupo Quilquiñán, Mujarrún.
- Ks-pu, Rocas calizas de la Formación Yumagual.
- Ki-pa, Rocas calizas de la Formación Pariatambo.
- Ki-chu, Rocas calizas de la Formación Chulec

Unidad volcánica:

- Po-po, Rocas volcánicas andesíticas de la Formación Porculla.

Unidades intrusivas:

- P-di, Stock Diorítico.

- P-gd, Stock Granodiorítico.
- P-oc, Stock Oculto.

Unidad de brechas:

- BxH, Brechas hidrotermales.

Finalmente, las fallas principales que permitieron el ascenso de los intrusivos (stocks) para su posterior emplazamiento, modeladas son:

- Fn, Falla normal.
- Fi, Falla inversa.

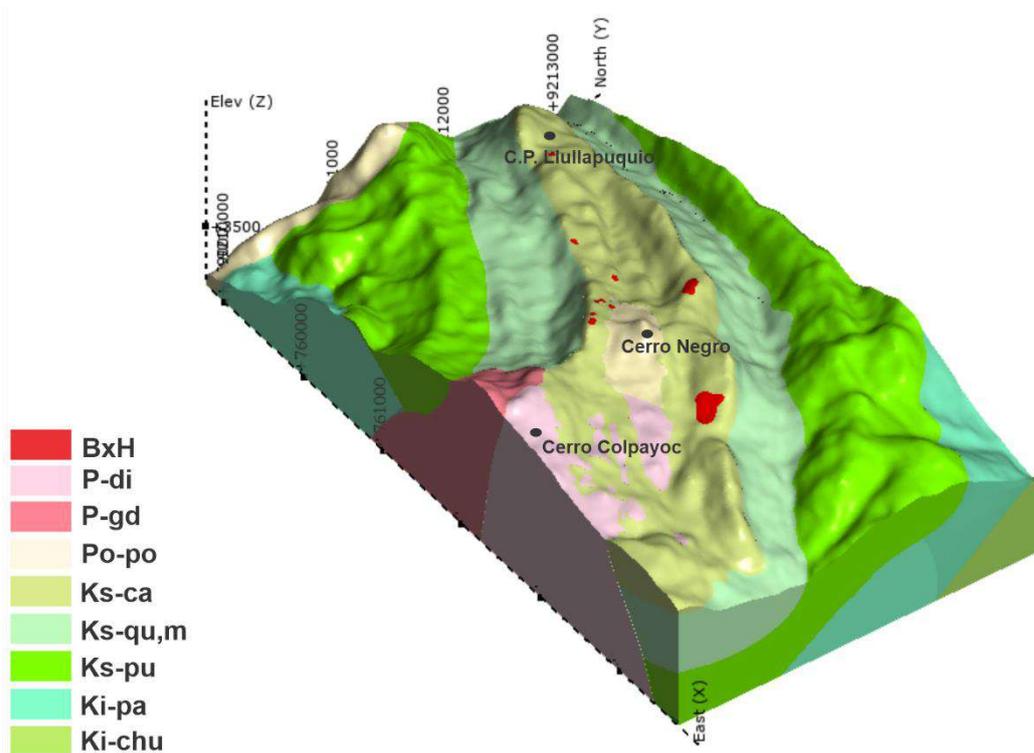


Figura 4.9. Vista del Modelo 3D del área de investigación. Donde se observa el relieve terrestre actual.

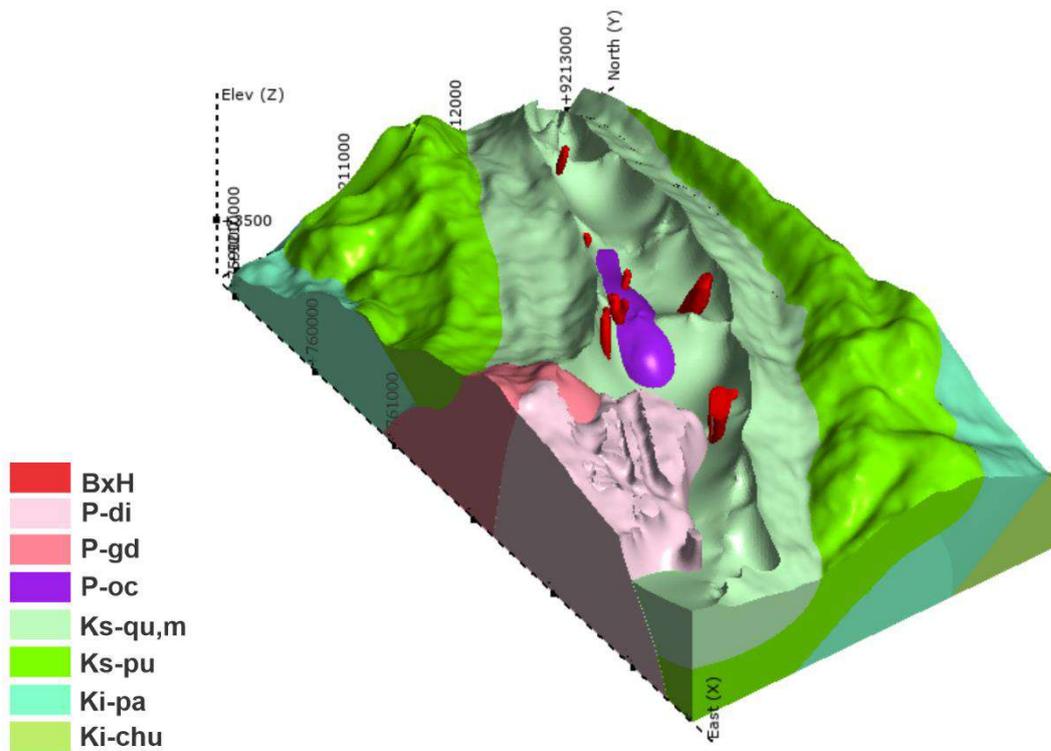


Figura 4.10. Vista del modelo 3D, sin las unidades litológicas de la Formación Porculla y la Formación Cajamarca.

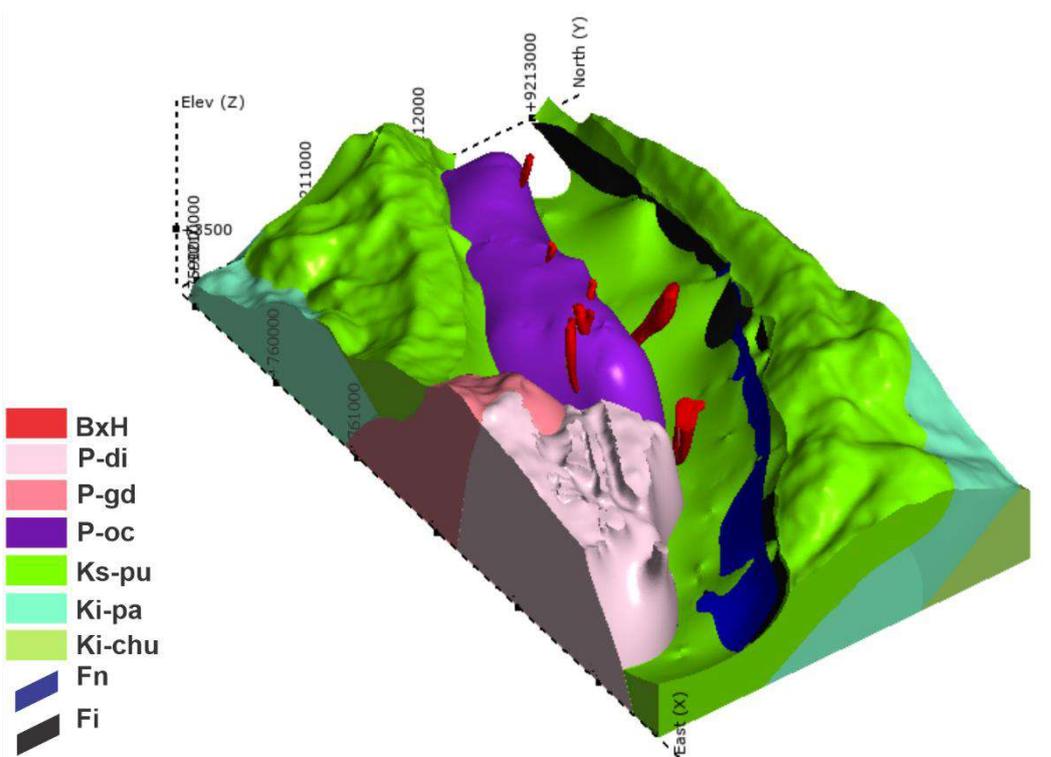


Figura 4.11. Vista del modelo 3D, sin las unidades litológicas Po-po, Ks-ca, Ks-qu,m

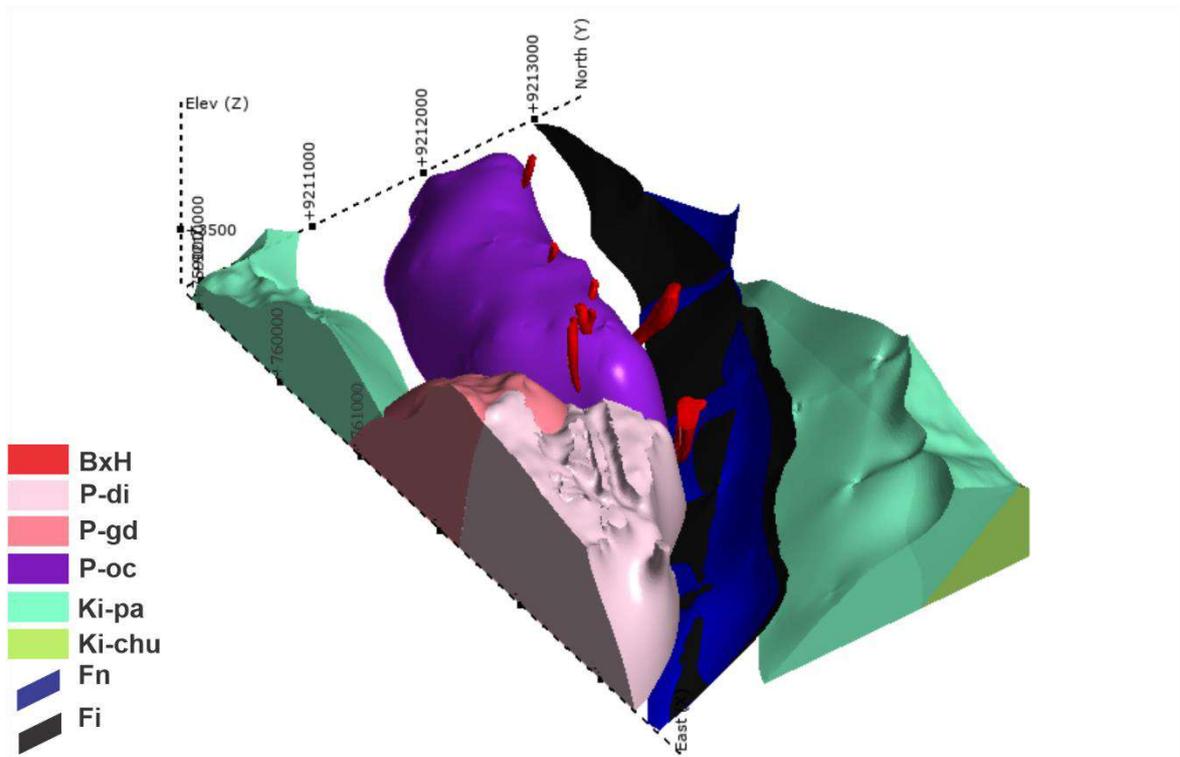


Figura 4.12. Vista del modelo 3D, sin las unidades litológicas del cretácico superior y volcánicos.

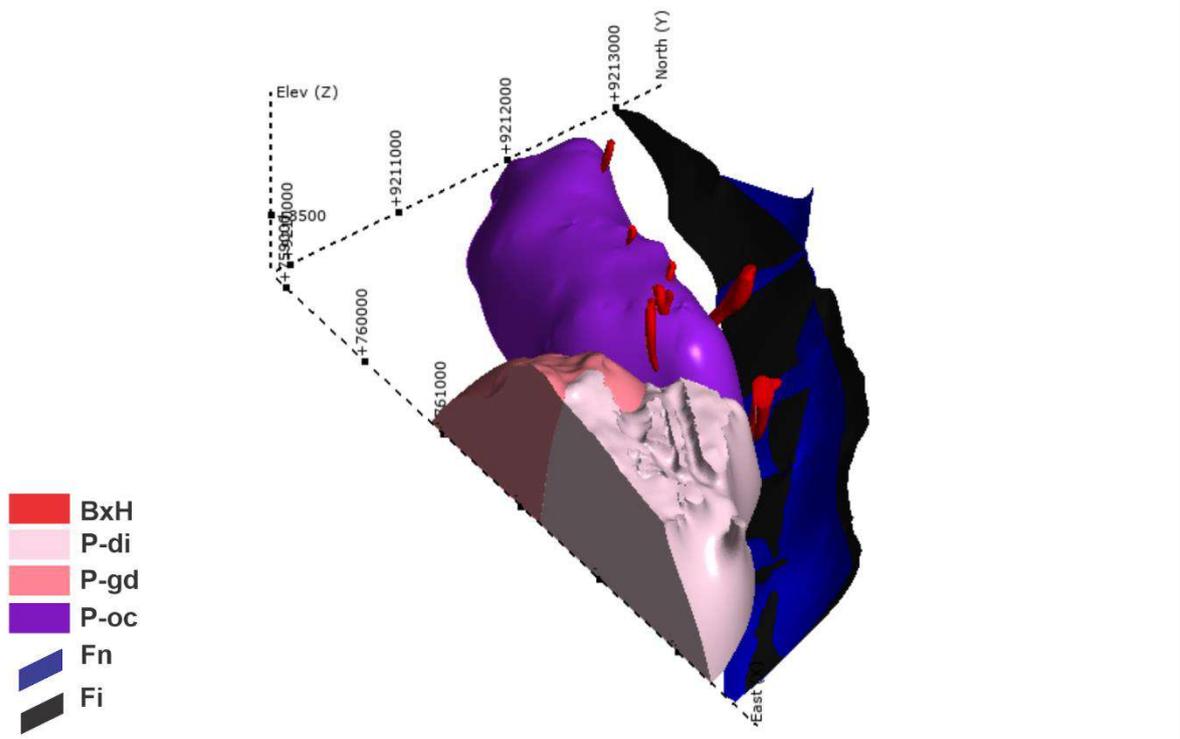


Figura 4.13. Vista del Modelo 3D, de las unidades litológicas intrusivas y de las fallas principales generadoras para el emplazamiento de estos stocks.

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Con la investigación se ha demostrado que el sinclinal de Lullapuquio tuvo un relegamiento, producto de un segundo evento de esfuerzos compresivos (σ_1'). Estos esfuerzos compresivos provocaron regionalmente fallas de desplazamiento según el rumbo, dando un evento transtensivo. Este evento conformado por fallas con desplazamiento del tipo normal generó el ascenso de las intrusiones en el área de investigación, para posteriormente emplazarse los stocks granodiorítico y diorítico en la charnela del sinclinal Lullapuquio, teniendo como roca encajonante a calizas de la Formación Cajamarca y Grupo Quilquiñan, Mujarrún, la cual albergan mineralización del tipo skarn.

Así mismo las fallas de desplazamiento según el rumbo con componente normal generados por el primer evento de esfuerzos compresivos (σ_1), sirven como conducto para la formación de las brechas hidrotermales que afloran en la superficie.

Por lo que la hipótesis inicial ha sido contrastada y verificada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La caracterización estructural del sinclinal de Lullapuquio, y su relación en la intrusión del pórfido Colpayoc, se ve reflejada con:

El modelo de evolución de la deformación e intrusión del pórfido Colpayoc, la cual explica la formación del sinclinal Lullapuquio, el fallamiento normal que generaron el ascenso y emplazamiento de los intrusivos, y el evento erosivo que generó el modelado del relieve terrestre actual.

El modelamiento geológico 3D, donde se muestra los bloques litológicos y la relación espacial de los stocks (Diorítico y Granodiorítico) con la falla principal que permitió el ascenso de la intrusión.

Las estructuras tectónicas principales que controlan la intrusión del pórfido Colpayoc son las fallas con desplazamiento normal del evento transtensivo, así mismo este evento es producto de fallas de rumbo regionales.

El plegamiento para el sinclinal de Lullapuquio tuvo dos mecanismos de deformación (flexión ortogonal y deslizamiento por flexión). Siendo un pliegue cilíndrico con una vergencia ligera hacia el SE que presenta flancos planares con charnela angular, su línea de charnela tiene una orientación de N115° con un ángulo de inmersión de 3°SW; su plano axial presenta un buzamiento de 87°SW, por lo cual es un pliegue recto horizontal; y el ángulo interflanco del pliegue es de 68°, la cual es un pliegue apretado.

Se elaboró los planos geológicos y estructural, resultado del cartografiado litológico-estructural en campo. Y la elaboración de la columna estratigráfica determinó la secuencia de las unidades litoestratigráficas de la geología local.

5.2. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados en este trabajo, se presenta las siguientes recomendaciones a toda entidad relacionado a la geología y en especial a la empresa FRESNILLO PERÚ S.A.C. titular de la concesión minera del proyecto Colpayoc:

Realizar estudios geofísicos: Líneas sísmicas para verificar las secciones geológicas interpretadas. Y magnetometría, con el propósito de conocer la disposición y extensión a profundidad de los cuerpos intrusivos.

Hacer un programa de perforación alrededor de las brechas hidrotermales aflorantes que conectan al stock oculto propuesto, para hacer estudios petrológicos y geocronológicos.

Realizar análisis estructurales en zonas cercanas al área de estudio, para comprobar si el evento transtensivo, documentado en este trabajo, corresponde a un lineamiento regional (fallas de rumbo).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ALLABY, M. 2008. Dictionary of earth sciences (3er ed.). Oxford University Press Inc. Ney York, The United States.

ALLMENDINGER, R. 1987. Técnicas modernas de análisis estructural. Asociación geológica argentina. Buenos Aires, Argentina.

BABÍN, V & GÓMEZ, D. 2010. Problemas de geología estructural. Madrid, España.

BARRIOS, M. 2015. Modelo estructural y cinemático del yacimiento de quebrada blanca y su relación con la mineralización supérgena. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

COBA, R. 2017. Modelo geométrico y características estructurales del sistema de vetas de alto ángulo al norte del Batolito de Pataz mina Poderosa La Libertad. Universidad Nacional De Cajamarca. Cajamarca, Perú.

COBERTT, G. 2018. Epithermal gold-silver and porphyry copper-gold exploration. Sydney, Australia.

DÁVILA, J. 2011. Diccionario geológico. Arth-Altuna. Lima, Perú.

DE SITTER, L. 1976. Geología estructural (3rd ed.). Omega. Barcelona, España.

FOSEN, H. 2010. Structural geology (1st ed.). Cambridge University Press. New York. The United States of America.

FOSEN, H. 2016. Structural geology (2nd ed.). Cambridge University Press. New York. The United States of America.

GARCÍA, M. 2012. Geología estructural. Esfuerzos y deformaciones de las rocas. Madrid, España.

- GONZALES, J. 2013. Controles estructurales del pórfido Trapiche Apurímac. Universidad Nacional De Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- LAGOS, A. 2012. Caracterización litológica y estructural de la serie cretácea en la zona de Urubamba. Cajamarca-Perú. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Lima-Perú.
- LAGOS, A. 2015. Modelamiento de la relación entre los procesos tectónicos y la inestabilidad en los terrenos de las zonas: Urubamba y Tres ríos. Universidad Nacional De Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- LAGOS, ET AL. 2009. Modelamiento estructural de las áreas de Cajamarca, San Marcos y Bolívar. Universidad Nacional De Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- LILLO, J & OYARZUN, R. 2013. Geología estructural aplicada a la minería y exploración minera. Gemm. Madrid, España.
- MARTÍNEZ, J. 2003. Geología estructural y dinámica global. Universidad de Salamanca. Salamanca, España.
- MARQUINA, M. 2009. Control estructural y potencial exploratorio del distrito minero conga. Universidad Nacional De Ingeniería. Lima, Perú.
- MATTAUER, M. 1976. Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre. Omega. Barcelona, España.
- NIEMEYER, H. 1999. Apuntes de geología estructural. Antofagasta, Chile.
- PATERSON ET AL. 1991. Aureole Tectonics. Mineralogical Society of America. Virginia, The United States of America.

- ORBEGOZO, M. 2008. Formulación de un modelo geológico-estructural, en el sistema de vetas de la franja oeste del yacimiento minero de Parcoy, Consorcio Minero Horizonte. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Lima, Perú.
- OYARZÚN, J. 2009. Léxico sobre procesos y estructuras geológicas. Universidad De La Serena. Chile.
- PRICE, N & COSGROVE, J. 1990. Analysis of geological structures. London, UK.
- RAMÍREZ, A. 2012. Estudio geológico-estructural del anticlinal la caja (área bonanza-providencia), sierra madre oriental, NE Zacatecas. Universidad Autónoma De Nuevo León. Nuevo León, México.
- REY, P. 2016. Introduction to structural geology. Sydney, Australia.
- REYES, L. 1980. Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba (Boletín Serie A-N°31) Estudio realizado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- ROWLAND ET AL. 2007. Structural Analysis and Synthesis a Laboratory Course in Structural Geology. Blackwell Publishing. Oxford, UK.
- SAKLANI, P. 2008. Glossary of structural geology and tectonics. Satish serial publishing house. Delhi, India.
- SÁNCHEZ, S. 2013. Estudio geológico de las unidades formacionales cretácicas, paleógenas - neógenas en la zona de Sexemayo. Universidad Nacional De Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- SILLITOE, R. 2010. Estudio de Sistemas de Pórfidos de Cobre. Sociedad de Geología Económica. Londres, Inglaterra.

TRISTAN ET AL. 2012. Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas. Sociedad Geológica Mexicana. México.

TURNER, M. 2012. Reporte Técnico del Proyecto Colpayoc – Estrella Gold Corporation del yacimiento Colpayoc. Toronto, Canadá.

VAN DER PLUIJM, B & MARSHAK, S. 1997. Earth structure. W. W. Norton & Company. New York, The United States of America.

ANEXOS

A. PLANOS

Plano 01: Plano de ubicación

Plano 02: Plano topográfico

Plano 03: Plano geológico

Plano 04: Plano estructural

Plano 05: plano geomorfológico

B. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA

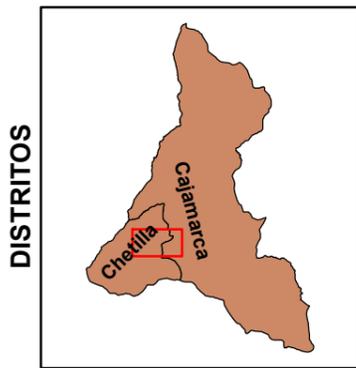
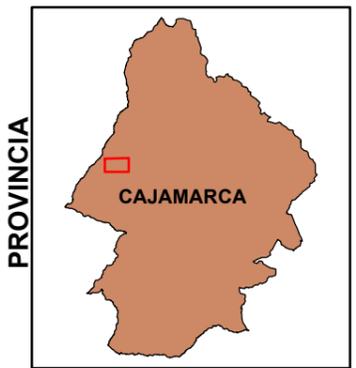
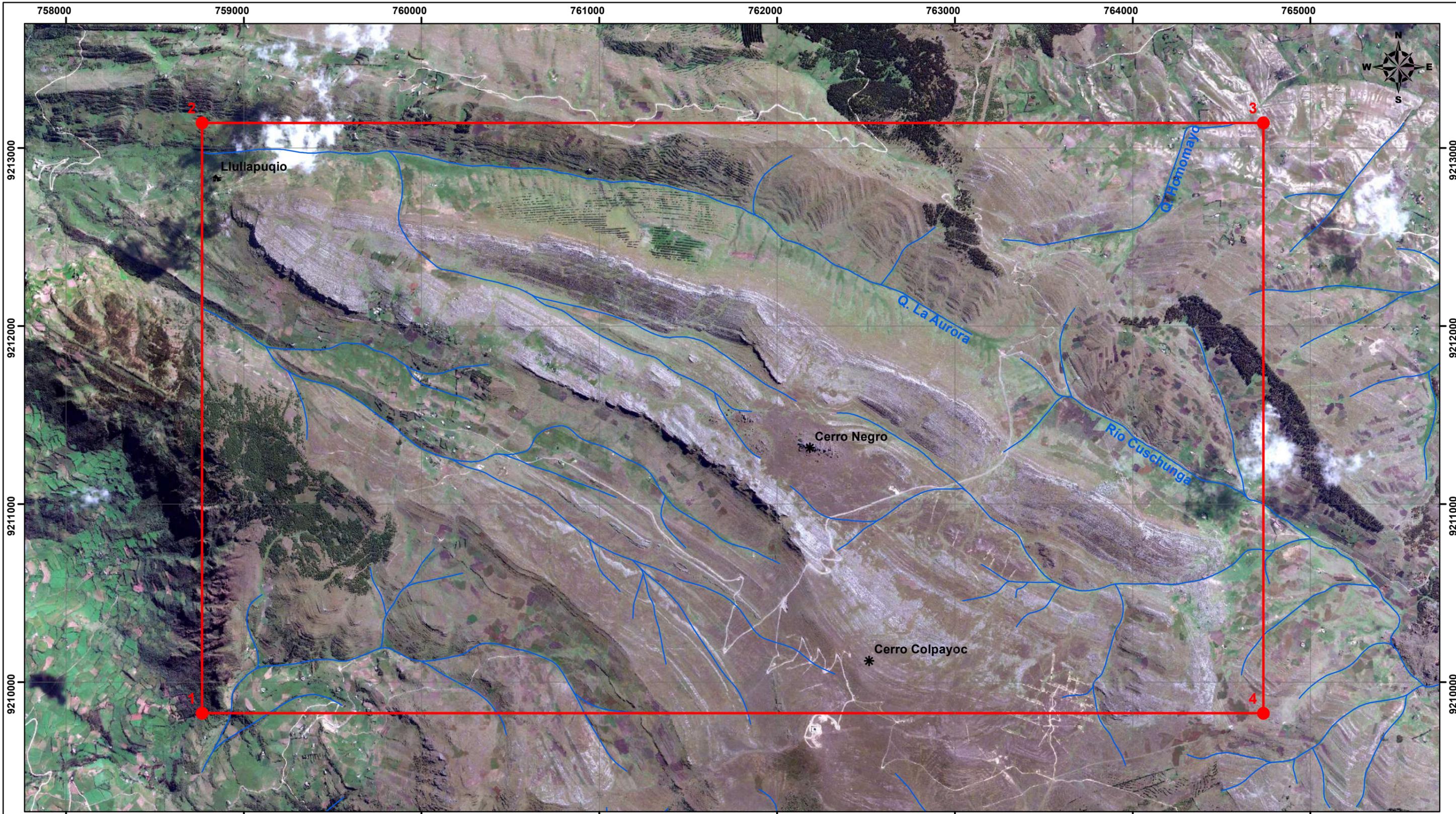
C. SECCIONES

Secciones longitudinales con dirección S45°E: S1, S2, S3, S4, S5.

Secciones transversales con dirección N45°E: ST1, ST2, ST3, ST4, ST5.

D. TABLA DE DATOS DE LAS ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

E. ÁLBUM DE FOTOS

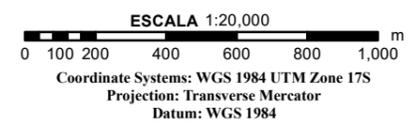


COORDENADAS

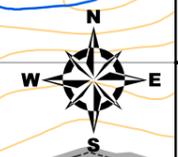
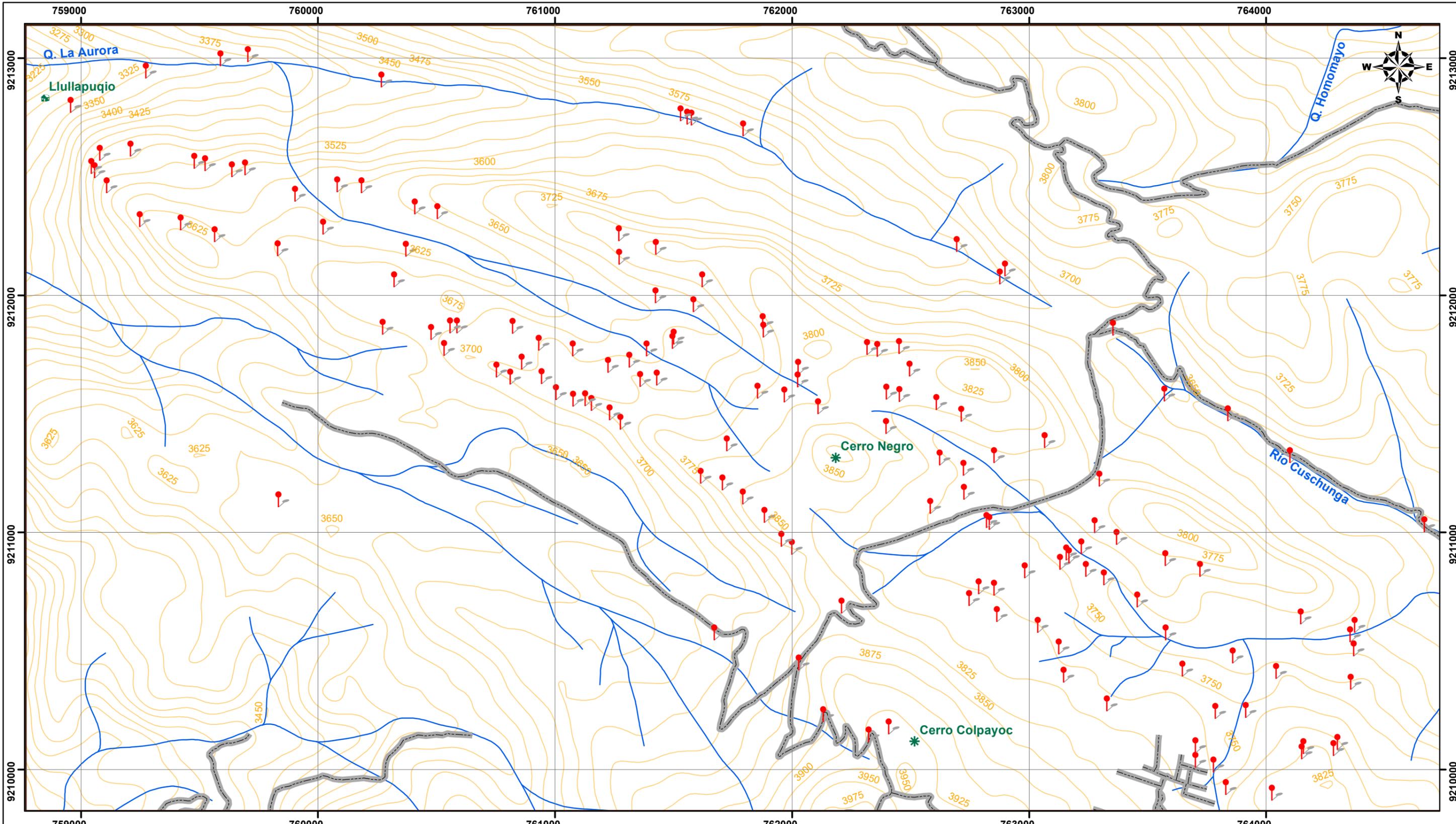
VÉRTICES	LONGITUD	LATITUD
1	758765	9209825
2	758765	9213140
3	764735	9213140
4	764735	9209825

SIMBOLOGÍA

- Centro poblado
- Cerros
- Vértices
- Drenajes
- Área de investigación



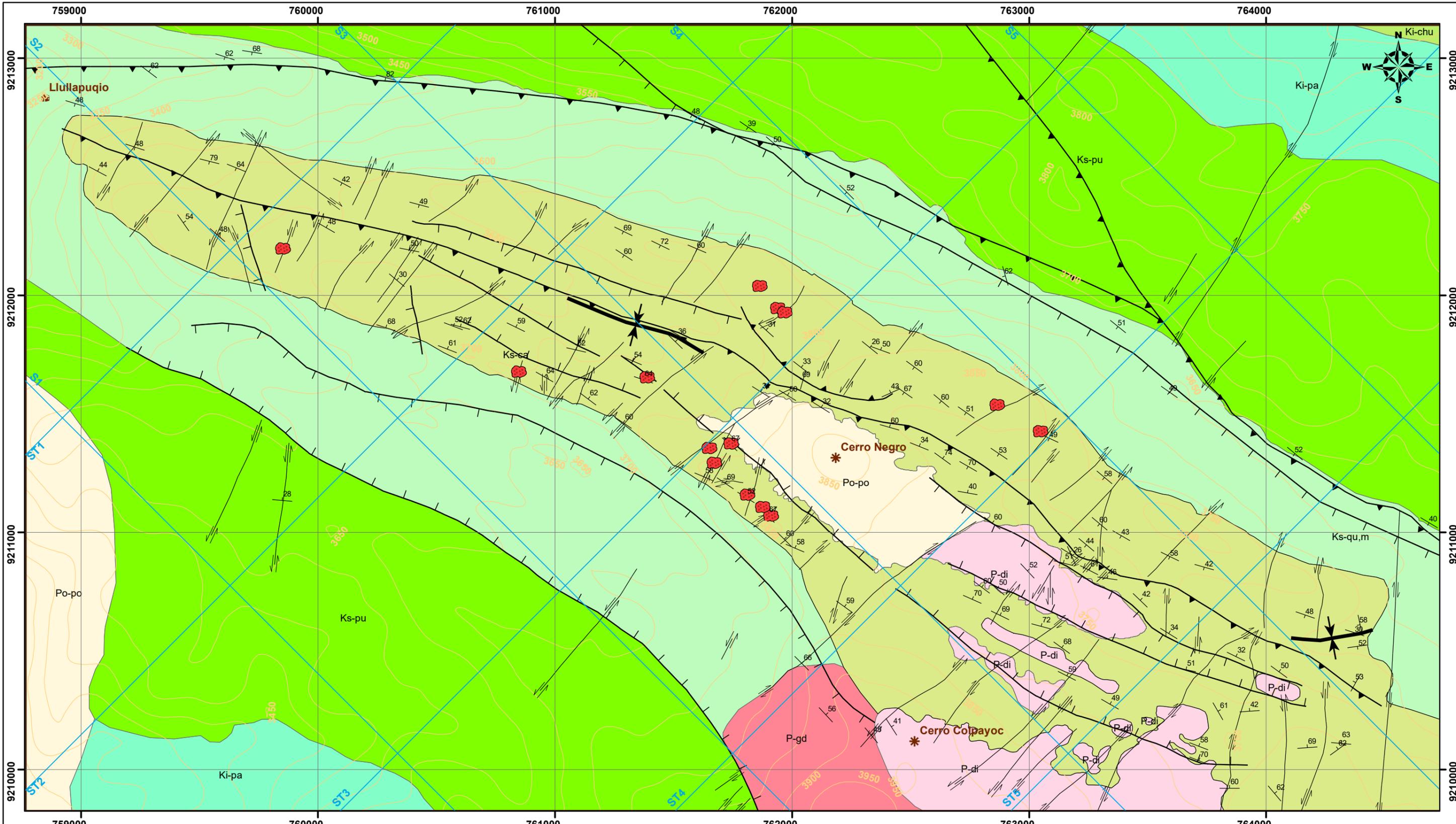
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Lullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	N° PLANO 01
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
PLANO: Ubicación	ESCALA: 1:20000	Cajamarca, junio del 2021



SIMBOLOGÍA	
	Centro poblado
	Cerros
	Puntos de control estructural
	Curvas de nivel
	Drenajes
	Carreteras

ESCALA 1:15.000
 0 75 150 300 450 600 750 m
 Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
	TESIS: Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	TESISTA: Bach. José Humberto Requelme Quiliche	
ASESOR: Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	PLANO: Topográfico ESCALA: 1:15000 Cajamarca, junio del 2021		



SIMBOLOGÍA

- Centro poblado
- Cerros
- Trazos de perfil
- Curvas de nivel

GEOLOGÍA

- Brecha
- Stock Diorítico
- Stock Granodiorítico
- Formación Porculla
- Formación Cajamarca
- Grupo Pulluicana
- Grupo Quilquiñán, Mujarrún
- Formación Pariatambo
- Formación Chúlec

ESTRUCTURAS

- Falla inversa
- Falla dextral
- Falla normal
- Falla sinistral
- Sinclinal
- Estratos

ESCALA 1:15,000

0 75 150 300 450 600 750 m

Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

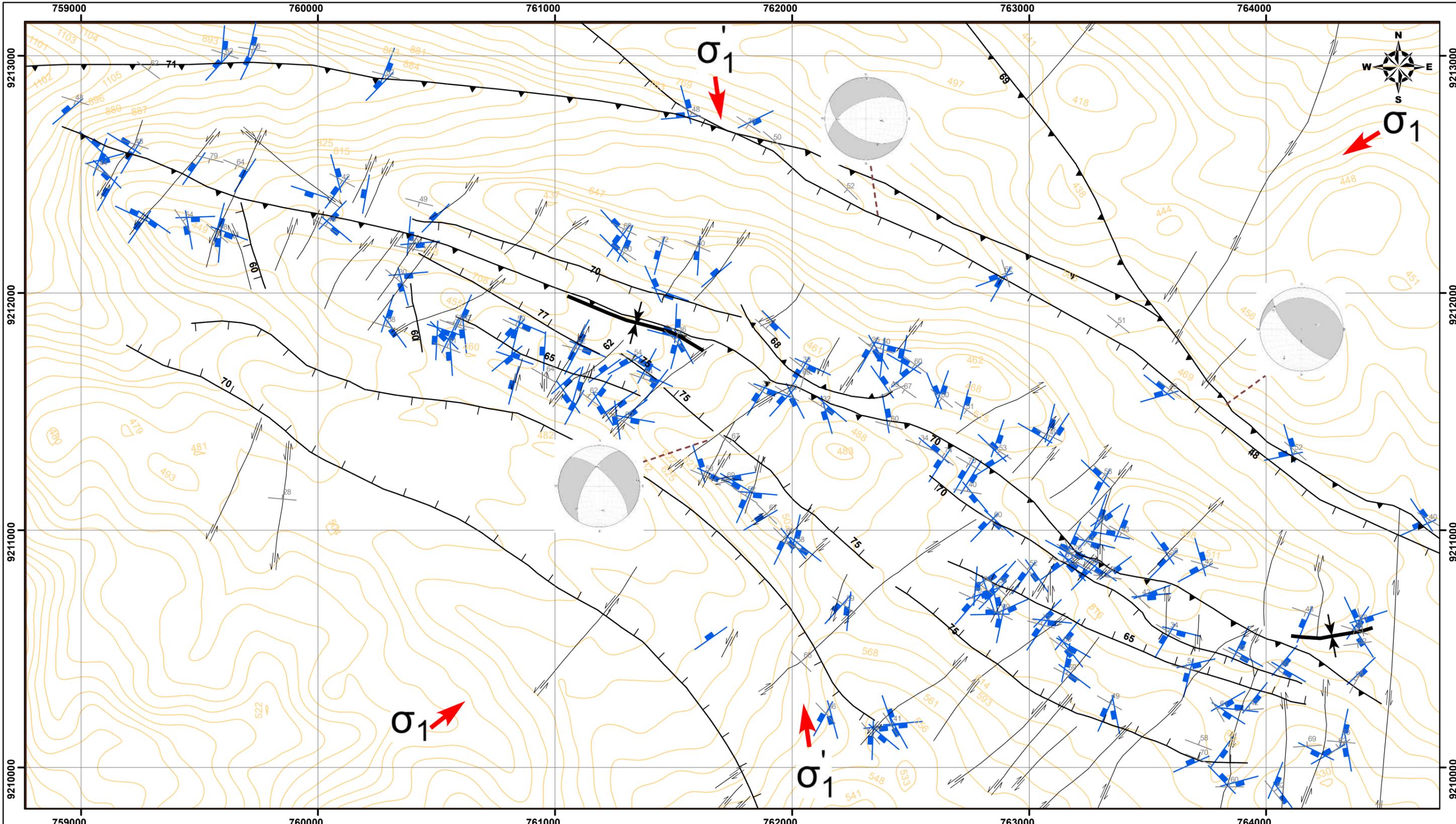
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica

TESIS: Caracterización Estructural Del Sinclinal De Lullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.

TESISTA: Bach. José Humberto Requelme Quiliche

ASESOR: Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani

PLANO: Geológico **ESCALA:** 1:15000 **PLANO:** 03
Cajamarca, junio del 2021



SIMBOLOGÍA

Curvas de nivel

Dirección de esfuerzos

ESTRUCTURAS

Falla inversa Falla dextral Sinclinal Diaclasas

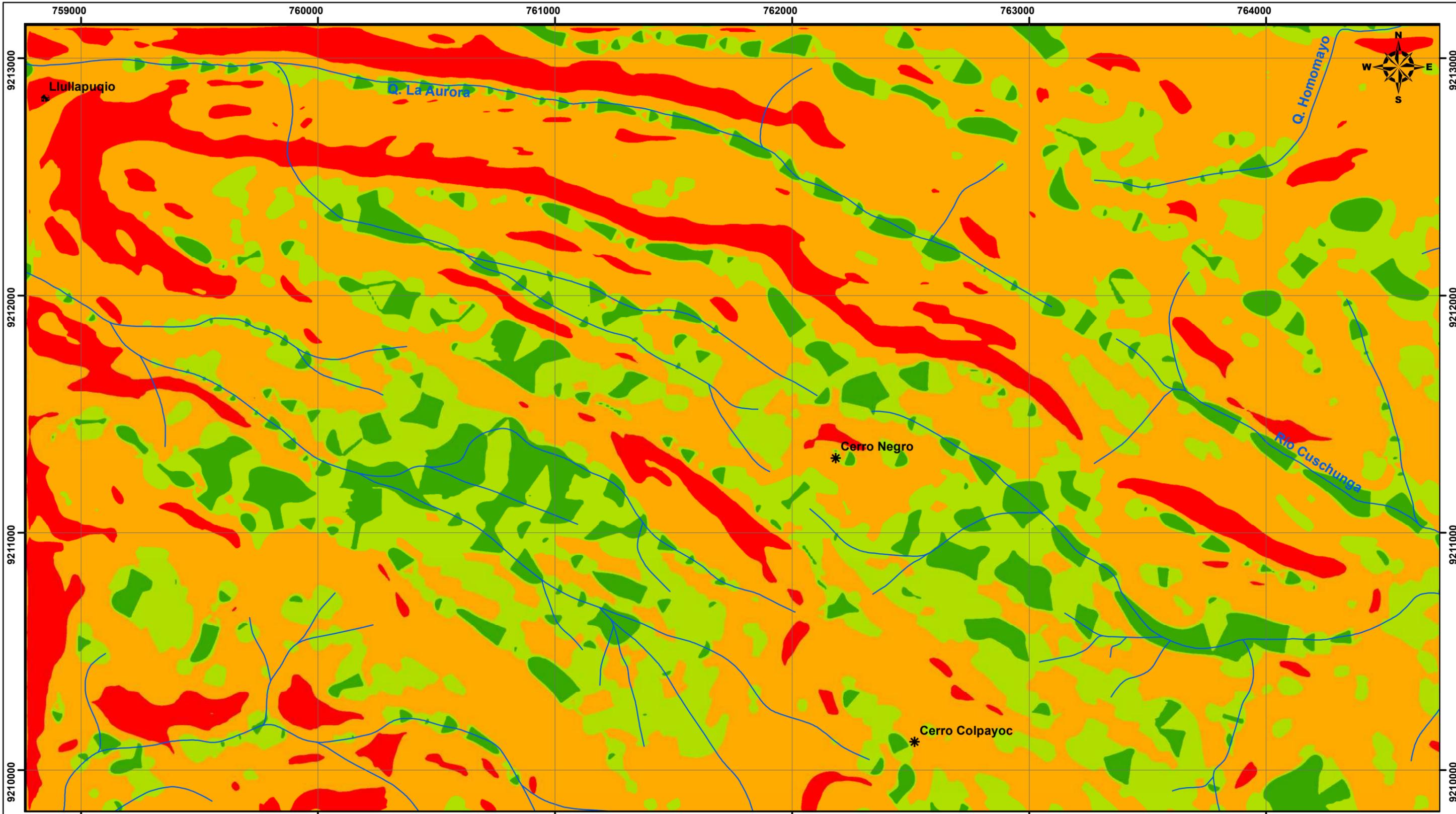
Falla normal Falla sinistral Estratos

ESCALA 1:15.000

0 75 150 300 450 600 750 m

Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS: Caracterización Estructural Del Sinclinal De Lullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.		
TESISTA: Bach. José Humberto Requelme Quiliche		Nº PLANO <h1>04</h1>
ASESOR: Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani		
PLANO: Estructural	ESCALA: 1:15000	Cajamarca, junio del 2021



SIMBOLOGÍA

	Centro poblado
	Cerros
	Drenajes

LEYENDA

	0° - 8°	Planicie
	8° - 20°	Ladera
	20° - 50°	Lomada
	> 50°	Escarpe

ESCALA 1:15.000
 0 75 150 300 450 600 750 m
 Coordinate Systems: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS: Caracterización Estructural Del Sinclinal De Lullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.		
TESISTA: Bach. José Humberto Requelme Quiliche		Nº PLANO <h1>05</h1>
ASESOR: Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani		
PLANO: Geomorfológico	ESCALA: 1:15000	Cajamarca, junio del 2021

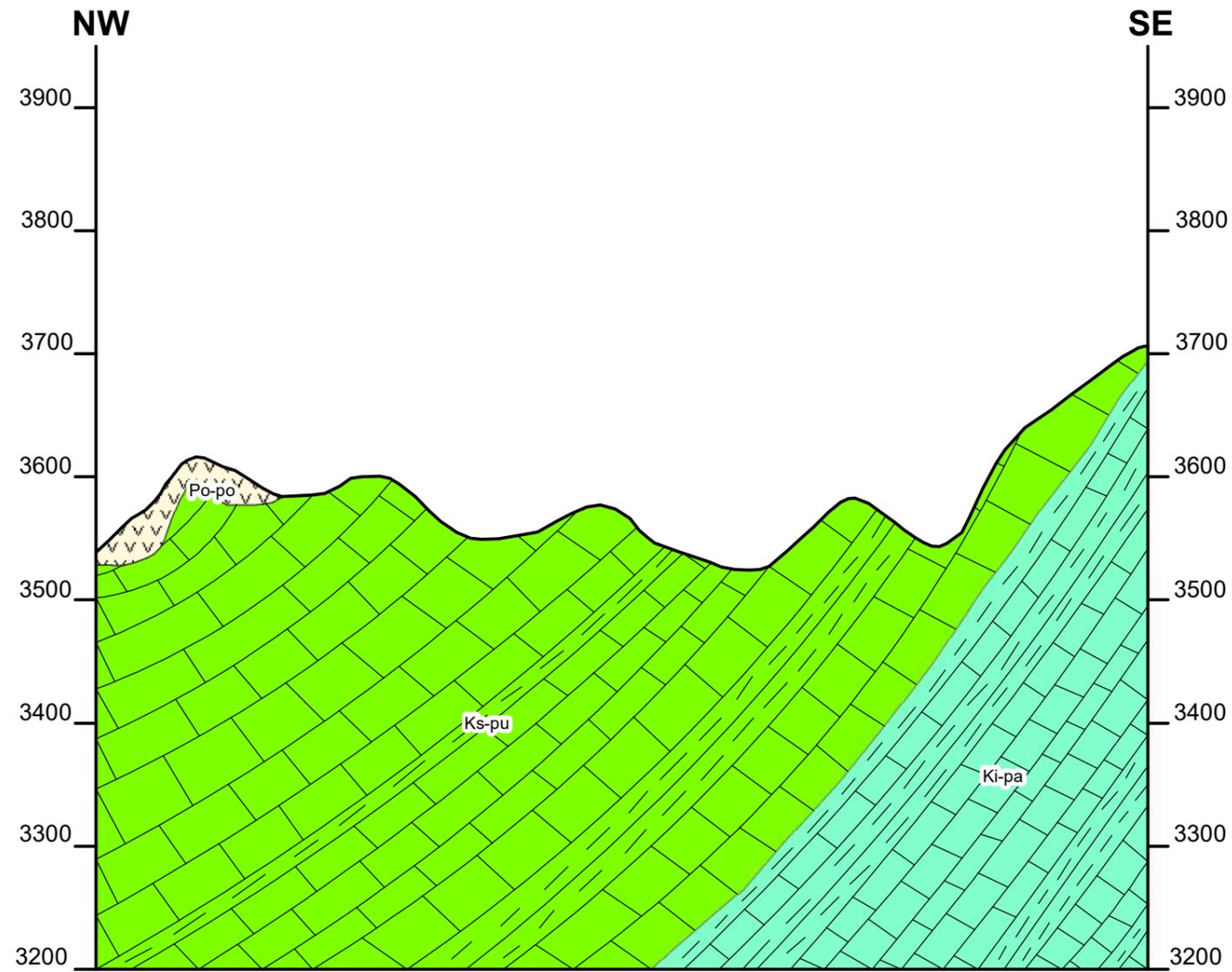
ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD LITOSTRATIGRÁFICA	ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	Cu	Ho	Depósitos Aluviales	25		Dep. aluviales con suelos GC>GM
	Pa/Ne	Ol/Mi	Formación Porculla	100		Rocas andesíticas de color violáceo, con textura porfírica
MESOZOICO	CRETÁCEO	SUPERIOR	Formación Cajamarca	400	Rocas calizas blanquecinas, estratos mayores a 60cm, intercaladas con delgados estratos de lutitas	
			Grupo Quilquiñán, Mujarrún	350	Rocas calizas nodulares, intercaladas con delgados estratos de lutitas arenosas	
			Grupo Pullucana	600	Rocas calizas grises contextura mudstone, intercaladas con delgados estratos de margas	
		INFERIOR	Formación Pariatambo	250	Rocas lutitas grises o negras, intercaladas con calizas bituminosas	
			Formación Chúlec	50	Rocas calizas arenosas	

Serie de los Soctks: Oigoceno / Mioceno

ABREVIATURAS

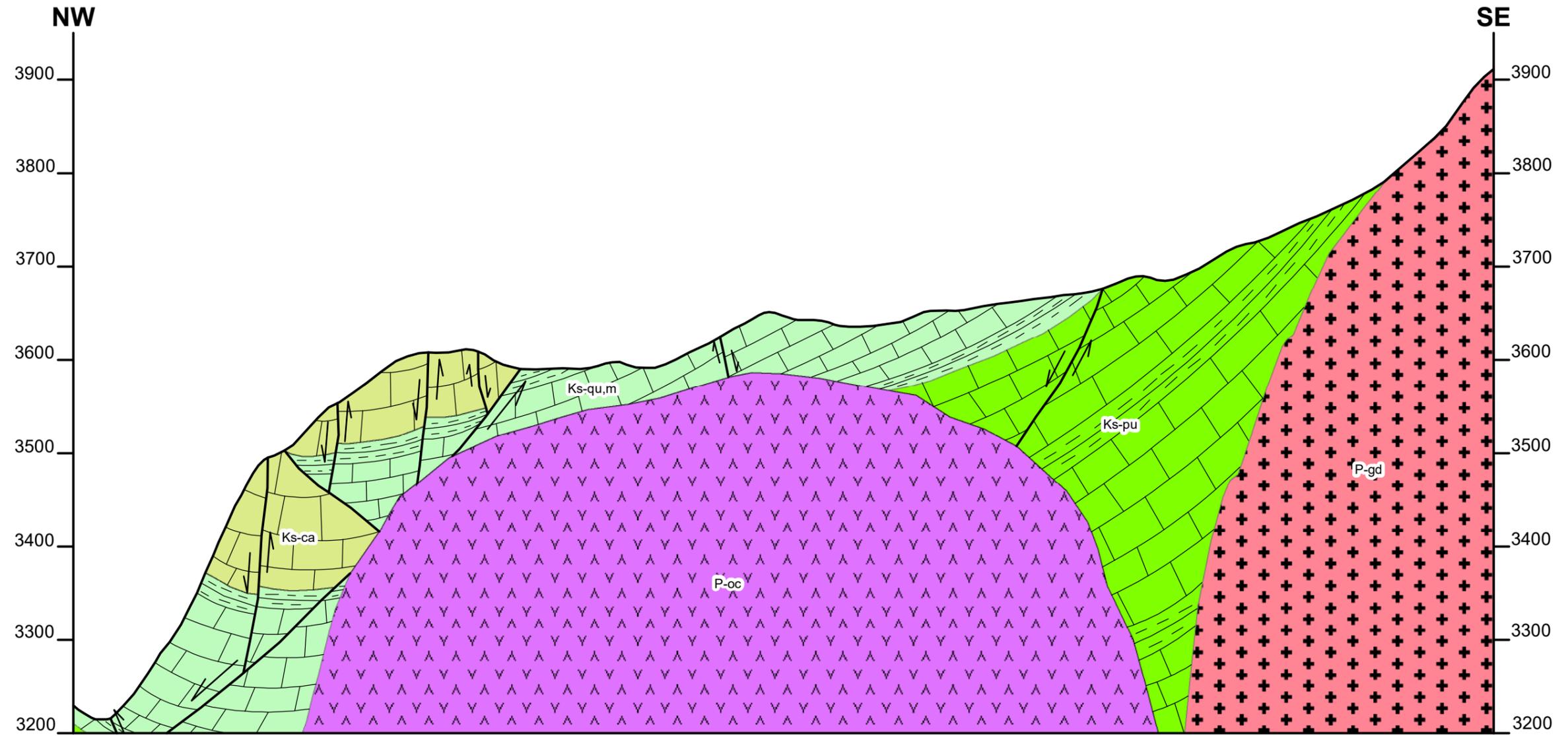
Cu: Cuaternario
Pa: Paleógeno
Ne: Neógeno
Ho: Holoceno
Ol: Oligoceno
Mi: Mioceno
Dep: Depósitos
GC: Grava arcillosa
GM: Grava limosa

		UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA	
		FACULTAD DE INGENIERÍA	
		Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica	
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Lullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.		
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	N° PLANO	06
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani		
PLANO: Columna estratigráfica	ESCALA: 1:10000	Cajamarca, junio del 2021	



GEOLOGÍA	
	Formación Porculla
	Grupo Pullucana
	Formación Pariatambo

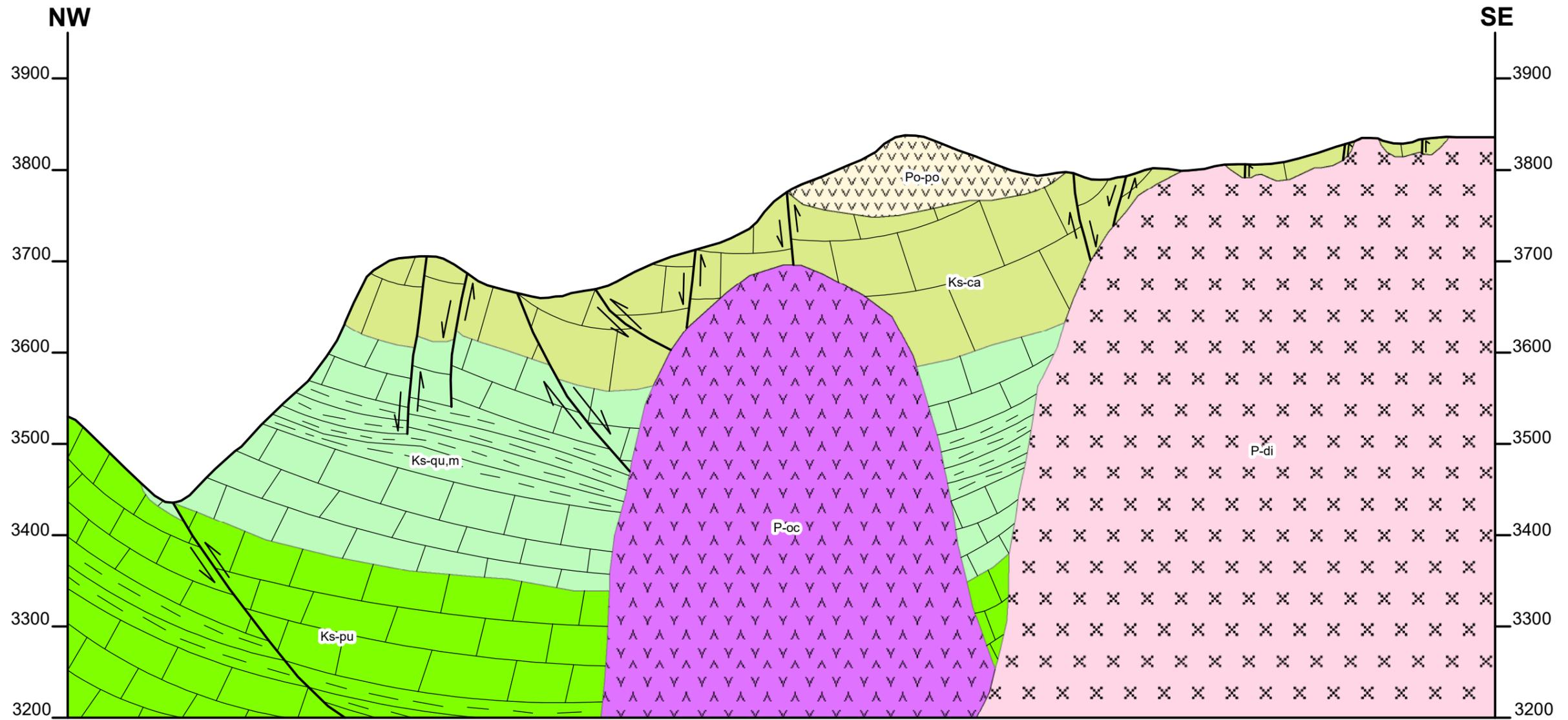
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESISTA: Bach. José Humberto Requelme Quiliche	ASESOR: Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	SECCIÓN S1
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	



GEOLOGÍA	
	Stock Granodiorítico
	Stock Oculto
	Formación Cajamarca
	Grupo Quilquiñán, Mujarrún
	Grupo Pulluicana

LEYENDA	
	Falla

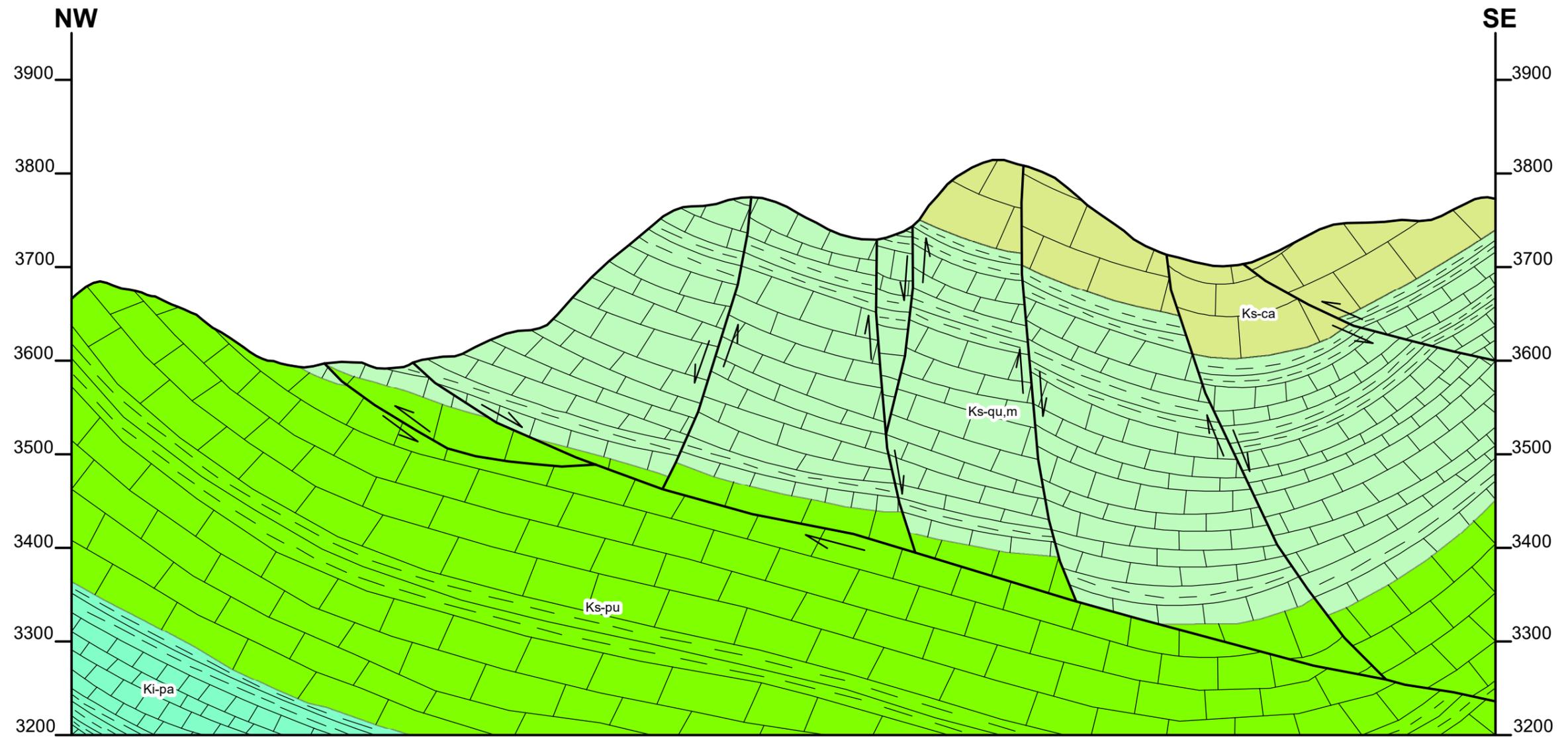
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	SECCIÓN S2
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	Cajamarca, junio del 2021



GEOLOGÍA	
	Stock Diorítico
	Stock Oculto
	Formación Porculla
	Formación Cajamarca
	Grupo Quilquiñán, Mujarrún
	Grupo Pulluicana

LEYENDA	
	Falla

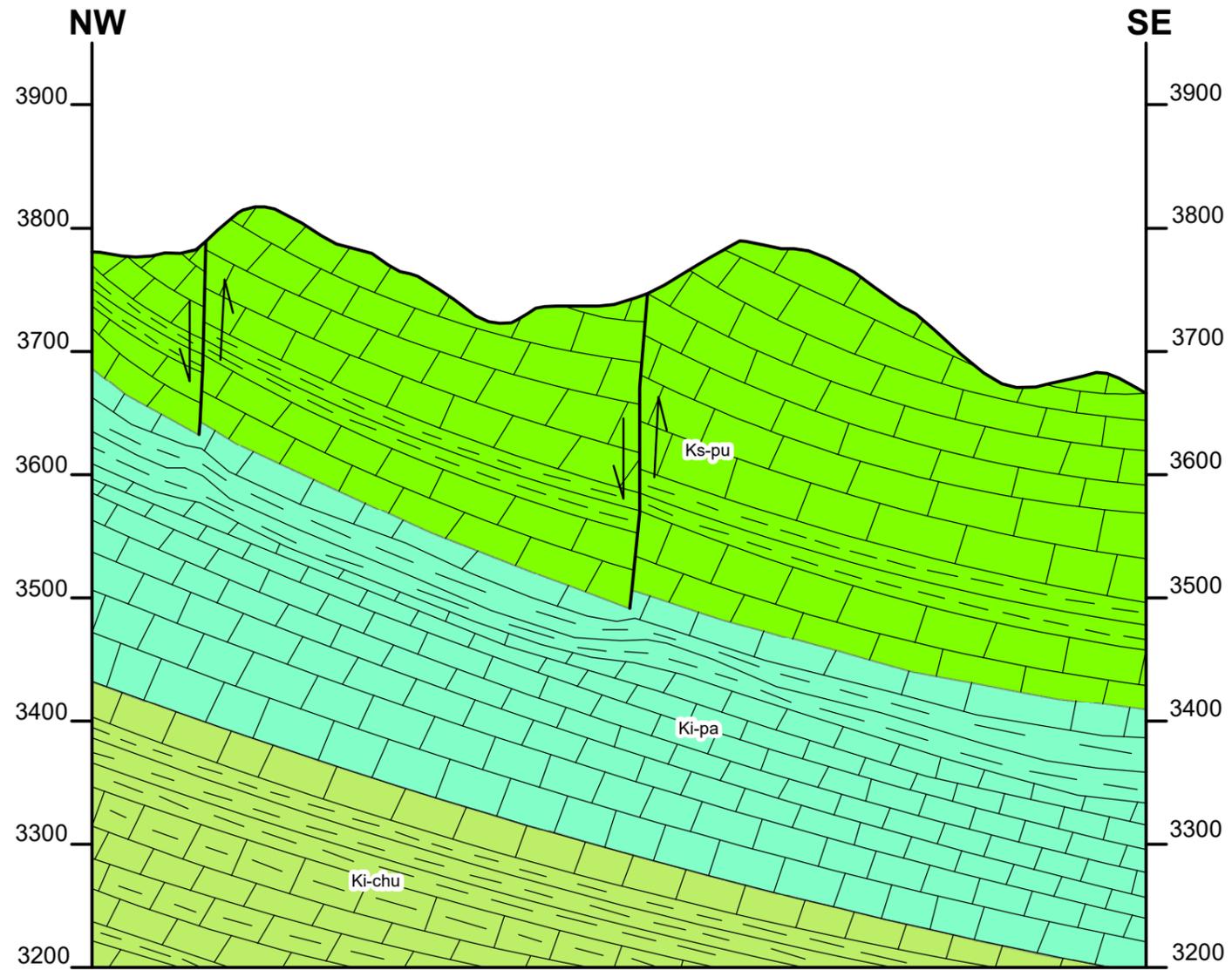
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	SECCIÓN S3
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	Cajamarca, junio del 2021



GEOLOGÍA	
	Formación Cajamarca
	Grupo Quilquiñán, Mujarrún
	Grupo Pullucana
	Formación Pariatambo

LEYENDA	
	Falla

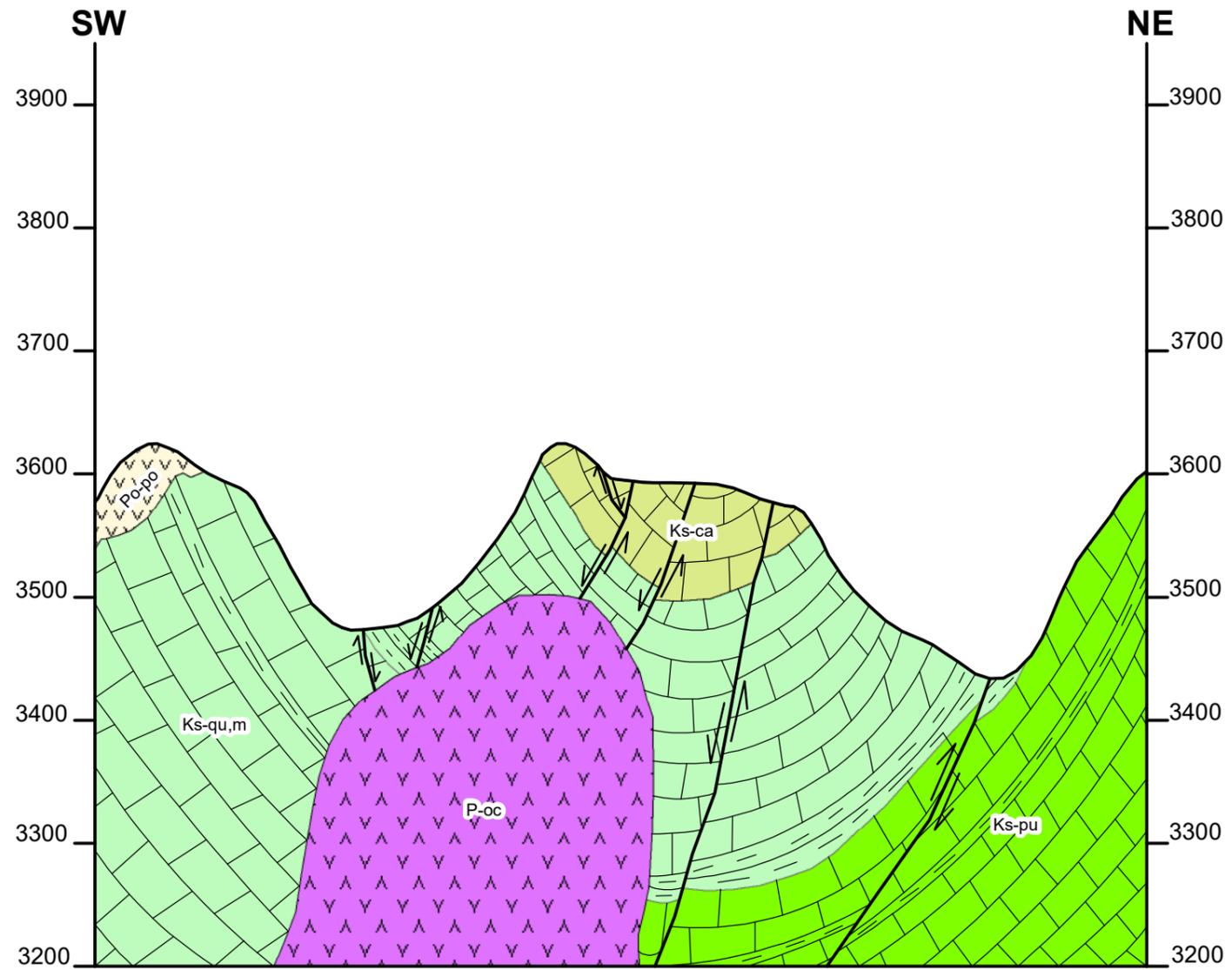
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESISTA: Bach. José Humberto Requelme Quiliche	ASESOR: Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	SECCIÓN S4
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	



GEOLOGÍA	
	Grupo Pullucana
	Formación Pariatambo
	Formación Chúlec

LEYENDA	
	Falla

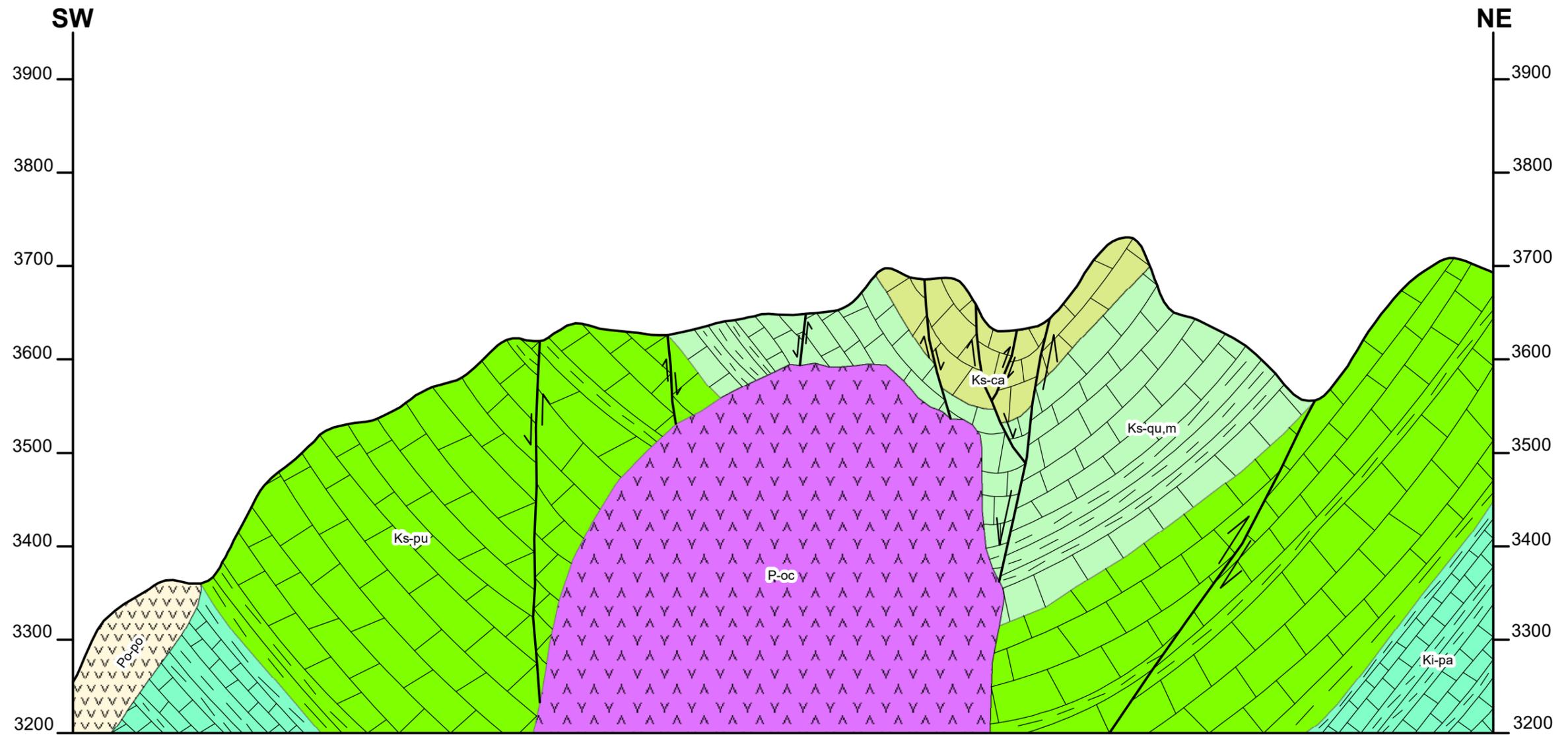
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	SECCIÓN S5
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	Cajamarca, junio del 2021



GEOLOGÍA	
	Stock Oculto
	Formación Porculla
	Formación Cajamarca
	Grupo Quilquiñán, Mujarrún
	Grupo Pullucana

LEYENDA	
	Falla

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	Cajamarca, junio del 2021
		SECCIÓN ST1

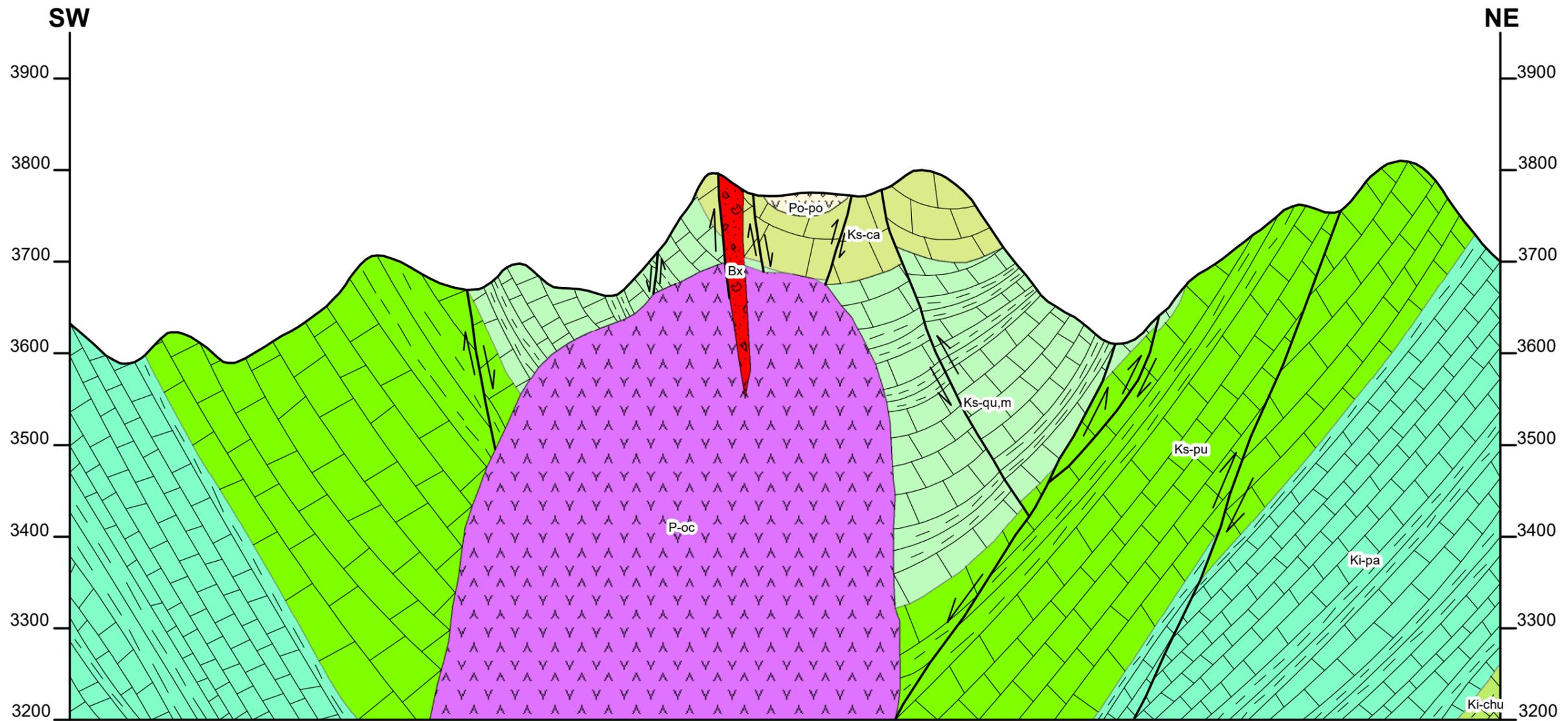


GEOLOGÍA	
	Stock Oculto
	Formación Porculla
	Formación Cajamarca
	Grupo Quilquiñán, Mujarrún
	Grupo Pullucana
	Formación Pariatambo

LEYENDA	
	Falla

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	Cajamarca, junio del 2021

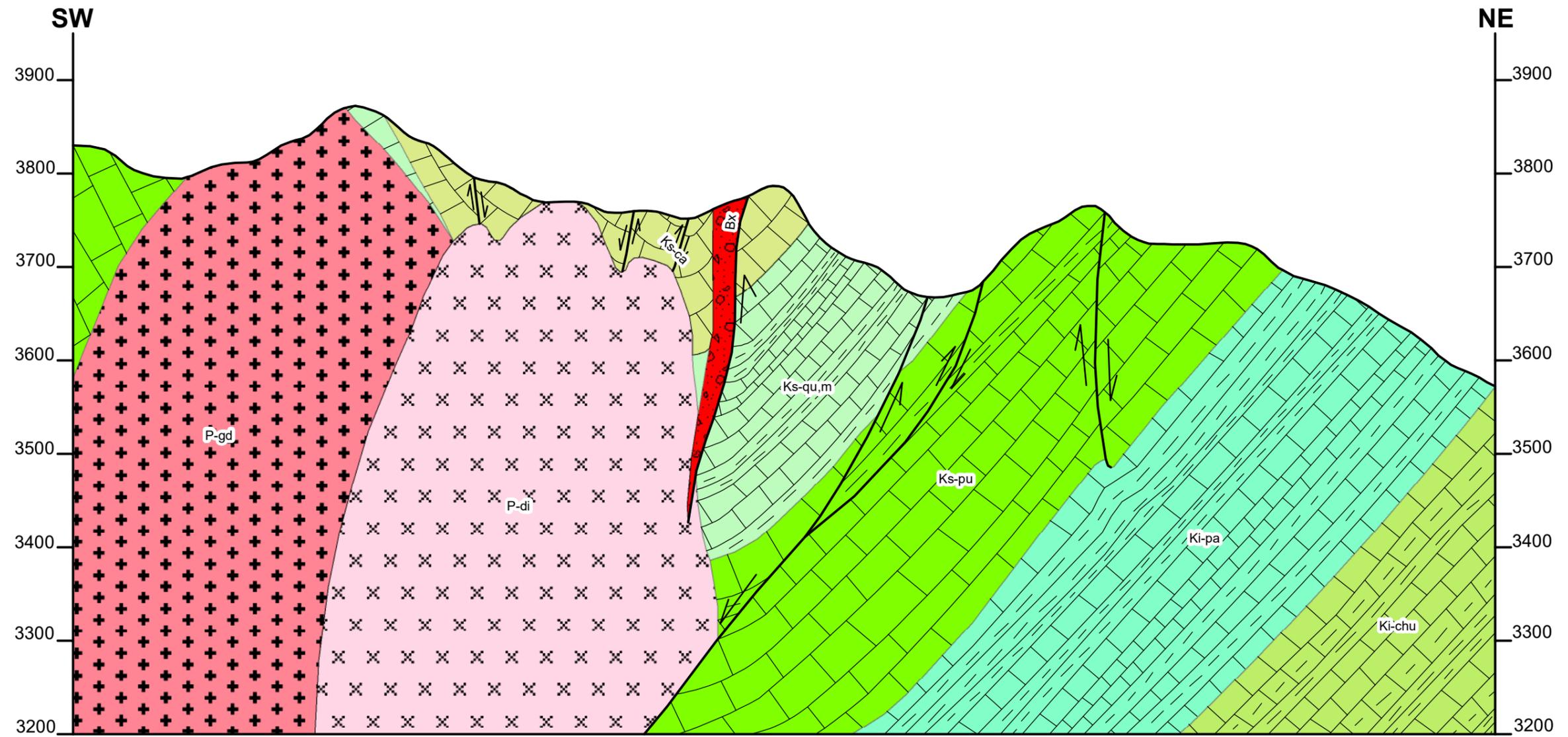
SECCIÓN **ST2**



GEOLOGÍA	
	Brecha
	Stock Oculto
	Formación Porculla
	Formación Cajamarca
	Grupo Quilquiñán, Mujarrún
	Grupo Pulluicana
	Formación Pariatambo
	Formación Chúlec

LEYENDA	
	Falla

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	SECCIÓN ST3
Cajamarca, junio del 2021		



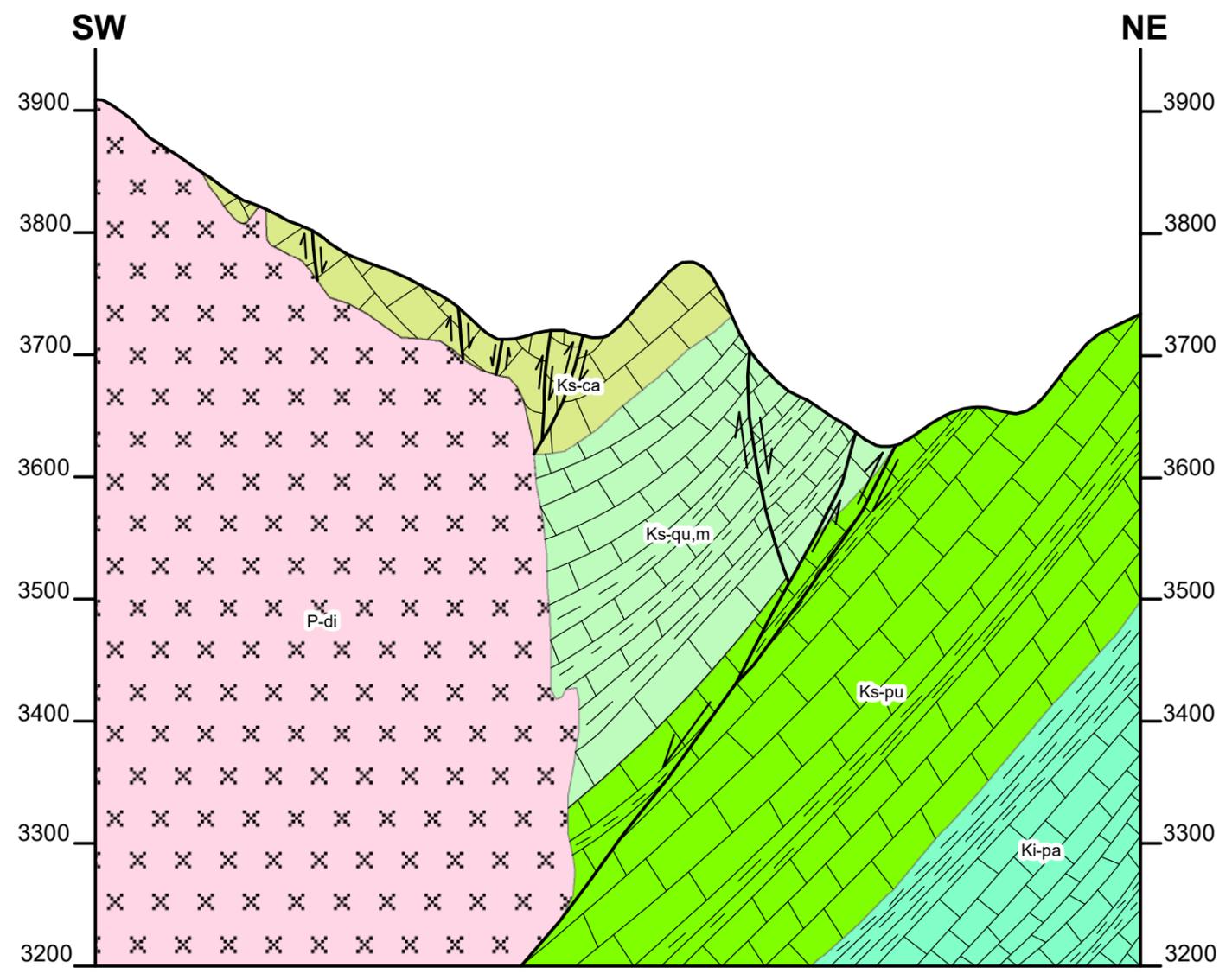
GEOLOGÍA	
	Brecha
	Stock Diorítico
	Stock Granodiorítico
	Formación Cajamarca
	Grupo Quilquiñán, Mujarrún
	Grupo Pulluicana
	Formación Pariatambo
	Formación Chúlec

LEYENDA	
	Falla

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	Cajamarca, junio del 2021

SECCIÓN

ST4



GEOLOGÍA	
	Stock Diorítico
	Formación Cajamarca
	Grupo Quilquiñán, Mujarrún
	Grupo Pullucana
	Formación Pariatambo

LEYENDA	
	Falla

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica		
TESIS:	Caracterización Estructural Del Sinclinal De Llullapuquio Y Su Relación En La Intrusión Del Pórfido Colpayoc, Cajamarca.	
TESISTA:	Bach. José Humberto Requelme Quiliche	
ASESOR:	Dr. Crispín Zenón Quispe Mamani	
ESCALA H: 1:15000	ESCALA V: 1:5000	Cajamarca, junio del 2021

SECCIÓN **ST5**

TABLA DE DATOS DE LAS ESTRUCTURAS

PUNTOS DE CONTROL	NORTE	ESTE	PLIEGUE		FRACTURAS								FALLAS					
			E		D1		D2		D3		VENA		PLANO		RAKE			
			SR	DIP	SR	DIP	SR	DIP	SR	DIP	SR	DIP	SR	DIP	PITCH	TREND	PLUNGE	Cx
1	9212114	762914																
2	9212703.8	761809.9	124	39	64	68												
3	9212749	761591.5									95							
4	9212754.6	761573.4	120	48	265	50	345	64										
5	9212768.3	761546.1											118	48	50	130	22	NxSx
6	9212911	760283.6	105	62	22	88	224	48										
7	9213018.9	759719.7	99	68	13	72	206	83										
8	9212998.9	759604.1	108	62	5	68	222	62										
9	9212947.9	759289.4	307	62														
10	9212802.4	758972.8	107	48									230	66	20	124	30	
11	9210572.5	765438.2	35	60														
12	9210565	765637.5			213	84	152	65										
13	9212080	762892.2	164	62	250	76	210	42										
14	9212215.7	762711.4									186							
15	9211862.8	763369.7	129	51														
16	9211504.1	763854.2											136	71	72	204	69	IxDx
17	9211873	760602.1	285	62	174	40							25	86				
18	9211875.4	760572.8	291	52														
19	9211847	760493.5			183	80	108	72					135	27	50			
20	9211778.5	760547.4	291	61	176	72	26	36										
21	9211868.9	760289.3	288	68	144	36	18	80										
22	9212068.2	760336.6	310	30	165	84	85	42										
23	9212196.6	760386.2	281	50	85	36	5	82										
24	9212289.9	760037.3	300	48	130	42	44	88										
25	9212198.1	759846.3											185	75				

26	9212258.4	759580.9	311	48	110	42	15	60										
27	9212309.5	759436.7	325	54	170	64	88	52										
28	9212321.6	759264.9			295	52	125	53				215	84					
29	9212463.8	759124.7										210	82	42				NxDx
30	9212528	759073.8	298	44	20	83	135	62										
31	9212544.5	759059.9										75	89					
32	9212600.9	759095.2										313	45	20				NxDx
33	9212619.1	759224.8	108	48	211	74	302	48										
34	9212567.7	759494.2										215	61	18				NxDx
35	9212558.1	759539.9	104	79														
36	9212530.6	759652.6	112	64	355	84	248	32										
37	9212540.5	759708.5										213	78	13				NxDx
38	9212429.3	759919.1										108	45	38				NxDx
39	9212468.1	760097.3	118	42	216	77	345	51										
40	9212463.7	760199.7										190	70					
41	9212375.3	760424.9	105	49														
42	9212355.4	760520.2										224	62					
43	9211648.5	761375.4	289	64	114	22	28	70										
44	9211654.4	761444.8			217	88												
45	9211467.1	761292	304	60	54	62	100	38										
46	9211508.5	761246.2			55	74	172	34										
47	9211545.8	761169.9			37	82	149	24										
48	9211567.6	761142.6	307	62														
49	9211564.2	761092.8			16	82	209	49										
50	9211593.3	761020.2			48	62	144	40										
51	9211660	760959.6	300	64														
52	9211657.4	760827.2			195	73												
53	9211687.6	760768.7			50	78												
54	9211720.9	760875.6	289	86														
55	9211870.5	760837.7	296	59	194	68	113	18	222	25								

86	9211692.1	762511.6	126	60	231	64	300	34										
87	9211585.6	762467.9	125	67														
88	9211593.6	762413.7	246	43	325	68												
89	9211449.8	762412.8	286	60	350	88												
90	9211112.6	762599.7	292	34														
91	9211316.2	762638.8	306	74	213	89	310	29										
92	9211273.3	762739.2	120	70	211	66												
93	9211549.4	762624.3	130	60	20	78	338	58										
94	9211500.7	762730.1	125	51	15	62												
95	9210451.9	762044.9	135	66									238	70	59	16	52	SxNx
96	9211141.6	759849.7	275	28														
97	9210578.7	761687.6	235	54														
98	9211227	763312.7	130	58	208	88	314	28										
99	9210519.3	763140.8	306	68	39	80	142	64	120	30								
100	9210610.7	763052.2	285	72	45	89	214	30	96	58								
101	9210656	762880.2	296	69	269	78	349	30	192	44	66	66						
102	9210723.9	762763.2	294	70	5	68	221	82	70	31								
103	9210773.9	762803.4	307	60	54	82	161	36										
104	9210767.8	762868.8	311	50	224	84	41	28										
105	9210841.1	762997.9	317	52	216	81	145	30										
106	9210876.9	763146.7	284	51	139	79	235	87	121	45								
107	9210916	763172.6	302	61	24	66	118	46										
108	9210905.2	763184.3	336	26									299	60	20	308	21	Sxlx
109	9210943.2	763235.9	130	44	40	78	104	54										
110	9211031.6	763292.4	130	60	55	73	20	42										
111	9210980.6	763385.1	120	43	281	41	22	79										
112	9210892.6	763590	116	58	225	70	325	52										
113	9210846.3	763737.1	106	42	344	78	242	51										
114	9210646.3	764161.2	109	48	203	79												
115	9210610.6	764389	168	58	72	81							335	74	35	344	30	

146	9210280	763344.4	300	49	169	25	204	68										
147	9210184.1	762423.9	327	41	341	81	151	41	85	60								
148	9210148.6	762338.4	320	45	130	40	182	78	84	87								
149	9210235.3	762147.5	317	56	209	67							165	58	32			DxNx
150	9210691.1	762224.8	306	59	222	81	186	45										

Abreviaturas:

E: Estrato, SR: Strike right, D: Diaclasa, Cx: Cinematica, Nx: Normal, Ix: Inversa, Dx: Dextral, Sx: Sinestral

Datos utilizado para la interpretación cinematica de fallas

ALBUM DE FOTOS



1. **Coordenadas:** N9212166, E762781; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** Rocas calizas del Grupo Pulluicana; **Ubicación en informe:** Foto 3.1.



2. **Coordenadas:** N9212910, E760283; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** Rocas calizas nodulares del Grupo Quilquiñán, Mujarrún; **Ubicación en informe:** Foto 3.2.



3. **Coordenadas:** N9212289, E760037; **Orientación:** SE–NW; **Descripción:** Rocas calizas de la Fm. Cajamarca **Ubicación en informe:** Foto 3.3.



4. **Coordenadas:** N9211319, E762964; **Orientación:** SE–NW; **Descripción:** Vista del contacto entre la Fm. Cajamarca y Fm. Porculla **Ubicación en informe:** Foto 3.4.



5. **Coordenadas:** N9210418, E763727; **Orientación:** SW–NE; **Descripción:** Vista del Stock Diorítico; **Ubicación en informe:** Foto 3.5a.



6. **Coordenadas:** N9211075, E761899; **Orientación:** SE–NW; **Descripción:** Afloramiento de brecha hidrotermal; **Ubicación en informe:** Foto 3.5b.



7. **Coordenadas:** N9212653, E758811; **Orientación:** NE–SW; **Descripción:** Sinclinal de Lullapuquio; **Ubicación en informe:** Foto 3.6.



8. **Coordenadas:** N9211878, E760994; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** Vista de monoclinal; **Ubicación en informe:** Foto 3.7.



9. Coordenadas: N9212910, E760283; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** Rocas calizas nodulares del Grupo Quilquiñán, Mujarrún; **Ubicación en informe:** Foto 3.8a.



10. Coordenadas: N9212138, E761567; **Orientación:** SW–NE; **Descripción:** Rocas calizas de la Fm. Cajamarca; **Ubicación en informe:** Foto 3.8b.



11. Coordenadas: N9211504, E763854; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** Vista de cizalla en venas en echelon de calcita; **Ubicación en informe:** Foto 3.9a.



12. Coordenadas: N9209962, E763559; **Orientación:** SW–NE; **Descripción:** venas en Stockwork; **Ubicación en informe:** Foto 3.9b.



13. Coordenadas: N9211846, E760493; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** estilolitos y venas de calcita; **Ubicación en informe:** Foto 3.10a.



14. Coordenadas: N9211776, E761090; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** intersección de estilolitos y venas de calcita; **Ubicación en informe:** Foto 3.10b.



15. Coordenadas: N9211504, E763854; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** Plano de falla con fibras recristalizadas de calcita; **Ubicación en informe:** Foto 3.11a.



16. Coordenadas: N9211706, E761239; **Orientación:** NE–SW; **Descripción:** Plano de falla con escalones; **Ubicación en informe:** Foto 3.11b.



17. Coordenadas: N9211541, E762103; **Orientación:** SW–NE; **Descripción:** Vista de falla inversa que provoca un monoclinal; **Ubicación en informe:** Foto 3.12.



18. Coordenadas: N9212245, E762582; **Orientación:** SE–NW; **Descripción:** Vista de fallas que forman horst y graben; **Ubicación en informe:** Foto 3.13.



19. Coordenadas: N9212768, E761546; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** Plano de falla con fibras recristalizadas.



20. Coordenadas: N9210846, E763254; **Orientación:** SW–NE; **Descripción:** Venas de calcita; **Ubicación en informe:** Figura 3.10b.



21. Coordenadas: N9210934, E763343; **Orientación:** NW–SE; **Descripción:** Vista de eje del sinclinal de Lullapuquio, en la Fm. Cajamarca, situada al SW del área de investigación.



22. Coordenadas: N9210815, E763808; **Orientación:** NE–SW; **Descripción:** Vista de fallas de rumbo en el flanco SW del sinclinal de Lullapuquio, en la Fm. Cajamarca, situada al SW del área de investigación.



23. Coordenadas: N9210307, E763230; **Orientación:** SW–NE; **Descripción:** Vista de valle en el flanco SW del sinclinal de Lullapuquio, formado por fallas normales de una etapa transtensiva.



24. Coordenadas: N9209993, E75861588; **Orientación:** SW–NE; **Descripción:** Vista de roca intrusiva alterada de textura obliterada con venillas de sulfuros (pirita), venilla tipo D correspondiente a una etapa hidrotermal. Indicador que hubo posibles pórfidos en el anticlinal Chetilla.



25. Coordenadas: N9210736, E763230; **Orientación:** SW–NE; **Descripción:** Vista de rocas del stock diorítico.