

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



TESIS PROFESIONAL

**DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS PRINCIPALES MEDIANTE
PROYECCIONES ESTEREOGRÁFICAS, NIVEL 2670 MINERA AURÍFERA
RETAMAS – MARSAS, LA LIBERTAD.**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

Presentado por:

Bach. WILFREDO ELIAS QUISPE BARRENO

Asesor:

ING. VICTOR AUSBERTO ARAPA VILCA

CAJAMARCA -PERÚ

2018

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la vida, su amor, comprensión, protección y guiarme en todo momento.

A mis padres Demetrio Quispe Reyes y Paula Barreno Valderrama, por ser el pilar más importante en mi vida, demostrarme apoyo incondicional; enseñándome a no desfallecer ni rendirme ante nada.

A mis hermanos y demás familiares por brindarme su apoyo en todo momento de mi formación profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Alma Máter, Universidad Nacional de Cajamarca – Facultad de Ingeniería - Escuela Académica Profesional de Ingeniería Geológica, a mis docentes por compartir sus conocimientos y experiencia; por brindarme su apoyo incondicional y la oportunidad de alcanzar una meta más en mi vida profesional.

Hago un reconocimiento de sinceridad y gratitud a el Ing. Miguel Monago Alvarez, Jefe del área de geomecánica Minera Aurífera Retamas – Marsa.; Ing. Victor Arapa Vilca, Asesor de Tesis y Docente de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Geológica – UNC. A los Ingenieros Crispín Zenón Quispe Mamani y Pedro Martin Maguiña Rodríguez; por los conocimientos impartidos, apoyo incondicional tanto en campo y gabinete durante todo el proceso de esta investigación.

Finalmente a todas aquellas personas, que de una u otra manera, contribuyeron para hacer realidad esta investigación.

ÍNDICE

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FOTOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Antecedentes teóricos	3
2.2. Bases teóricas.....	4
2.2.1. La proyección estereográfica.....	4
2.2.2. Orientación, proyección de planos y líneas en el espacio	11
2.2.3. Línea orientada mediante dirección y cabeceo sobre un plano conocido.....	12
2.2.4. Fallas.....	14
2.2.5. Cálculo de las direcciones principales de esfuerzos en sistemas de fallas conjugadas	15
2.3. Definición de términos básicos.....	23
CAPÍTULO III	24
MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1. Ubicación de la Investigación.....	24
3.1.1. Ubicación Geográfica	24
3.1.2. Ubicación Política	24
3.1.3. Accesibilidad	26
3.1.4. Geomorfología.....	26
3.1.5. Geología regional	27
3.1.6. Geología local.....	28
3.1.7. Estratigrafía	31
3.1.8. Geología estructural.....	35
3.1.9. Geología económica	39

	Pág.
3.2. Metodología de la Investigación.....	39
3.2.1. Tipo y Método de Investigación.....	39
3.2.2. Población de Estudio	39
3.2.3. Muestra.....	39
3.2.4. Unidad de Análisis	39
3.2.5. Definición de Variables	39
3.3. Procedimiento y Técnicas de recolección de datos.	39
3.3.1. Trabajo de campo	40
3.3.2. Trabajo de gabinete	40
3.3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	40
3.4. Procesamiento de datos.....	40
3.4.1. Metodología de los diedros rectos	40
3.4.2. Manejo Tectónico de Estereograma	42
3.4.3. Software Faultkin	45
CAPÍTULO IV	47
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	47
4.1. Modelo estructural	47
4.1.1. Pre - mineralización.....	47
4.1.2. Sin – mineralización	48
4.1.3. Post – mineralización	49
4.2. Análisis de fallas mediante Proyección estereográficas (Software FaultKin).....	50
4.2.1. Falla española.	51
4.2.2. Falla Patrick-1	53
4.2.3. Falla chilcas	55
4.2.4. Falla los loros	57
4.2.5. Falla EW 2	59
4.2.6. Falla NW2	61
4.2.7. Análisis conjunto de todas las fallas.....	63
4.3. Contrastación de la hipótesis	64
CAPÍTULO V	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1. CONCLUSIONES.....	66
5.2. RECOMENDACIONES.....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Definición de las variables de la investigación	39
Tabla 2. Resultados obtenidos de la Falla Española en el Software FaultKin	52
Tabla 3. Resultados obtenidos de la Falla Patrick-1 en el Software FaultKin	54
Tabla 4. Resultados obtenidos de la Falla Chilcas en el Software FaultKin	56
Tabla 5. Resultados obtenidos de la Falla los Loros en el Software FaultKin.	58
Tabla 6. Resultados obtenidos de la Falla los EW 2 en el Software FaultKin.	60
Tabla 7. Resultados obtenidos de la Falla los NW 2 en el Software FaultKin.....	62
Tabla 8. Resultados obtenidos de todas las fallas en el Software FaultKin	64
Tabla 9. Ejes de acortamiento y estiramiento estimados para las fallas analizadas (T: Inversa; N: Normal; R: Dextral; L: Sinistral).....	65

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1. Valle en U.	26
Foto 2. Afloramiento de cuarcitas en bancos en la confluencia de las quebradas Mush Mush y Laguna Blanca.....	29
Foto 3. A) Metapelitas en grado metamórfico bajo y B) Intrusivo granodiorítico moderadamente fracturado.	29
Foto 4. Quebrada de la Laguna Blanca con afloramientos de cuarcitas (Formación Contaya), a las cuales sobreyace una secuencia volcánica andesítica (Formación Lavasen) 30	
Foto 5. Afloramientos de la Formación Lavasen sobreyaciendo a Formación Contaya. ...	30
Foto 6. Quebrada y cerro Balcones con afloramientos del batolito Pataz.....	31
Foto 7. Cima del cerro Cabana Alta. Intrusivo granodiorítico del batolito de Pataz.....	31
Foto 8. A) Perfil de los depósitos fluvioglaciares B) Depósitos fluvioglaciares (gravas y arenas).	34
Foto 9. A) Depósitos coluviales. B) Depósitos aluviales y fluviales	35
Foto 10. Afloramientos del batolito de Pataz A) Granodiorita y B) Granito.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proyección de una línea y un plano en el hemisferio inferior de la esfera (Babin, 2010, pág. 3)	5
Figura 2. Proyecciones polar y oblicua (Babin, 2010, pág. 4)	6
Figura 3. Plano en tres dimensiones, orientado mediante dirección y buzamiento. (Babin, 2010, pág. 6)	6
Figura 4. Proyección esférica del plano, en el hemisferio inferior de la esfera. (Babin, 2010, pág. 6)	7
Figura 5. Estereograma del plano (Babin, 2010, pág. 6).....	7
Figura 6. Falsilla de proyección estereográfica (Falsilla de Wulff) o estereoneta. Conserva los ángulos (Babin, 2010, pág. 7)	9
Figura 7. Falsilla de Wulff. (Babin, 2010, pág. 8).....	10
Figura 8. Falsilla de Schmidt. (Babin, 2010, pág. 8).....	10
Figura 9. Parámetros macroscópicos de la falla. (Structures, 2016)	12
Figura 10. Representación estereográfica de una línea, mediante su cabeceo en un plano conocido. (Babin, 2010, pág. 30)......	13
Figura 11. Medida de dirección, inmersión y cabeceo para dos líneas L y L' contenidas en dos planos de orientación conocida. (Babin, 2010, pág. 30).	13
Figura 12. Tipos de fallas translacionales.(Niemeyer,2016).....	15
Figura 13. Disposición de los ejes de esfuerzo en un sistema de fallas conjugadas. (Babin, 2010, pág. 131)	16
Figura 14. Modelo de deslizamiento de Reches para fallas conjugadas. (Babin, 2010, pág. 132)	17
Figura 15. Modelo de Anderson para fallas conjugadas con movimiento normal, inverso o en dirección. Bloque diagrama y estereograma resultante para cada tipo de falla. (Babin, 2010, pág. 134).....	19
Figura 16. Aplicación del Modelo de Anderson conocidas las orientaciones de los ejes de esfuerzo. (Babin, 2010, pág. 135)	20
Figura 17. Método de los diedros rectos para fallas conjugadas. Estereograma para la falla 1. (Babin, 2010, pág. 133).....	22
Figura 18. Método de los diedros rectos para fallas conjugadas. Estereograma para la falla 2. (Babin, 2010, pág. 133).....	22

	Pág.
Figura 19. Método de los diedros rectos para fallas conjugadas. Superposición de los estereogramas anteriores. (Babin, 2010, pág. 133).....	23
Figura 20. Ubicación Política del área de estudio.	25
Figura 21. Sección tipo del Yacimiento El Gigante donde se exhibe la distribución de vetas (rojo) y fallas (azul). (Dante, 2015)	38
Figura 22: Estructuras Extensionales (Vicente & Muñoz, 1992).....	41
Figura 23: Estructuras Comprensoras (Vicente & Muñoz, 1992).....	41
Figura 24: Datum de falla. (Vicente & Muñoz, 1992).	42
Figura 25: Manejo Tectónico de Estereograma (Alimendinfer, 1987)	43
Figura 26: Pasos para generar una Estereograma (Vank, 2004).....	45
Figura 27: Software Faultkin (Cardozo, 2012).....	46
Figura 28. A. Arquitectura tridimensional de un duplex extensional.....	48
Figura 29. Esquema de un horsetail o cola de caballo de una zona de falla sinistral, evidenciando el posible esquema de formación de las vetas AA y BB.	50
Figura 30. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos falla Española.	51
Figura 31. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla Española. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento	52
Figura 32. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla Patrick-1.....	53
Figura 33. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla Patrick-1. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento.	54
Figura 34. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla Chilcas	55
Figura 35. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla Chilcas. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento.	56
Figura 36: Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla Loros	57
Figura 37. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla los Loros. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento	58

	Pág.
Figura 38. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla EW 2.	59
Figura 39. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla EW 2. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento.	60
Figura 40. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla NW 2.	61
Figura 41. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla NW 2. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento	62
Figura 42: Plot estereográfico de todas las fallas analizadas.....	63
Figura 43. Plot estereográfico con la solución de la todas las fallas. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento.	64

Abreviaturas.

- $\sigma 1$: Sigma uno
- $\sigma 2$: Sigma dos
- $\sigma 3$: Sigma tres.
- EW2: Este Oeste dos
- NW: Norte oeste
- NNW: Nor nor oeste.
- SE: Sur este
- AA: Veta AA
- BB: Veta BB
- T: Inversa
- N: Normal
- R: Dextral
- L: Sinistral
- TR: Inversa Dextral
- TL: Inversa Sinistral
- PETS: Procedimiento escrito de trabajo seguro

RESUMEN

Minera Aurífera Retamas - Marsa, perteneciente al cinturón orogénico del Batolito de Patáz, dentro de la delimitación geográfica del departamento de la Libertad, los esfuerzos principales in situ son una parte necesaria para realizar el diseño de las labores subterráneas, la experiencia ha demostrado que la estabilidad de una excavación rocosa depende de la dirección de los esfuerzos de campo pre-existentes, existen métodos que permiten determinar los esfuerzos principales, en el nivel 2670 se realizó un análisis cinemático de 6 fallas principales, española, Patrick -1, chilcas, loros, EW 2 y NW 2 con la finalidad de determinar los esfuerzos principales mediante proyecciones estereográficas, para ello utilizando el software faultkin se calculó los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 . Los resultados revelan que las zonas de falla Española, Los Loros y NW2 forman una familia cuyo eje de acortamiento (sigma σ_1) es N 215° y cinemática inversa dextral, los ejes de acortamiento (sigma σ_1) y estiramiento (sigma σ_3) de las zonas de falla EW2 y Patrick se encuentran en los mismos cuadrantes, la dirección de acortamiento promedio es N 46° y estiramiento N 147°, con cinemática sinistral normal.

Se afirma que se relaciona prioritariamente a los esfuerzos principales constituidos por los fallamientos normales, inversas y de rumbo tienen direcciones NW – SE teniendo esfuerzos andinos, los cuales determinan el control estructural del nivel 2670.

Palabras claves: Geología estructural, análisis cinemático, esfuerzos principales, proyección estereográfica, software faultkin, plots estereográficos.

ABSTRACT

Minera Aurífera Retamas - Marsa, belonging to the orogenic belt of the Batolito de Patáz, within the geographical delimitation of the department of La Libertad, the main on-site efforts are a necessary part to carry out the design of the underground works, experience has shown that the stability of a rock excavation depends on the direction of the pre-existing field efforts, there are methods that allow to determine the main efforts, at level 2670 a kinematic analysis was made of 6 main faults, Spanish, Patrick -1, chilcas, parrots , EW 2 and NW 2 in order to determine the main stresses by means of stereographic projections, for this, using the faultkin software, the main stresses σ_1 , σ_2 and σ_3 were calculated. The results reveal that the Spanish fault zones, Los Loros and NW2 form a family whose axis of shortening (sigma σ_1) is N 215 ° and dextral inverse kinematics, the axes of shortening (sigma σ_1) and stretching (sigma σ_3) of fault zones EW2 and Patrick are in the same quadrants, the average shortening direction is N 46 ° and stretch N 147 °, with normal sinistral kinematics.

It is affirmed that it is related mainly to the main efforts constituted by the normal, inverse and heading failures have NW - SE directions having Andean efforts, which determine the structural control of the level 2670.

Keywords: Structural geology, kinematic analysis, main efforts, stereographic projection, faultkin software, stereographic plots

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista del diseño de minas subterráneas, se puede decir que el dimensionamiento de la infraestructura y excavaciones mineras es un aspecto clave para obtener buenas recuperaciones y minas seguras, tanto para el personal, como para los equipos y el negocio minero. Asociados a estos conceptos, los esfuerzos principales in situ son una parte necesaria para realizar el diseño de las labores mencionadas, debido a que son la condición inicial que presenta el material con el cual se está trabajando.

La experiencia ha demostrado que la estabilidad de una excavación rocosa depende de los esfuerzos de campo pre-existentes, de la forma, orientación, dimensiones de la excavación, estructura y calidad del macizo rocoso. Obviamente, estos conceptos indican claramente que la mecánica de rocas está relacionada a la línea principal de la mecánica clásica y a la mecánica continua, pero varios factores específicos la identifican como un campo de la ingeniería distinta y coherente.

La zona aurífera de Pataz, donde se encuentra el nivel 2670, se encuentra ligada a una faja de rocas intrusivas conocida como Batolito de Pataz (Carbonífero), que intruye a los esquistos, filitas, pizarras y rocas metavolcánicas del Complejo del Marañón (pre-Cámbrico). El principal control del emplazamiento del Batolito de Pataz es la zona de falla Huinchus la cual genera un marcado patrón de fracturamiento NNW a NW reconocido a nivel distrital. Las zonas de fallamiento y el fracturamiento pre-existentes dentro del intrusivo, han actuado como canales para la circulación de fluidos hidrotermales, generando vetas de oro, cuarzo y pirita.

La zona presenta una complicada historia de deformación resumidos en tres eventos: Pre-mineralización: caracterizado por la ocurrencia de zonas de fallas NNW con manteo al E la cual desarrollo fallas de segundo o tercer orden (NW) que generaron arquitectura tipo dúplex. Syn-mineralización: se desarrolló bajo un desplazamiento oblicuo inverso dextral y luego inverso tardío, con zonas de fallas EW. Postmineral: dominado por desplazamiento de rumbo (dextral) y una componente normal que reactivó las fallas EW para provocar el desmembramiento de las vetas.

El marcado control estructural es una reconocida problemática para las labores de exploración y producción en los yacimientos localizados en el Batolito de Pataz. Particularmente, además, se revisaron planos geológicos, data existente o cualquier otra información encontrada respecto al nivel 2670, ya que se tiene como objetivo determinar los esfuerzos principales mediante el análisis de proyecciones estereográficas, teniendo en cuenta que los esfuerzos principales se determinan utilizando el software faultkin se calculó los esfuerzos principales σ_1 , σ_2 y σ_3 y esto se relaciona prioritariamente a los esfuerzos principales constituidos por los fallamientos normales, inversas y de rumbo tienen direcciones NW – SE teniendo esfuerzos andinos, los cuales determinan el control estructural y mineralógico en el nivel 2670.

Dada que la magnitud de la mina la investigación pretende determinar los esfuerzos principales mediante proyecciones estereográficas, Nivel 2670 Minera Aurífera Retamas – Marsa, La Libertad, que servirá como base para el diseño de labores subterráneas

Capítulo II, contiene el marco teórico (antecedentes) y bases teóricas (marco referencial) en los que se fundamenta la presente investigación.

Capítulo III, contiene los materiales y métodos, que señala la ubicación geográfica del área de investigación, geomorfología, hidrología, marco geológico, así como el procedimiento para general las falsillas con el software y se describe el manejo de los datos generados.

Capítulo IV, contiene el Análisis y discusión de resultados, en este capítulo se presenta el análisis del modelo estructural y el análisis de las 06 fallas mediante falsillas.

Capítulo V, contiene las Conclusiones y recomendaciones., que a partir de los resultados que se presentan en los capítulos anteriores se realizan una interpretación conclusiones sobre la integración de los resultados y de discusiones. Finalmente, se provee en este capítulo las principales conclusiones del trabajo de tesis, así como las recomendaciones necesarias

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

Galarce, (2014), Modelo de esfuerzos in-situ para Chile y su incidencia en el diseño minero subterráneo, estudio los esfuerzos in situ, aquellos que son intrínsecos del macizo rocoso y se dividen en esfuerzo tectónico y gravitacional, estos son una de las condiciones iniciales más importantes para estimar las sollicitaciones que pueden desarrollarse en una obra de ingeniería de rocas, el buen conocimiento permite diseñar adecuadamente las labores mineras, obteniendo así excavaciones estables y más seguras.

Bongiorno et al., (2011), Determinación de la dirección de los esfuerzos principales a través de análisis numérico y proyecciones estereográficas de la falla de Boconó en el sector Yacambú Estado Lara - Venezuela, pone énfasis en la utilización de estos dos metodos, ha determinado que los esfuerzos principales mayor y menor son perpendiculares entre si, esto se puede corroborar por la direcciones geográficas calculadas N 70° O y N 20° E, este resultado corresponde con lo indicado por los diagramas de Anderson para las fallas transcurrentes.

Piraquive, (2011) Modelamiento Estructural basado en un Análisis de Deformaciones en el frente del piedemonte llanero Cordillera Oriental de Colombia (segmento comprendido entre sabanalarga y aguazul), plantea un establecimiento de un modelo cinemático geológico para la evolución estructural permite construir con precisión la geometría principal de los pliegues, la evaluación de las deformaciones basada en un análisis de estructuras a pequeña escala relacionadas con los elementos estructurales mayores.

Centeno, (2017), Geometría y distribución de esfuerzos en el borde oriental de la región central del Perú-nido de pucallpa, describe el contexto geodinámico y geomorfológico del Perú considerando sus principales rasgos tectónicos responsables de la geomorfología y las unidades estructurales que son responsables de la actual geodinámica superficial, desarrolla conceptos básicos sobre la distribución de esfuerzos y discute las características generales

de la sismicidad histórica e instrumental del Perú, así como su distribución espacial de la sismicidad, además de la geometría de la placa de Nazca.

Pozo, (2014), Análisis Numérico del mecanismo de falla en macizos rocosos fracturados considerando el efecto escala, muestra que la aplicación del Método de Elementos Finitos, con la representación explícita de las discontinuidades (denominado J-MEF), también se compara el factor de seguridad obtenido por métodos convencionales de Equilibrio Límite y por el Método de Elementos Finitos y aplicando la metodología de la proyección estereográfica, se diseñan los taludes de un tajo abierto, para posteriormente analizar numéricamente la influencia del efecto escala considerando varias fases de excavación mediante el método J-MEF.

Muñoz, (2010), Análisis de esfuerzos tectónicos: Fallas y sismos. estudio del estado de esfuerzos tectónicos (activos o paleoesfuerzos), a partir del análisis de fallas desde las distintas ideas complementarias que aportan estas disciplinas.

Coba, (2017), Modelo geométrico y características estructurales del sistema de vetas de alto ángulo al norte del Batolito de Pataz Mina Poderosa, La Libertad – Perú estudio el modelo estructural que origino, controló y afecto al yacimiento determinando que está relacionado a un esfuerzo extensional, producto de la reactivación de estructuras con orientación principal originando vetas de textura brechada, alteración gradacional y mineralización en parches y bandas de sulfuros.

Herrera, (2016), Modelo Estructural y Consideraciones Metalogenéticas del Yacimiento El Gigante, Provincia de la Libertad, Perú, estudio que trata de generar un modelo estructural de las vetas y zonas de deformación frágil que contribuya a la predicción de la dirección de desplazamiento de las zonas mineralizadas, considerando la caracterización y cinemática de las zonas de fallas; clasificación y aspectos texturales de las vetas. niveles y el modelo tridimensional, se logró reconstruir la evolución estructural del yacimiento.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. La proyección estereográfica

Proporciona una herramienta fundamental en el campo de la ingeniería geológica. Su principal interés estriba en el hecho de que con ella podemos representar orientaciones (dirección) e inclinación (buzamiento o inmersión) preferentes de elementos que en la naturaleza no se presentan con desarrollos geométricos perfectos, como es el caso de un

estrato, donde el plano de techo y de muro presentan irregularidades puntuales, aunque con una tendencia general. Además, este tipo de representación permite medir los ángulos de forma directa. (Philips, 1971)

Una superficie esférica en la cual las posiciones de los elementos característicos están indicadas, se denomina proyección esférica, siempre teniendo en cuenta que se representan orientaciones, no distancias entre los elementos proyectados. (Babin, 2010)

Las proyecciones esféricas se utilizan para representar orientaciones de líneas y/o planos, siempre que la línea o el plano pase a través del centro de la esfera. En ese caso, una línea intersecta a la superficie de la esfera en dos puntos diametralmente opuestos, mientras que la intersección de un plano con la esfera será un círculo mayor. La intersección de la línea o el plano con la esfera es su proyección esférica. (Babin, 2010)

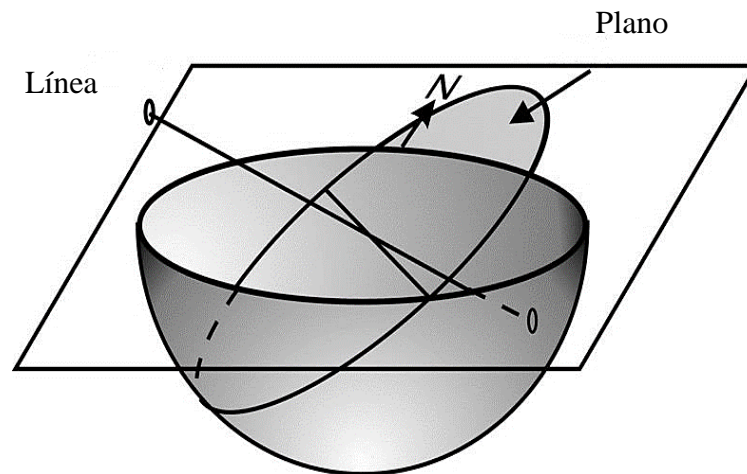


Figura 1. Proyección de una línea y un plano en el hemisferio inferior de la esfera (Babin, 2010, pág. 3)

Una proyección de este tipo, representa el elemento proyectado en tres dimensiones. Afortunadamente, una esfera puede ser proyectada en un plano bidimensional. Las proyecciones planares más comunes de una esfera se denominan proyecciones azimutales, que se construyen haciendo pasar las líneas de proyección desde un punto común hasta la esfera, intersectando el plano de proyección. Este puede ser tangente a la superficie de la esfera, estar a una determinada distancia de ella o pasar a través del centro de la esfera. Un cambio en la posición del plano de proyección, da lugar a un cambio de escala en la proyección. El plano de proyección puede tener cualquier orientación, y esto determina que la proyección sea ecuatorial, polar u oblicua. (Babin, 2010)

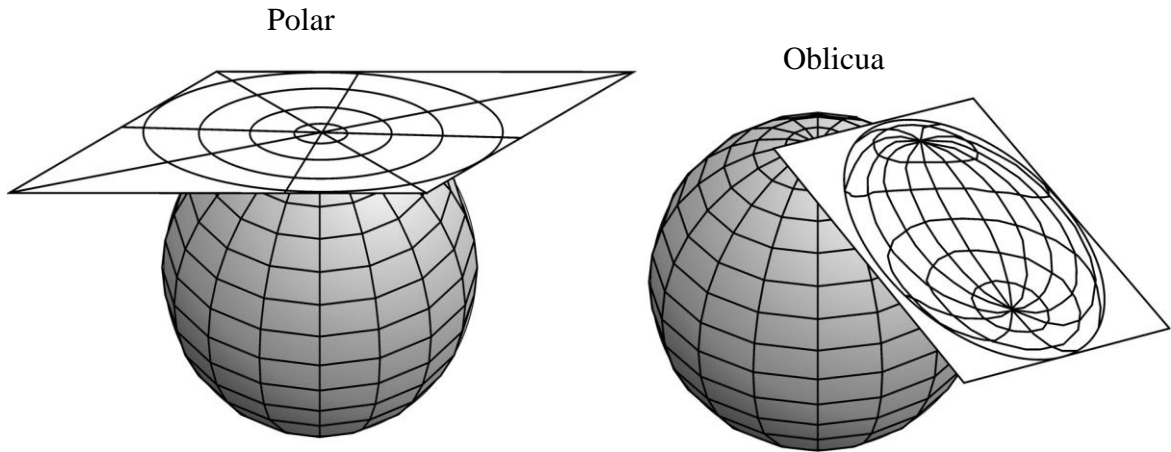


Figura 2. Proyecciones polar y oblicua (Babin, 2010, pág. 4)

La proyección estereográfica es un caso especial de proyección azimutal, que en su principio fue desarrollada por los cristalógrafos. Su característica principal es que el punto fuente usado en su construcción está situado en la superficie de la esfera. En geología, el plano de proyección usado para construir la proyección estereográfica pasa por el centro de la esfera, y se corresponde con su plano ecuatorial. (Babin, 2010)

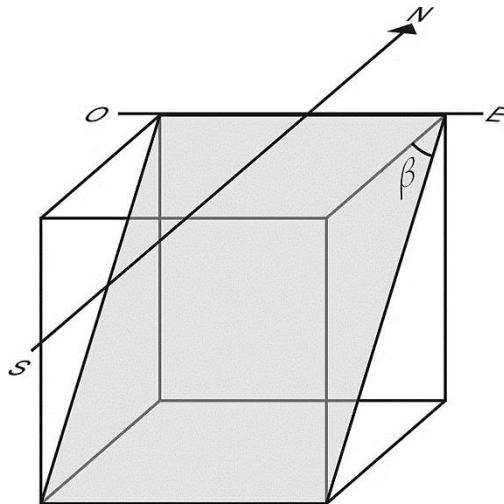


Figura 3. Plano en tres dimensiones, orientado mediante dirección y buzamiento. (Babin, 2010, pág. 6)

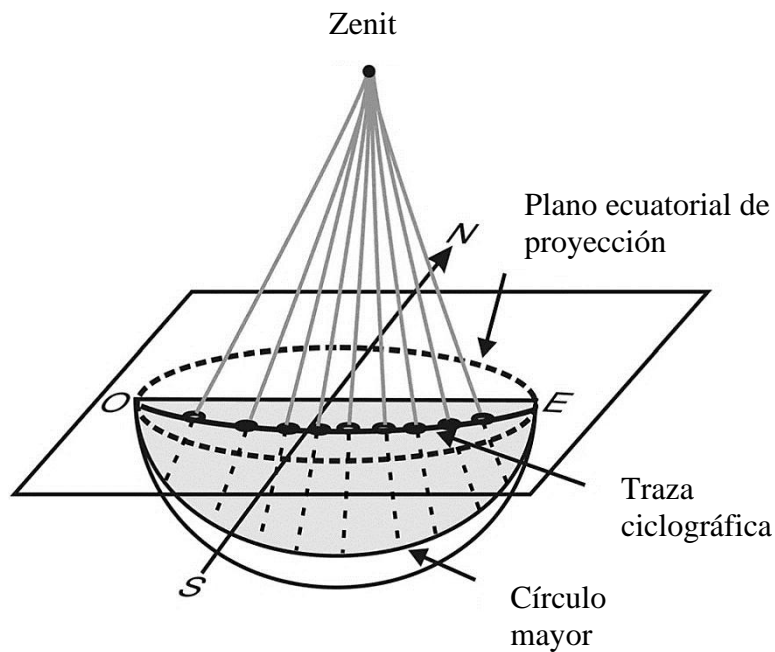


Figura 4. Proyección esférica del plano, en el hemisferio inferior de la esfera. (Babin, 2010, pág. 6)

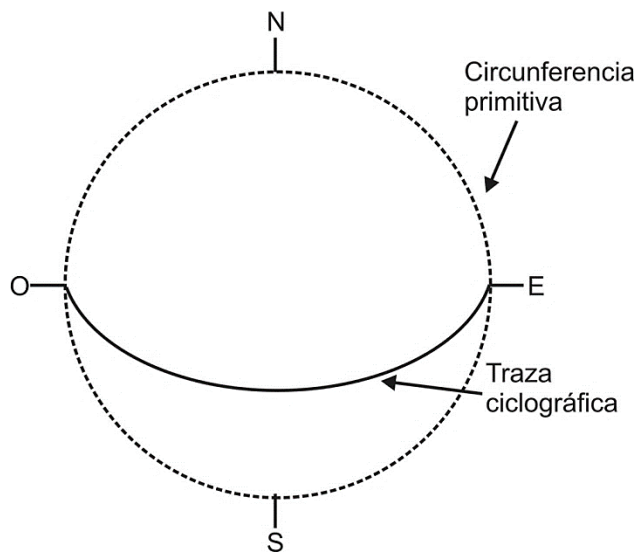


Figura 5. Estereograma del plano (Babin, 2010, pág. 6)

Vamos a visualizar la construcción de una proyección estereográfica (Figura 3). Imaginemos un punto marcado en el hemisferio inferior de nuestra esfera de cristal, que representa la proyección esférica de un punto en el espacio. La proyección estereográfica de este punto se construye dibujando una línea de proyección que conecte el punto situado en el hemisferio inferior, con el zenit de la esfera colocado en la parte superior de la misma. La intersección

de la línea de proyección con el plano ecuatorial (plano de proyección) de la esfera, es la proyección estereográfica de ese punto

En Geología Estructural siempre proyectamos desde el hemisferio inferior de la esfera y el elemento representado (línea o plano) pasa por el centro de la esfera de referencia, mientras que en Cristalografía se utiliza el hemisferio superior. Los planos intersectan el hemisferio inferior como círculos mayores, y las líneas, como puntos. Cada punto de un círculo mayor en el hemisferio inferior, unido con el zenit, da a su vez un punto en el círculo ecuatorial de proyección. La unión de todos estos puntos muestra la proyección estereográfica (estereograma) del plano que pasa por el centro de la esfera y que corresponde a un círculo mayor. Hemos reducido una geometría tridimensional a dos dimensiones.

La intersección del plano ecuatorial (plano de proyección) con la esfera, se denomina “circunferencia primitiva”, mas abreviado, la primitiva. Tiene el mismo radio que la esfera de proyección original y todos los puntos en la superficie del hemisferio inferior quedan proyectados como puntos en o dentro de la primitiva.

La proyección estereográfica es una de las mejores técnicas para resolver problemas geométricos en Geología Estructural. Se diferencia de la proyección ortográfica en un punto fundamental: ésta preserva las relaciones espaciales entre las estructuras, mientras que la estereográfica trabaja con planos y líneas sin tener en cuenta sus relaciones espaciales, únicamente las angulares.

En la práctica, la proyección estereográfica de líneas y planos se lleva a cabo con ayuda de una falsilla de proyección (stereographic net). Esta falsilla o estereoneta está formada por un conjunto de proyecciones de círculos mayores y menores que ocupan el plano ecuatorial de proyección de la esfera de referencia. Ambos conjuntos de círculos están espaciados con intervalos de 2° , apareciendo marcados con un trazo más grueso los que corresponden a valores múltiplos de 10. (Babin, 2010)

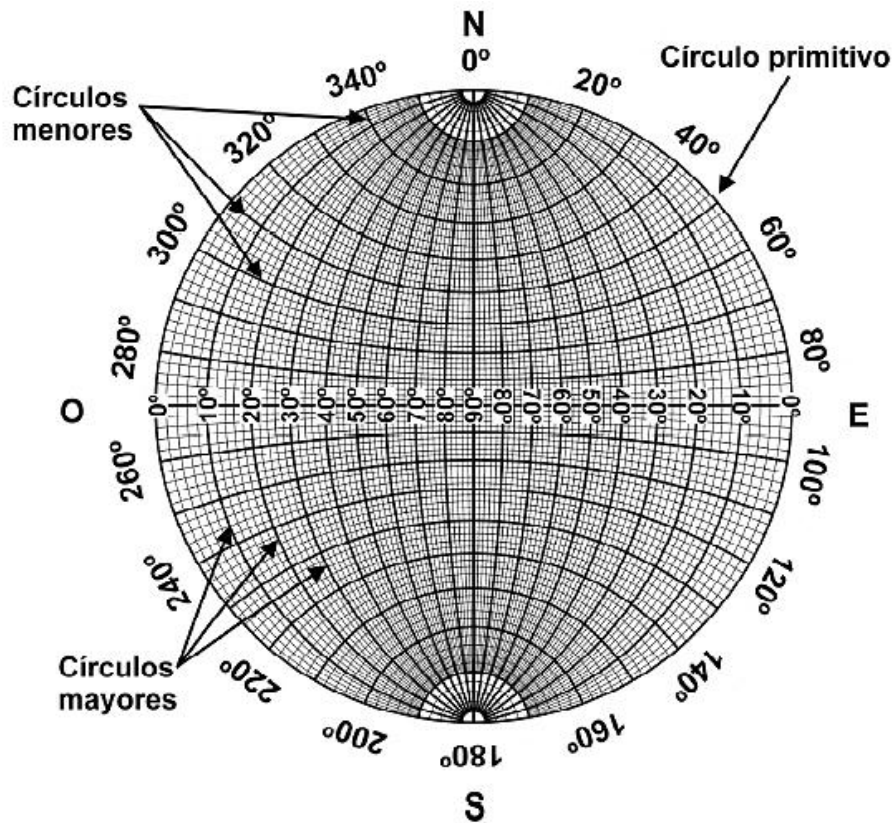


Figura 6. Falsilla de proyección estereográfica (Falsilla de Wulff) o estereoneta. Conserva los ángulos (Babin, 2010, pág. 7)

Los círculos mayores representan una familia de planos con dirección norte-sur, cuyos buzamientos varían desde 0° a 90° en ambos sentidos. Estos planos se cortan según una línea horizontal representada por el norte o el sur de la falsilla. Los círculos menores son aquellos a través de los cuales medimos las direcciones de los distintos planos y líneas en la proyección. También se utilizan para hacer rotaciones de distintos elementos estructurales alrededor de ejes horizontales, verticales o inclinados. Representan la proyección sobre el plano ecuatorial de un conjunto de planos que no pasan por el centro de la esfera, espaciados de 2° en 2° .

Cada círculo menor corresponde al corte de una superficie cónica con la esfera, cuyo ápice está situado en el centro de la esfera y su altura coincide con el radio de la falsilla. La combinación de círculos mayores y menores constituye un ábaco perfectamente apto para la proyección estereográfica de líneas y planos. Existen dos tipos distintos de estereoneta: la falsilla de Wulff y la de Schmidt (Figura 7 y Figura 8). La primera conserva ángulos, como se explicará a continuación, mientras que la segunda conserva áreas y por tanto, se utiliza

para realizar contajes estadísticos de elementos (planos de falla, ejes de cuarzo, lineaciones).
(Babin, 2010)

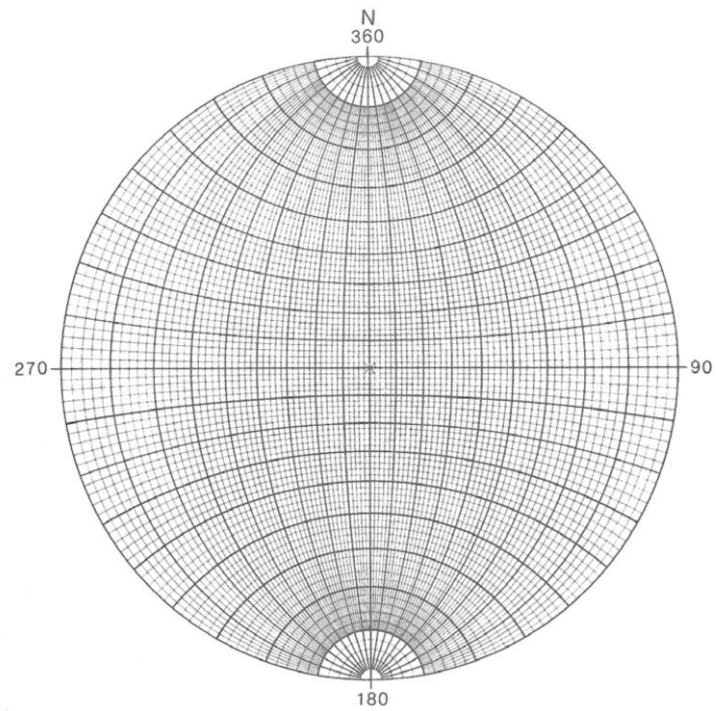


Figura 7. Falsilla de Wulff. (Babin, 2010, pág. 8)

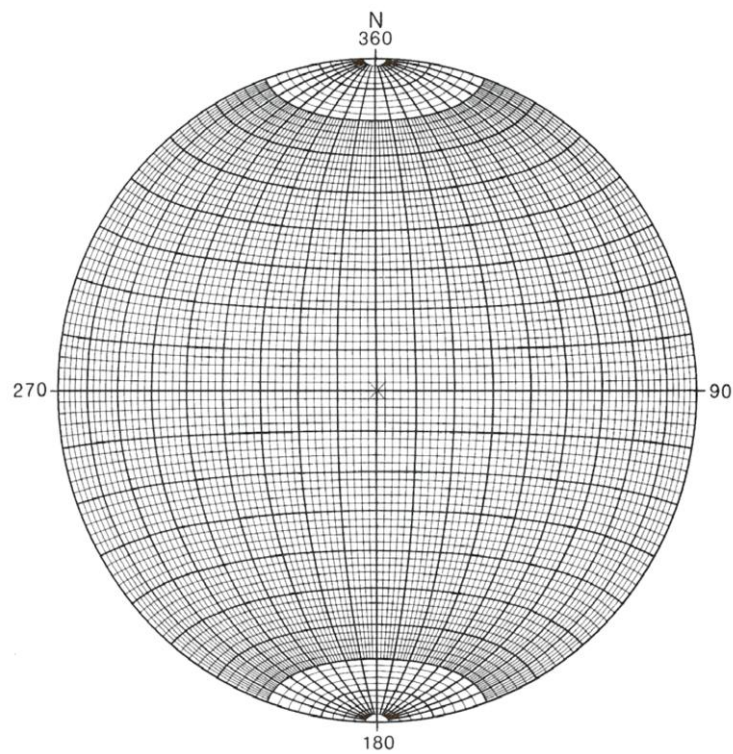


Figura 8. Falsilla de Schmidt. (Babin, 2010, pág. 8)

2.2.2. Orientación, proyección de planos y líneas en el espacio

Las estructuras geológicas que observamos en los afloramientos (fallas, pliegues, discordancias) pueden ser consideradas en dos dimensiones como planos o estructuras planares. La orientación de cualquiera de estos planos en el espacio se realiza con ayuda de una brújula que mide la dirección del plano en la horizontal y con respecto al norte, y el buzamiento en el plano vertical perpendicular a la dirección.

Para orientar perfectamente el plano, por tanto, es necesario medir ambos ángulos, dirección buzamiento Otra posibilidad para definir este mismo plano en el espacio, es medir su ángulo de buzamiento y el sentido de buzamiento del mismo con respecto al norte, o sea, la orientación de la línea perpendicular a la línea de dirección. Nuevamente es necesario conocer los dos ángulos para saber exactamente la orientación del plano. (Babin, 2010)

a) Dirección del plano

Una línea horizontal inscrita en el plano recibe el nombre de línea de dirección y corresponde a la intersección entre el plano y un plano horizontal imaginario. El ángulo de dirección del plano corresponde al ángulo formado entre esta línea horizontal y el norte geográfico. En el afloramiento se mide con la brújula y generalmente se representa con la letra griega ϕ . (David, 2010)

b) Buzamiento real del plano

Se define como el ángulo que forma este plano con la horizontal, medido según la línea de máxima pendiente del plano, por tanto, medido en el plano vertical que es perpendicular a la línea de dirección del plano (Figura 9). Se representa con la letra β . Para que el valor de este ángulo sea correcto, es necesario especificar su sentido: 34°S, 45°E, 82°N, ya que cualquier plano con una dirección dada puede buzarse en dos sentidos opuestos. Por ejemplo, un plano con dirección 000°, puede buzarse al este o al oeste, por tanto, hay que especificar el sentido de buzamiento. (Richard, 2004)

c) Sentido de buzamiento (Dirección de buzamiento)

Es el ángulo que forma la proyección en la horizontal de la línea de máxima pendiente del plano con el norte geográfico. Por tanto, su valor angular está situado a 90° del valor angular correspondiente a la dirección del plano, se representa con las letras α . (Richard, 2004)

d) Inmersión (plunge).

Es el ángulo que forma la línea con su proyección en la horizontal, medido en el plano vertical que contiene a la línea y a su proyección, se representa con la letra. (Richard, 2004)

e) Cabeceo λ (pitch, rake)

Muchas estructuras lineares se desarrollan dentro de planos estructurales. En el caso de que una línea esté contenida en un plano inclinado, el cabeceo es el ángulo, entre la línea y la dirección del plano inclinado que la contiene, medido en este plano inclinado. Se representa con la letra λ . (Structures, 2016)

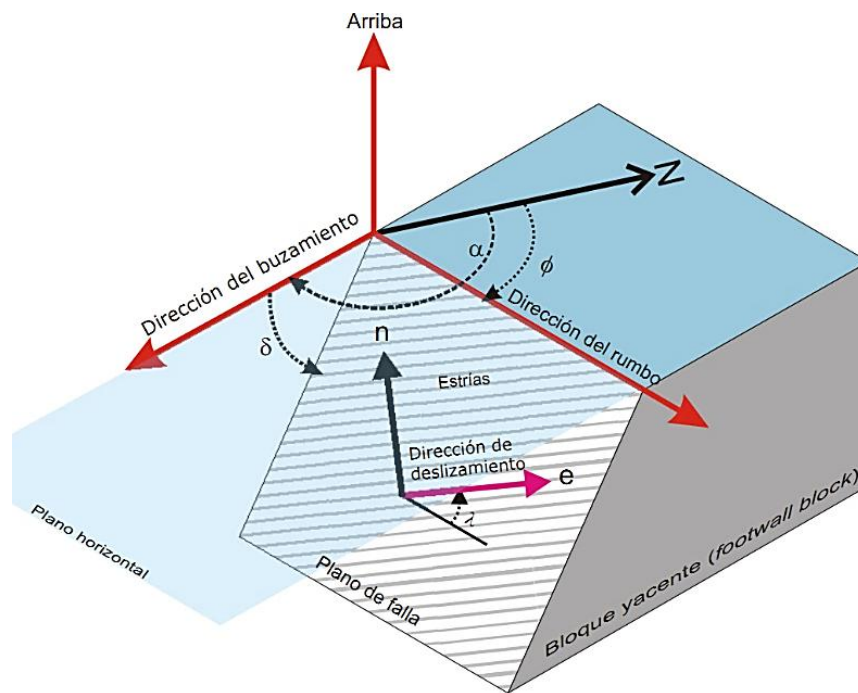


Figura 9. Parámetros macroscópicos de la falla. (Structures, 2016)

2.2.3. Línea orientada mediante dirección y cabeceo sobre un plano conocido.

En este caso el dato que hemos obtenido en el campo se refiere, por ejemplo, a la orientación de un plano de falla y el cabeceo de una familia de estrías que aparecen en este plano. El plano de falla está orientado N40°E – 20°SE y la estría tiene un cabeceo de 45°S medido en este plano (figura 10).

Para representar el estereograma correspondiente, el proceso es como sigue:

- Dibujar sobre el transparente el círculo mayor que representa el plano medido, como ya se ha indicado anteriormente.
- Dentro de este círculo mayor, está la línea representada por su cabeceo. Si el cabeceo es el ángulo entre la línea y la dirección del plano inclinado que la contiene, solo tenemos

que medir el ángulo de 45° en el plano (círculo mayor) colocado sobre un círculo mayor de la falsilla, desde el sur, contando con ayuda de los círculos menores.

- Este punto, situado sobre el estereograma del plano de falla, representa la orientación de la estría.

De la misma manera, podemos resolver el problema inverso. En el estereograma de la figura 14 se han representado dos planos $N40^\circ E - 30^\circ NO$ y $116^\circ - 50^\circ S$, ambos con una línea inscrita, L y L' respectivamente. ¿Cuál será el valor del ángulo de cabeceo para cada una de las líneas? (Babin, 2010)

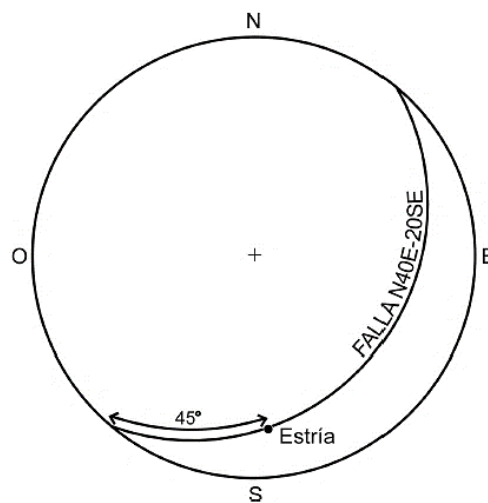


Figura 10. Representación estereográfica de una línea, mediante su cabeceo en un plano conocido. (Babin, 2010, pág. 30).

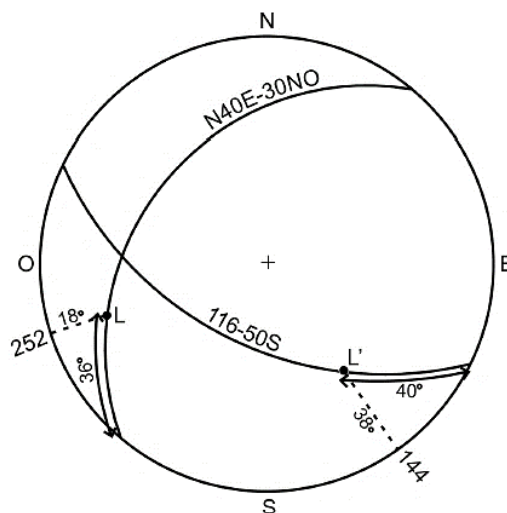


Figura 11. Medida de dirección, inmersión y cabeceo para dos líneas L y L' contenidas en dos planos de orientación conocida. (Babin, 2010, pág. 30).

Colocamos uno de los planos coincidiendo con un círculo mayor de la falsilla. Contando desde el norte o desde el sur a partir de los círculos menores, sabremos cual es el ángulo de cabeceo de esa línea medido sobre ese plano. A continuación del valor, colocamos su sentido, que corresponderá al cuadrante donde esté situada la línea. Al mismo tiempo, podemos medir su dirección e inmersión, como se ha explicado en el problema anterior.

Los resultados son los siguientes:

L: cabeceo. 36°S; dirección. 252°; inmersión. 18° 252°/18°

L': cabeceo. 40°E; dirección. 144°; inmersión. 38° 144°/38°

El mismo proceso se seguirá para cualquiera de las líneas del estereograma.

2.2.4. Fallas

Es una fractura planar a lo largo de la cual la roca se ha desplazado según una dirección que es generalmente paralela al plano de ruptura, como consecuencia de la aplicación de un stress de cizalle. (Niemeyer, 2016)

2.2.4.1. Clasificación de fallas

La clasificación más útil de las fallas en el dominio frágil es aquella basada en su desplazamiento o rechazo. Se distinguen fallas translacionales y fallas rotacionales. En las primeras la magnitud y orientación del rechazo es el mismo en todas sus partes, y en las segundas, el rechazo cambia según la porción del plano que se considere.

2.2.4.2. Tipos de fallas translacionales

Las fallas translacionales se clasifican, de acuerdo a su rechazo, en cuatro tipos principales: fallas normales, fallas inversas, fallas de rumbo y fallas con rechazo oblicuo (figura 12). Las fallas con rechazo oblicuo presentan movimiento compuesto, con componente según el manto y según el rumbo. (Niemeyer, 2016)

Si el rake es menor que 45° predominará la componente transcurrente y la falla será:

- Dextral- normal o dextral- inversa.
- Sinistral- normal o sinistral- inversa.

Si el rake de la estría es mayor que 45° predominará la componente en el manto y la falla pasa a denominarse:

- Normal-dextral o normal-sinistral.
- Inversa-dextral o inversa- sinistral.

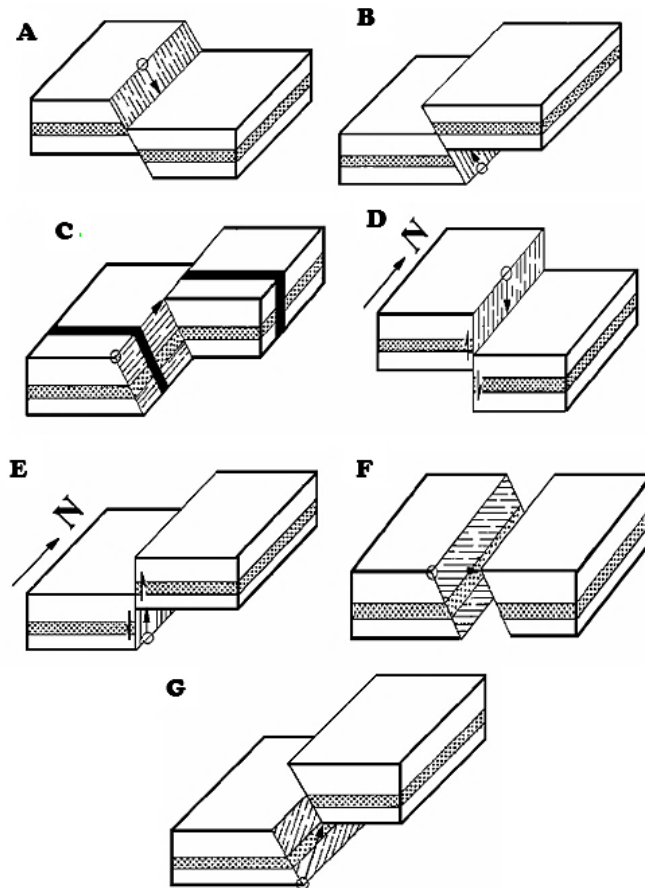


Figura 12. Tipos de fallas translacionales.(Niemeyer,2016)

En la figura 12, A. Falla normal. B. Falla inversa. C. Falla de rumbo. D. Falla vertical, baja bloque oriental. E. Falla vertical, baja bloque occidental. F. Falla con rechazo oblicuo, sinestral normal. G. Falla con rechazo oblicuo, sinestral inverso.

2.2.5. Cálculo de las direcciones principales de esfuerzos en sistemas de fallas conjugadas

Se entiende por fallas conjugadas aquellas fallas contemporáneas que se han formado en condiciones de esfuerzos similares. Estas fallas se disponen de forma simétrica en relación con los ejes principales de los esfuerzos aplicados (figura 14). La dirección de deslizamiento en cada falla del sistema conjugado suele ser normal a la línea de intersección de las dos fallas. (Babin, 2010)

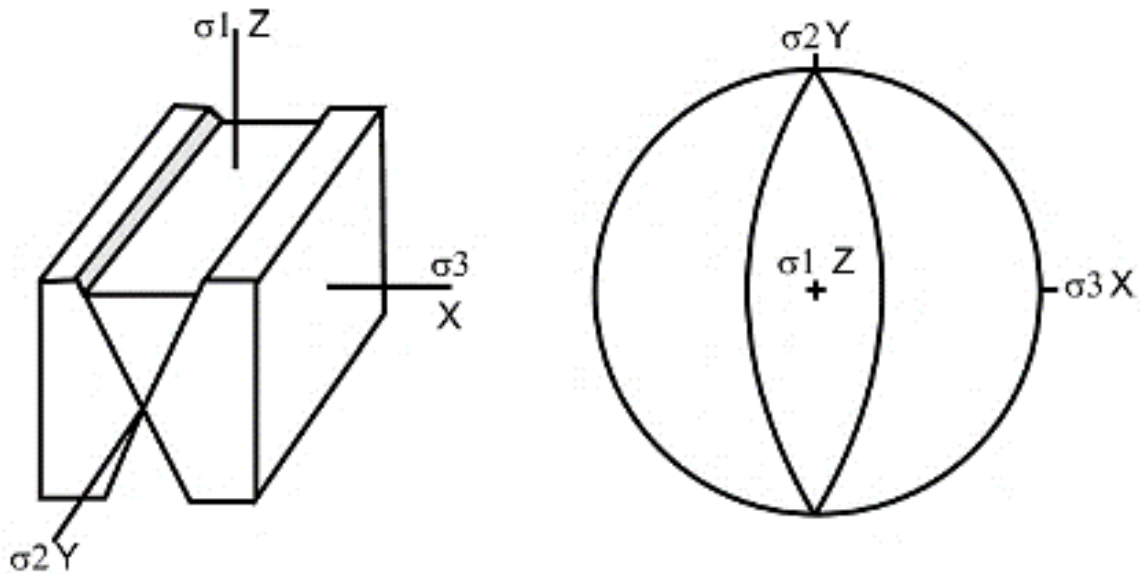


Figura 13. Disposición de los ejes de esfuerzo en un sistema de fallas conjugadas. (Babin, 2010, pág. 131)

Según el modelo de Anderson, para el caso de fallas normales. Los ejes principales de la deformación son X, Y y Z. El eje de esfuerzos máximo es vertical.

Anderson (1951) reconoció que las propiedades de las direcciones de esfuerzos principales en combinación con la ley de Mohr - Coulomb, requieren que cerca de la superficie de la tierra solo se puedan formar fallas de deslizamiento según la dirección (desgarres), y fallas de deslizamiento según el buzamiento (normales e inversas).

Considerando que la tierra es una esfera perfecta, este autor supone que la discontinuidad entre aire y suelo en cualquier punto de la superficie de la tierra, es un plano a lo largo del cual el esfuerzo de cizalla es cero. Si las direcciones principales de esfuerzos cumplen que la componente de cizalla es cero, se puede considerar la superficie de la tierra como un plano principal que contiene dos de las tres direcciones principales de esfuerzos. La tercera, sería perpendicular a este plano principal, y en cualquier punto, es perpendicular a la superficie de una tierra teóricamente esférica. Si las direcciones principales de esfuerzos son verticales u horizontales cerca o en la superficie de la tierra, y si el ángulo de fricción interna para muchas rocas es cercano a 30° , solo se pueden formar cerca de la superficie fallas normales, inversas y desgarres. Fallas inversas cuando σ_3 es vertical, desgarres cuando σ_2 es vertical y fallas normales cuando es vertical σ_1 . (Babin, 2010)

2.2.5.1. El Modelo de deslizamiento (Modelo de Rechés)

Los trabajos de Rechés (1983) muestran que, en el caso más general, las fallas en una región se disponen en cuatro familias con dos direcciones y buzamientos contrarios, como resultado

natural de un campo de deformación tridimensional (figura15). Las relaciones entre fallas formadas de esta manera dependen no solo del ángulo de fricción interna de la roca, sino del radio de deformación a lo largo de los ejes principales de la deformación, X, Y y Z.

El modelo de deslizamiento intenta explicar el hecho de que, en condiciones triaxiales de deformación frágil, tanto naturales como experimentales, las fracturas se disponen según una simetría ortorrómbica con respecto a los ejes fundamentales del elipsoide de deformación. Este modelo se deduce a partir del criterio de fractura de Navier-Coulomb e incluye como caso particular (deformación plana, $\epsilon_2 = 0$), el modelo de fracturación de Anderson (1951), el cual presenta una simetría de los planos de falla de tipo monoclinica. A. Muñoz (2006, P. 18)

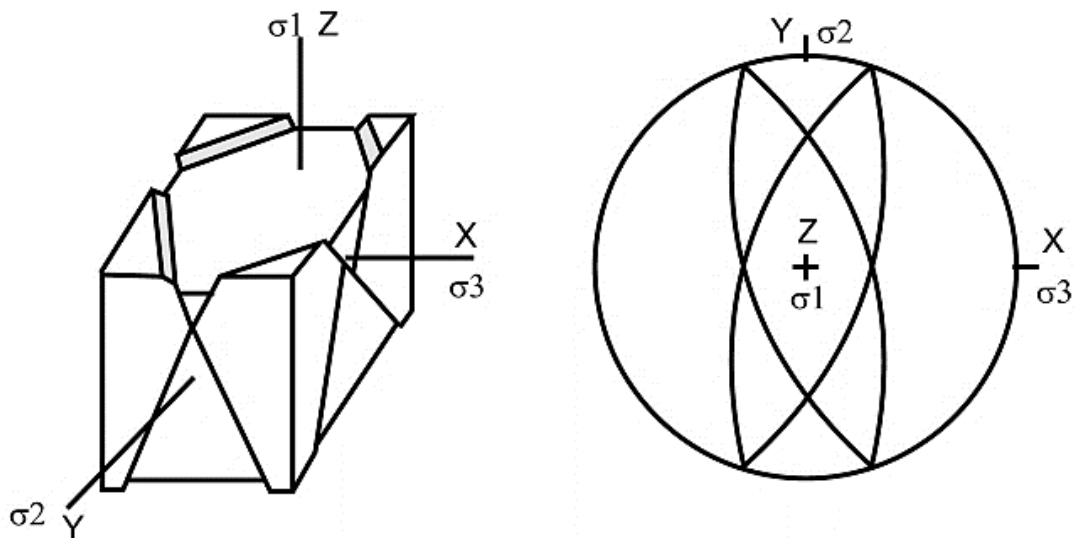


Figura 14. Modelo de deslizamiento de Reches para fallas conjugadas. (Babin, 2010, pág. 132)

Utilizado para obtener la orientación del máximo acortamiento horizontal, el modelo de deslizamiento se utiliza para obtener de forma directa, la orientación del máximo acortamiento horizontal y la forma del elipsoide de deformación.

2.2.5.2. Modelo de Fallas conjugadas de Anderson

Basándose en el criterio de fracturación de Mohr-Coulomb, establece que, como norma general, las fallas aparecen según dos familias conjugadas que se cortan formando un diedro agudo y otro obtuso. Las estrías situadas sobre ellas son perpendiculares a la línea de intersección de los planos. (Corzo, 2004)

En la bisectriz de los diedros agudo y obtuso se sitúan los ejes de compresión máxima (σ_1) y mínima (σ_2), respectivamente; en la línea de intersección de dos familias de planos se halla el eje intermedio σ_3 . (Anderson, 1951).

A partir de las orientaciones de las fallas que se han formado en un campo de esfuerzos dado, se puede evaluar estereográficamente la orientación de los esfuerzos principales que han dado lugar a estas fallas, o bien, conocida la orientación de los esfuerzos y el valor del ángulo de fricción interna de la roca, deducir la orientación y características de las fallas resultantes.

Supongamos un campo de esfuerzos donde se cumple que: σ_1 : N20°E / 0°; σ_2 : N70°O / 0° y σ_3 es vertical. El ángulo de fricción interna es de 30°.

Como σ_3 es vertical, las fallas conjugadas resultantes serían inversas según Anderson. Sus orientaciones probables se pueden predecir teniendo en cuenta todo lo aprendido acerca de la formación de fallas conjugadas. Recordemos las principales premisas (figura15):

- Los tres ejes principales de esfuerzos son perpendiculares entre sí.
- La línea de intersección de los círculos mayores que representan a las fallas conjugadas es σ_2 .
- El plano perpendicular a σ_2 se denomina plano de movimiento, y contiene a σ_1 y σ_3 .

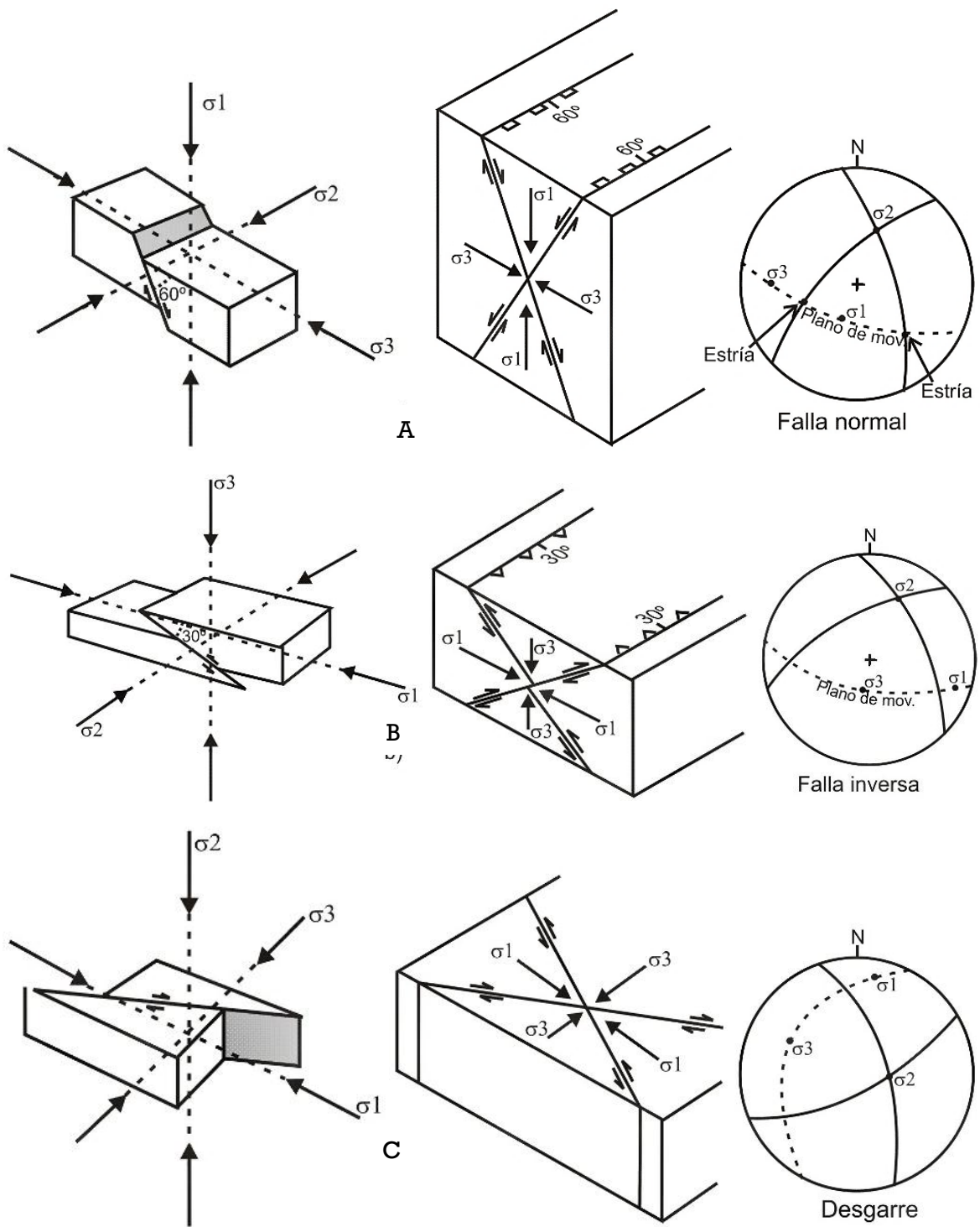


Figura 15. Modelo de Anderson para fallas conjugadas con movimiento normal, inverso o en dirección. Bloque diagrama y estereograma resultante para cada tipo de falla. (Babin, 2010, pág. 134)

- σ_1 es la bisectriz del ángulo agudo formado por las dos fallas conjugadas y σ_3 , del ángulo obtuso.
- Las estrías correspondientes a cada una de las fallas están definidas por el punto de corte en la proyección estereográfica, de la falla correspondiente con el plano de movimiento.

Teniendo en cuenta estas relaciones geométricas, vamos a proyectar los datos del ejemplo anterior, donde existen dos ejes principales de esfuerzo horizontales y el tercero, vertical (figura 16). Dibujamos el plano de movimiento colocando σ_1 y σ_3 en un círculo mayor que resulta ser un plano vertical. Contando 30° (ángulo de rozamiento interno) desde σ_1 en ambos sentidos sobre el plano de movimiento, obtenemos dos puntos de referencia (1 y 2) que representan la intersección de los planos de falla con el plano de movimiento σ_1/σ_3 . (Babin, 2010)

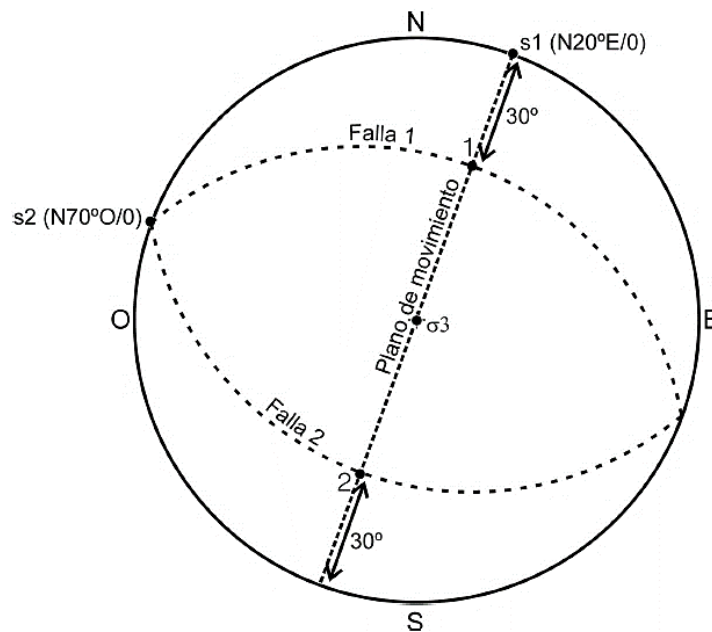


Figura 16. Aplicación del Modelo de Anderson conocidas las orientaciones de los ejes de esfuerzo. (Babin, 2010, pág. 135)

Dibujamos el plano que contiene el eje de esfuerzos intermedio σ_2 y el punto de referencia 1. Este plano corresponde a una de las fallas conjugadas. Hacemos lo mismo con el punto de referencia 2 y σ_2 , y obtenemos la segunda falla conjugada. Leemos directamente en la falsilla y las fallas tienen una dirección de $N70^\circ O$ con buzamientos de 30° al este y oeste respectivamente.

Las estrías están indicadas en la misma figura 16, en los puntos de corte de cada una de las fallas con el plano de movimiento (puntos 1 y 2).

En el caso frecuente de que una o más de las direcciones principales de esfuerzos no sea horizontal ni vertical, sino inclinada, la resolución estereográfica es exactamente la misma. Considerar la situación general donde ninguno de los esfuerzos principales es vertical u horizontal, todos son inclinados. Definimos el plano σ_1/σ_3 y su polo, que corresponde a σ_2 . Buscamos dos puntos de referencia en función del valor del ángulo de rozamiento interno y trazamos los círculos mayores que corresponden a las fallas conjugadas. (Babin, 2010)

2.2.5.3. El método de los diedros rectos

Este es uno de los métodos gráficos más utilizados. Fue concebido por Pegoraro (1972) y difundido y aplicado mediante ordenador por Angelier y Mechler (1977) y es aplicable de forma directa, tanto a fallas, como a mecanismos focales de terremotos. Se trata de un método geométrico que se basa en limitar para cada falla las zonas del espacio compatibles en compresión y extensión, superponiendo estos campos en proyección estereográfica (CASAS, 1990). Cada plano de falla y su estría sirven para dividir el espacio en cuatro cuadrantes, siendo los planos que los limitan el plano de falla y otro auxiliar normal a él y cuyo polo es la estría. No conviene olvidar que, mientras que el plano de falla es una discontinuidad real en la roca, el plano auxiliar sólo existe como construcción geométrica. (Bongiorno, 2011)

La teoría de Mohr – Coulomb predice la formación de fallas en sistemas conjugados, con simetría ortorrómbica, corroborado por experimentos de deformación triaxial. La cartografía en zonas de intensa deformación muestra la existencia de cuatro conjuntos de fallas, cada una de ellas con su par conjugado. ¿Es posible que todas ellas se hayan formado en un mismo evento deformativo?

En este método gráfico, uno de los más utilizados en Geología Estructural, se trabaja con cada uno de los planos de falla por separado. Se basa en limitar para cada falla las zonas del espacio compatibles en compresión y en extensión, superponiendo estos campos en proyección estereográfica. Construimos el estereograma con el plano de falla y un segundo plano, perpendicular a la falla y a su dirección de deslizamiento, llamado plano auxiliar. Estos dos planos dividen todas las posibles direcciones en la esfera en dos pares de cuadrantes (blancos y oscuros en la figura 17). Dependiendo del sentido de movimiento de la falla, un par de cuadrantes opuestos delimita la posible orientación de σ_1 (diedro en compresión), y el otro par, la de σ_3 (diedro en extensión).

Las condiciones impuestas para obtener mejores resultados son:

- Los ejes de máxima compresión y extensión deben ser perpendiculares.
- Ambos ejes deben estar en parejas opuestas de diedros.

Si tomamos los datos para varias fallas desarrolladas bajo el mismo campo de esfuerzos, las direcciones de esfuerzos se pueden estimar con el siguiente método estereográfico:

- Para cada falla por separado, dibujar los círculos mayores que representan el plano de falla y el plano auxiliar. Usando el sentido de movimiento de la falla, decidimos cuales son los cuadrantes correspondientes a σ_1 y a σ_3 .
- Superponemos los distintos estereogramas de cada una de las fallas y obtenemos las zonas donde se sitúan los valores de estos dos ejes principales de esfuerzos (figura18).

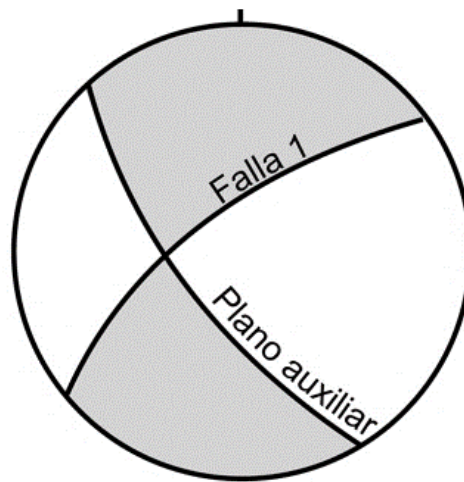


Figura 17. Método de los diedros rectos para fallas conjugadas. Estereograma para la falla 1. (Babin, 2010, pág. 133)

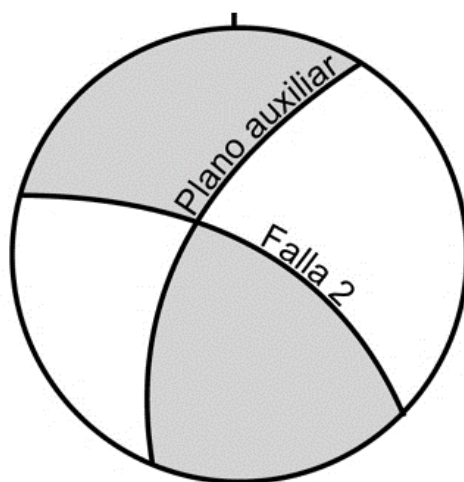


Figura 18. Método de los diedros rectos para fallas conjugadas. Estereograma para la falla 2. (Babin, 2010, pág. 133)

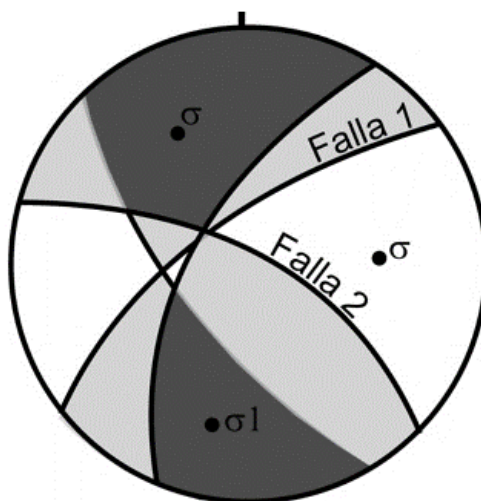


Figura 19. Método de los diedros rectos para fallas conjugadas. Superposición de los estereogramas anteriores. (Babin, 2010, pág. 133)

2.3. Definición de términos básicos

Esfuerzo. Es la cantidad de fuerza que actúa sobre una unidad de roca para causar deformación. El esfuerzo puede actuar de manera uniforme en la unidad de roca, es decir, en todas las direcciones. (Oyarzun, 2009)

Proyección Estereográfica. Es un artificio geométrico mediante el cual podemos expresar elementos que tienen tres dimensiones en un plano; cuestión que favorece la comunicación y el cálculo gráfico en las disciplinas geológicas. (Babin, 2010)

Falla. Es una fractura planar a lo largo de la cual la roca se ha desplazado según una dirección que es generalmente paralela al plano de ruptura, como consecuencia de la aplicación de un stress de cizalle. (Niemeyer, 2016)

Dirección. Es la orientación en la brújula (o rumbo -bearing-) de la línea especial en el plano que está horizontal. (David, 2010)

Buzamiento (Dip). Es el ángulo de la pendiente del plano. Un plano horizontal tiene un buzamiento de 0°. (Richard, 2004)

Dirección de buzamiento. Expresada como uno de los ocho puntos de la brújula (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW). La dirección del buzamiento es la dirección de la máxima pendiente hacia abajo y está en ángulo recto con la dirección. (Richard, 2004)

Inmersión (Plunge). En este sistema la orientación de la línea se describe con referencia a un plano vertical imaginario que atraviesa la línea. (Richard, 2004)

Ángulo de cabeceo (Pitch). El ángulo de en el plano de buzamiento entre la estructura lineal y la dirección o rumbo. (Structures, 2016)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación de la Investigación

3.1.1. Ubicación Geográfica

Geográficamente Minera Aurífera Retamas - Marsa, pertenecen al cinturón orogénico del Batolito de Patáz, el cual se ubica en las inmediaciones de la cordillera Nororiental del Perú, antiguamente conocía como el distrito minero de Parcoy, siendo el atractivo de importantes investigadores a nivel geológico tales como Wilson y Reyes, geólogos de la Carta Nacional (1,964), Tarnawiesqui y otros.

Específicamente "San Andrés- unidad minera Marsa", se ubica en una franja de cerros elevados que superan los 4,300 m.s.n.m., dentro de los que resaltan el denominado C° El Gigante, C° Cabana, C° Mushmush la zona de estudio se encuentra localizada en flanco Oeste de la cordillera de los Andes, que forma parte del complejo geológico del Marañón.

3.1.2. Ubicación Política

Políticamente se encuentran en el departamento La Libertad, provincia de Pataz, distrito Parcoy, caserío: Llacuabamba (Figura 20)

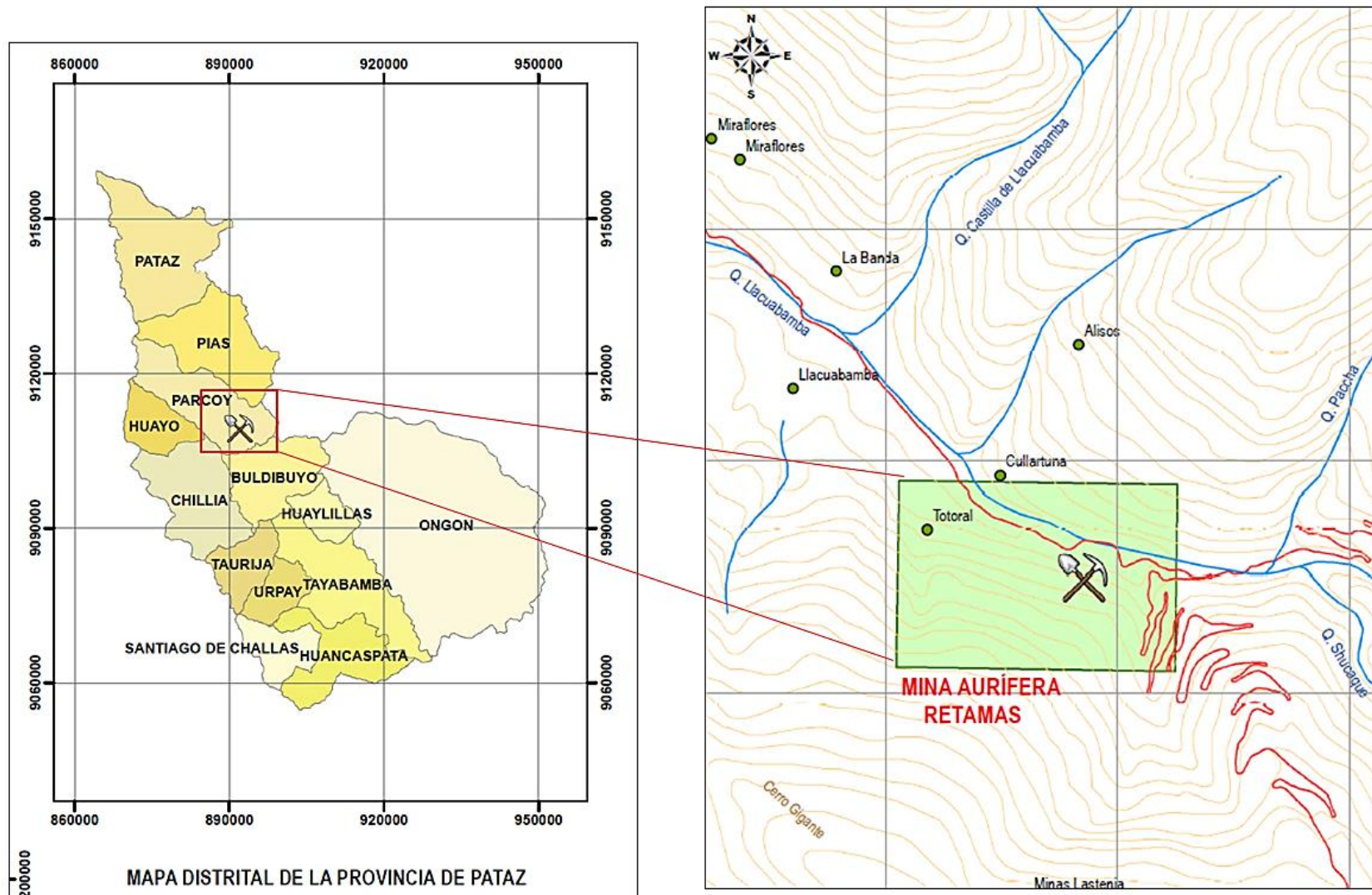


Figura 20. Ubicación Política del área de estudio.

3.1.3. Accesibilidad

Accesible por vía aérea desde la ciudad de Lima mediante avionetas pequeñas de 16 pasajeros que parten del aeropuerto internacional Jorge Chávez, llegando al pequeño aeropuerto ubicado en la zona de Pías, aguas abajo del río Parcoy, del cual en un promedio de 1 hora. En camioneta se llega al campamento san Andrés.

Otra vía de acceso es la terrestre por carreta, Lima Trujillo por la panamericana Norte, luego Trujillo Huamachuco por la vía asfaltada longitudinal de la Sierra y desde Huamachuco una distancia de 180 km. por carretera afirmada en mal estado empleando un promedio de 10 horas. En camioneta 4 x 4, hasta el campamento San Andrés

3.1.4. Geomorfología

La zona se emplaza en la cordillera Oriental de los Andes, en el límite con el subandino peruano, mostrando rasgos característicos de erosión glacial y fluvial, con una topografía muy variada y accidentada. En la zona, la cordillera Oriental alcanza cotas por encima de los 4,500 msnm. Se trata de un macizo ubicado entre los ríos Marañón y Huallaga y, consiste en cadenas paralelas separadas por estrechos valles longitudinales.

Las geoformas locales que caracterizan a la cordillera Oriental son los valles en V, valles en U, lagunas de origen glacial, picos, valles colgados y circos glaciares, además de depósitos de morrenas y fluvioglaciares, así como depósitos coluviales y aluviales en las partes bajas de las cuencas.



Foto 1. Valle en U.

3.1.5. Geología regional

La secuencia estratigráfica en la zona de estudio está constituida por rocas desde el Precámbrico hasta el Cuaternario reciente. En la región de Pataz – Parcoy, la cordillera Oriental comprende un basamento metamórfico denominado ‘Complejo del Marañón’ (Wilson y Reyes, 1964; Dalmayrac, 1988; Schreiber, 1989; Haeberlin, 2002).

Las rocas más antiguas comprenden un miembro metapelítico intensamente deformado, el cual se encuentra constituido por paraesquistos y paragneises caracterizados por un metamorfismo regional de facies de esquistos verdes a facies de anfibolita, con cuatro fases de deformación sobrepuestas (Schreiber, 1989; Haeberlin, 2002). La serie metamórfica se encuentra formando bloques levantados y alargados en dirección NO – SE, entre los 6 y 13° de Latitud Sur, limitados al Oeste y Este por fallas longitudinales reactivadas durante los periodos tectónicos (Palacios, 1995). Wilson y Reyes (1964) describieron para el Complejo del Marañón, mica-esquistos, meta-andesitas y filitas. Posteriormente Schreiber (1989) estudió las meta-andesitas como rocas metavolcánicas también asignadas al Complejo Marañón, sin embargo, una segunda unidad pre-siluriana constituye una secuencia volcanoclástica, localmente llamada la Formación Vijus (Haeberlin, 2002) que incluye basaltos, lutitas, conglomerados e ignimbritas, que corresponden a las meta-andesitas y metavolcánicas. En el Ordovícico y Silúrico, se depositó una serie detrítica a modo de secuencias turbidíticas, que tras las condiciones de metamorfismo termal en la zona pasaron a conformar alternancias de cuarcitas masivas, areniscas grises oscuras y pizarras grises, atribuidas a la Formación Contaya (Dalmayrac, 1980). Estratigráficamente las partes bajas de esta formación constan de bancos masivos de cuarcitas grises, mientras que las más altas muestran ciclos turbidíticos con pizarras negras ricas en graptolites, areniscas y menos cuarcitas.

Posteriormente, Galdós (2005) describe una secuencia de lavas afaníticas con estructura almohadillada, intercaladas con pelitas y areniscas, denominadas como Formación Tres Lagunas la cual aflora de forma discontinua desde el Noreste de Huaylillas (La Libertad) hasta el sector Oeste de Leimebamba (Amazonas) a lo largo de 180 km y en una franja de 10 km de ancho promedio. Sobreyace en discordancia angular a las filitas y esquistos del complejo Marañón y a la Formación Contaya, la cual está constituida por alternancias de cuarcitas masivas, areniscas oscuras y pizarras grises (Dalmayrac, 1980).

Las secuencias de molasas epicontinentales están representadas por el Grupo Ambo, con intercalaciones de lavas almohadilladas intercaladas con sills basálticos-gabroicos. Estas se

encuentran cubiertas por las secuencias de molasas continentales rojas del pérmico superior conocidas como el Grupo Mitu, del Permiano medio al superior.

Durante el Triásico superior y Jurásico inferior se dio la invasión de los mares sobre una plataforma carbonatada, representada en el Grupo Pucará, compuesto principalmente de calizas y dolomitas. Durante el Cretácico inferior el retiro de los mares dio lugar a una sedimentación clástica representada por las areniscas grisáceas del Grupo Goyllarisquizga. La transgresión del Albiano puede verse plasmada en esta zona del Perú en las margas y calizas de la Formación Crisnejas. Durante la fase tectónica peruana, se formaron los plegamientos y sobre escurrimientos de las unidades inferiores, siendo cubiertas discordantemente por las capas rojas clásticas continentales de la Formación Chota (Mégard, 1978, 1984).

El Batolito de Pataz

El batolito de Pataz se trata de un gran cuerpo intrusivo de más de 90 km de largo, principal huésped de las vetas de oro que se explotan en la región se trata de un cinturón intrusivo calco-alcalino de grandes dimensiones que se extiende a lo largo de la cordillera Oriental (Laubacher y Mégard, 1985). Se emplazó intruyendo al basamento del Complejo Marañón. Los pequeños apófisis dioríticos a tonalíticos en los márgenes del plutón representan a las intrusiones más tempranas.

El componente mayoritario del batolito es una granodiorita de grano medio, que hacia el núcleo del batolito grada, o tiene un contacto bien definido, con un monzogranito de grano grueso. En las partes apicales del batolito, los cuerpos de granodiorita monzogranito son cortadas por diques de mica-aplita y algunos pequeños stocks de granito rosado (Haeberlin, 2004).

3.1.6. Geología local

En las partes altas correspondientes al embalse Laguna Blanca, quebradas Mush Mush y Molinetes, afloran secuencias de cuarcitas en bancos masivos correspondientes a la Formación Contaya. Sin embargo, a profundidad, las labores mineras subterráneas encuentran filitas y esquistos del Complejo del Marañón, por lo que la extensión y espesor de las cuarcitas de la Formación Contaya, no están bien determinadas. El contacto con las rocas metamórficas del Complejo del Marañón es dudoso. En la zona de la planta de tratamiento de aguas, hay afloramientos de metapelitas en grado metamórfico intermedio, a las cuales sobreyacen los bancos masivos de cuarcitas. Estas cuarcitas se encuentran

recubiertas por una coronación de rocas volcánicas de la Formación Tres Lagunas (Galdós, 2004). Las zonas de Laguna Blanca, quebrada Molinetes y quebrada Mush Mush , presentan buenas exposiciones de la Formación Tres Lagunas.



Foto 2. Afloramiento de cuarcitas en bancos en la confluencia de las quebradas Mush Mush y Laguna Blanca

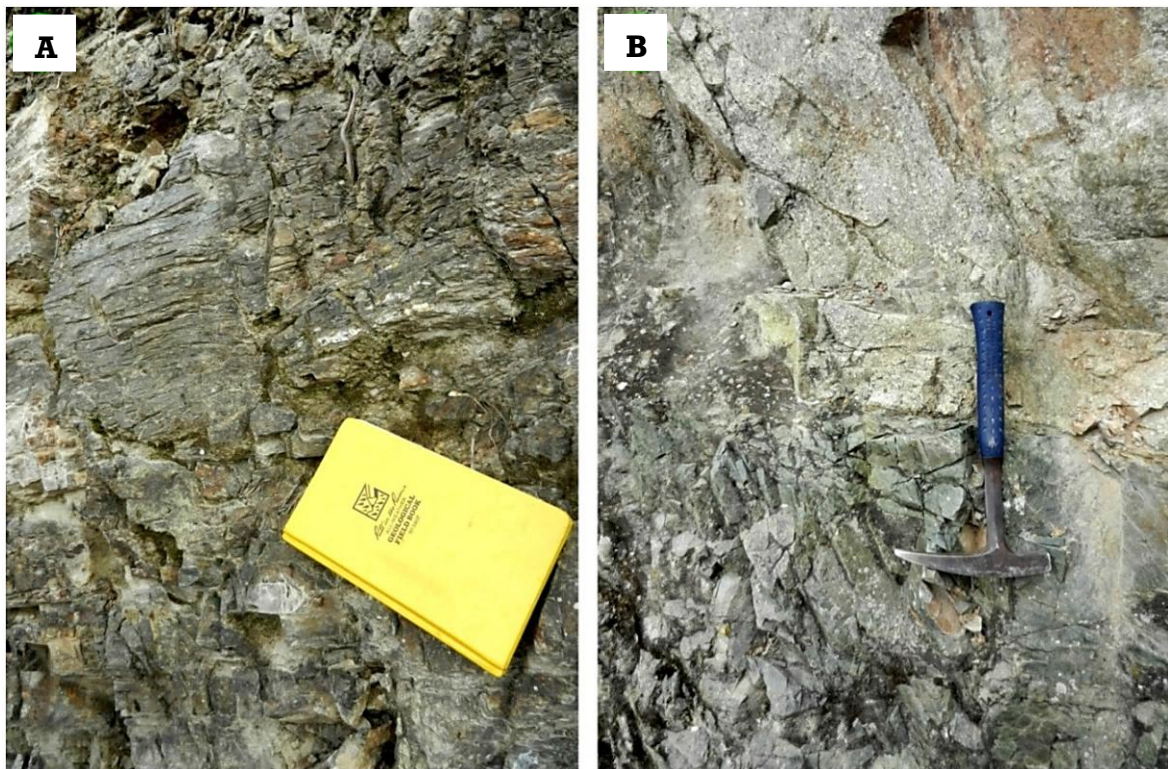


Foto 3. A) Metapelitas en grado metamórfico bajo y B) Intrusivo granodiorítico moderadamente fracturado.

El batolito de Pataz aflora con un contacto poco definido en superficie y, delimitado por la falla Loros en subterráneo con las rocas metamórficas del Complejo del Maraón y, en superficie con las cuarcitas atribuidas a la Formación Contaya aproximadamente en la parte

alta de la quebrada Molinetes, desde donde se deduciría que el trazo de la falla sigue el rumbo de la quebrada (Foto N° 4).

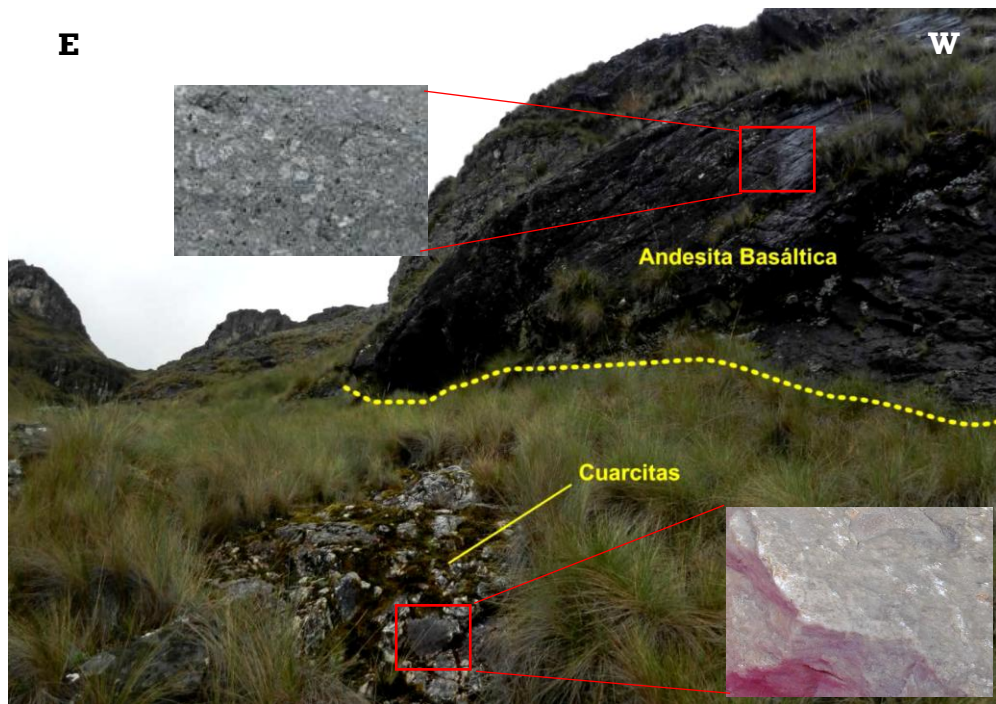


Foto 4. Quebrada de la Laguna Blanca con afloramientos de cuarcitas (Formación Contaya), a las cuales sobreyacen una secuencia volcánica andesítica (Formación Lavasen)

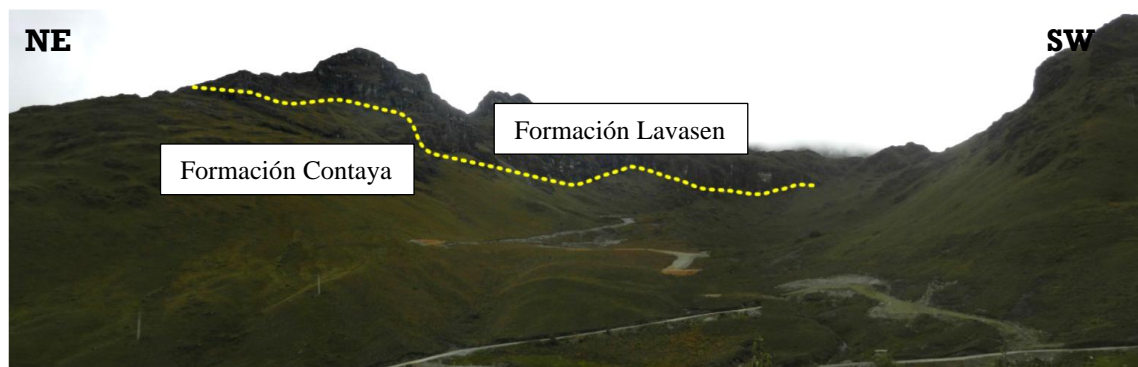


Foto 5. Afloramientos de la Formación Lavasen sobre yaciendo a Formación Contaya.

En la zona de la quebrada Pomachay, hacia el sector Sureste de la zona de estudio, hay afloramientos del batolito de Pataz, los cuales se encuentran cortando a los volcánicos descritos anteriormente. En la quebrada Balcones, al Norte de la quebrada Pomachay, desaparecen las rocas volcánicas quedando únicamente expuestas las rocas intrusivas. De esta forma, en los cerros Balcones, Vizcachas y Cabana Alta ocurren afloramientos del batolito de Pataz, sin la cobertura volcánica que si están en la parte Este de la zona de estudio (suprayaciendo a la Formación Contaya). Todo esto evidenciaría que el magmatismo fue un evento posterior a la Formación Tres Lagunas (Foto N° 6). El batolito se encuentra cortado

por múltiples vetas de cuarzo lechoso, las cuales albergan la mineralización de oro (Foto N° 7).



Foto 6. Quebrada y cerro Balcones con afloramientos del batolito Pataz.

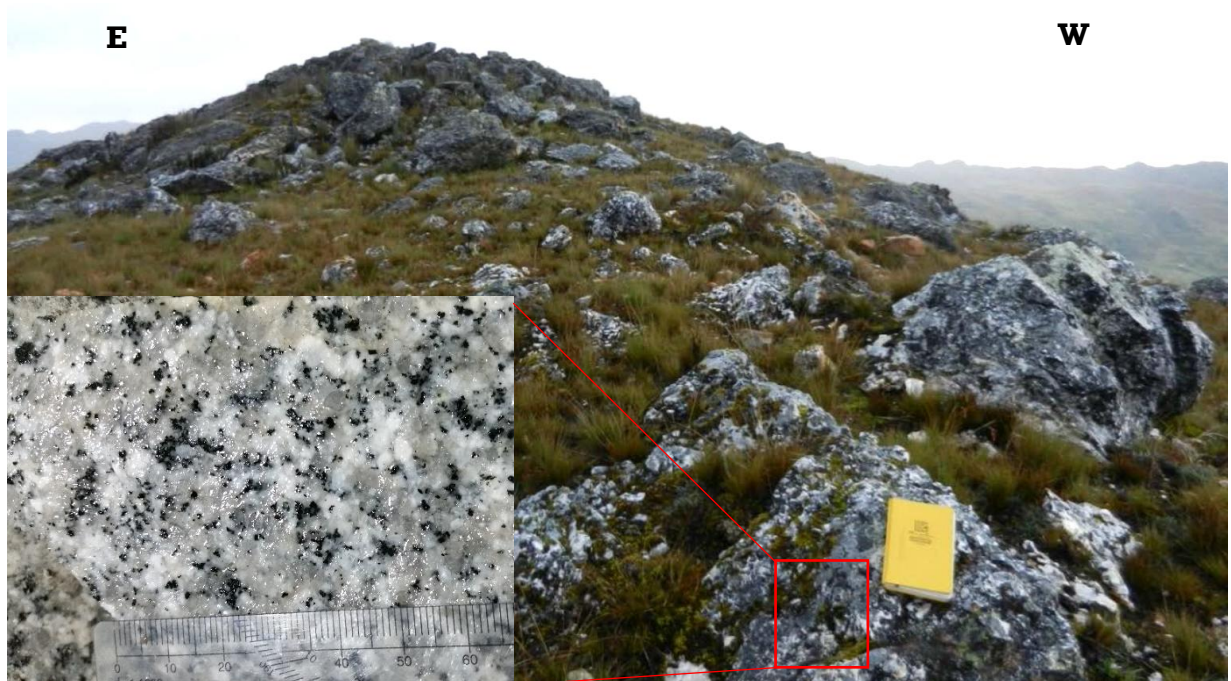


Foto 7. Cima del cerro Cabana Alta. Intrusivo granodiorítico del batolito de Pataz

3.1.7. Estratigrafía

3.1.7.1. Complejo del Marañón

Localmente se trata de una secuencia metamórfica cuya base es desconocida, consistente de filitas poli deformadas y seritoesquistos con un grado de metamorfismo medio a alto. Estas rocas se encuentran fuertemente fracturadas. Afloran en superficie en la zona de estudio hacia el sector E del mismo posiblemente estando en contacto fallado con el batolito de Pataz e infrayaciendo localmente a la formación Lavasen. Los materiales pertenecientes al

Complejo Marañón son poco permeables por lo que se les asigna una permeabilidad baja a nula.

Adicionalmente, en la zona de estudio se presenta una secuencia de metasedimentos en bancos masivos, cuya extensión y potencia son desconocidas, por lo que no han sido diferenciadas en el cartografiado local y, que se encuentran sobreyaciendo a las filitas y esquistos del Complejo del Marañón. Se trata de cuarcitas granoblásticas de color gris claro que posiblemente puedan corresponder a la Formación Contaya. Son bastante competentes y compactas, con un grado de fracturamiento muy leve. En este sentido, el Complejo Marañón presenta una permeabilidad muy baja a nula comportándose como basamento impermeable.

3.1.7.2. Formación Lavasen

En la zona de estudio se ha identificado una secuencia de lavas afaníticas con estructura almohadillada de composición andesítica a basáltica, color gris oscuro con fenocristales de hornablenda, piroxeno y escaso olivino, con un grado de fracturamiento leve a moderado que se encuentran sobreyaciendo a rocas metamórficas del Complejo Marañón y, se desconoce su tope, siendo la superficie de erosión actual.

Estas rocas volcánicas, que posiblemente pueden ser constitutivas de la formación Tres Lagunas, ocupan las cimas y los picos más altos de las montañas que se encuentran en las partes altas de la zona de estudio, con una geomorfología agreste y conspicua, con pendientes casi verticales, que lo diferencia de las unidades que lo circundan. Se estima que estas rocas tienen una permeabilidad baja.

3.1.7.3. Grupo Pucará

El Grupo Pucará se encuentra ubicado fuera del área local estudiada. Está constituida por calizas, de coloración gris a negras, bituminosas, bien estratificadas en capas delgadas y con pequeños lentes de sílice (Wilson y Reyes, 1964). El Grupo Pucará consiste en dos litologías diferenciadas, una inferior que se caracteriza por una estratificación maciza y una superior típicamente de una caliza negra y fétida, en capas delgadas y con intercalación de lutitas negras. A estos materiales se le asigna una permeabilidad media a baja.

3.1.7.4. Grupo Mitu

El Grupo Mitu que infrayace al Grupo Pucará se compone de conglomerado masivo, elementos subredondeados de caliza posiblemente de la formación Copacabana, arenisca parda, andesita rosada y roca metamórfica en una matriz de arenisca con un espesor

aproximado de 180 m. A estas rocas se le asigna una permeabilidad media a baja por ser un material consolidado y poco fracturado.

3.1.7.5. Formación Crisnejas

La Formación Crisnejas se encuentra sobreyaciendo al Grupo Pucará y está controlado por una falla regional con rumbo NO-SE, por donde pasa el río Huinchus, esta formación consiste de calizas grisáceas, areniscas calcáreas y lutitas calcáreas, con una permeabilidad media a baja.

3.1.7.6. Formación Chota

La Formación Chota consiste en areniscas rojizas y conglomerados, guijarros de calizas, los cuales llevan capas de areniscas friables de grano grueso y de coloración rosada. Por su litología a esta unidad se le asignado una permeabilidad baja.

La Formación Tres Lagunas, el Grupo Pucará, la Formación Crisnejas y la Formación Chota, poseen una permeabilidad media a baja, en consecuencia, estos materiales actúan como un acuitardo.

3.1.7.7. Depósitos Cuaternarios

En la quebrada de la Laguna Blanca se presenta un perfil de los depósitos fluvioglaciares (Foto 8A), donde se reconoce cierta selección gradando desde guijarros angulosos a gránulos gruesos en una matriz arenosa a limosa, cubiertos por un suelo orgánico de unos 40 cm aproximadamente. Se le asigna una permeabilidad media.

Los manantiales que alimentan al embalse Laguna Blanca han formado un bofedal con depósitos de gravas angulosas en una matriz de arenas gruesas (Foto 8B).

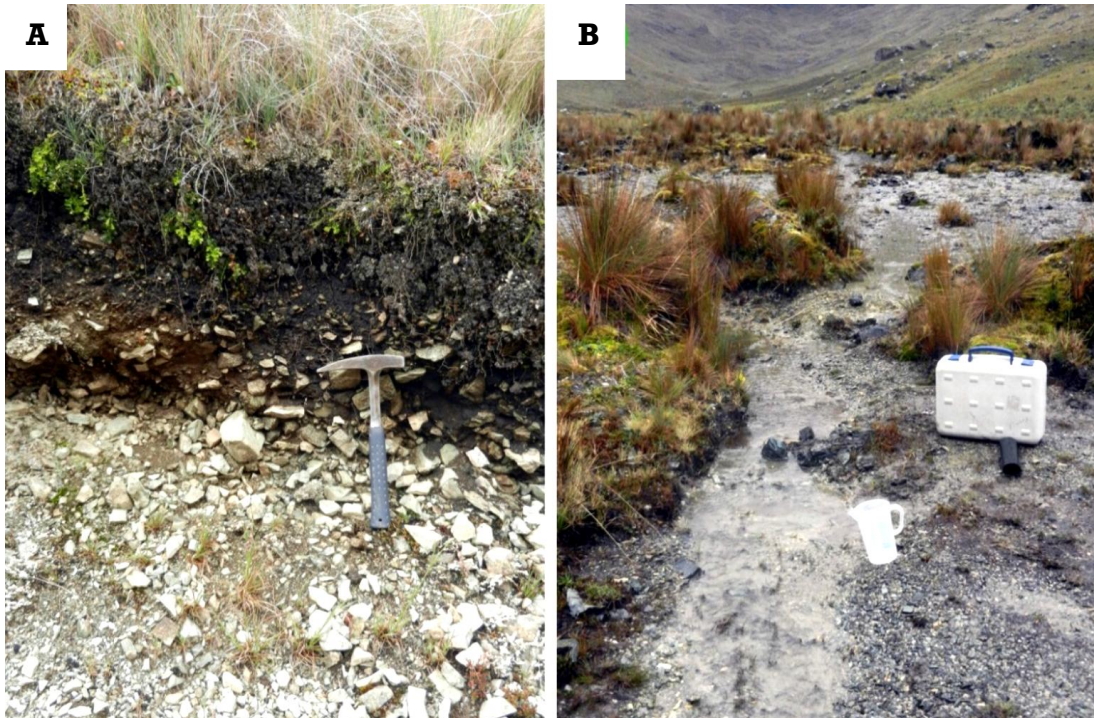


Foto 8. A) Perfil de los depósitos fluvioglaciares B) Depósitos fluvioglaciares (gravas y arenas).

Los depósitos coluviales tienen poca selección, tratándose de bloques subredondeados a angulosos, en una matriz constituida por guijarros y gránulos gruesos angulosos, constituyendo depósitos en tamiz (Foto 9A). Se le asigna una permeabilidad de media a baja debido a la posible tortuosidad del flujo subterráneo, estos materiales constituyen un acuífero pobre.

Los depósitos aluviales se encuentran restringidos al cauce de los ríos, especialmente al río Llacubamba (Foto 9B). Se trata de cantos rodados subredondeados del tamaño de guijarros y guijas, en una matriz de gránulos y arenas muy gruesas subredondeadas. Estos materiales poseen una permeabilidad media a alta, constituyendo acuíferos libres.

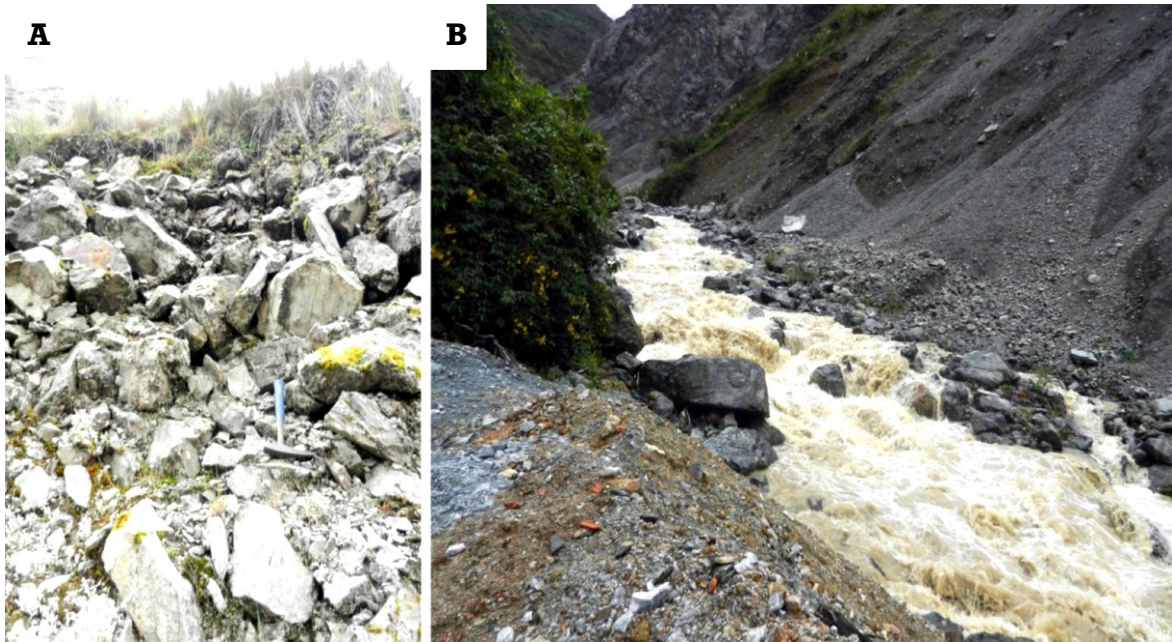


Foto 9. A) Depósitos coluviales. B) Depósitos aluviales y fluviales

3.1.7.8. Rocas Intrusivas

El batolito de Pataz consta de un gran cuerpo intrusivo de composición granodiorítica a tonalítica, color gris parduzco, poco fracturado, constituido de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasas (Foto 10a). Se intemperiza a un color gris oscuro, encontrándose cortado por múltiples vetas de cuarzo lechoso. La composición no es uniforme, variando de granodioritas (composición intermedia) a monzonitas (menor proporción de cuarzo), con ocasionales afloramientos de granito (Foto 10b) y, tonalitas (ausencia de feldespato potásico).

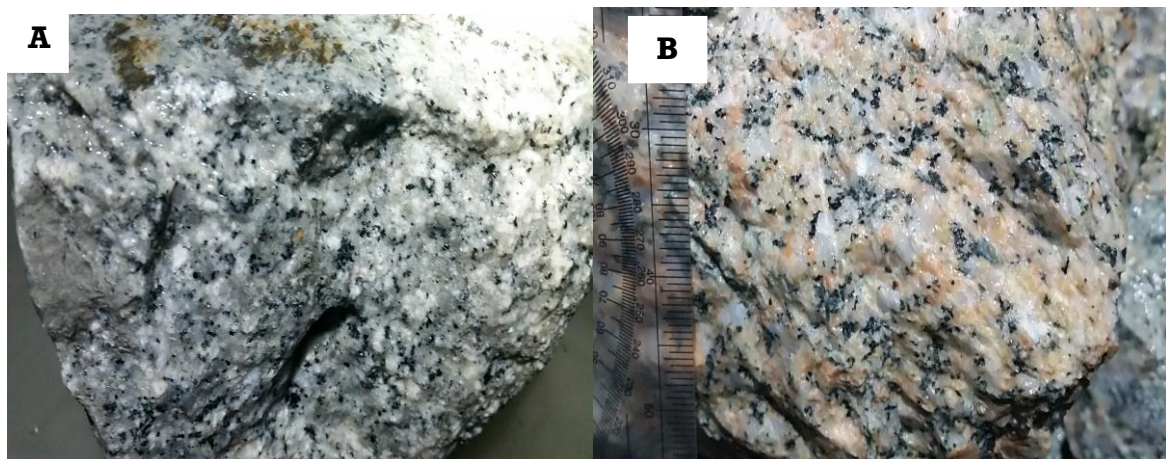


Foto 10. Afloramientos del batolito de Pataz A) Granodiorita y B) Granito.

3.1.8. Geología estructural

Debido a la orogénesis, a una serie de esfuerzos compresionales y tensionales presentan una serie de plegamientos, tendencia NW-SE-NW y pendientes que van desde los 35° hasta los 85° aproximadamente, asociados a estas estructuras se encuentra una serie de fallas

regionales con rumbo NW-SE, sienten el control estructural de este yacimiento, muchas de estas fallas son lechos de ríos y quebradas que coinciden con la hidrografía superficial. Existen además fallas locales con rumbo SW-NE, N-S y E-W.

A continuación, se detallan los diversos sistemas de fallas de mayor importancia:

3.1.8.1. Fallamiento NW-SE (Sistema Longitudinal)

Son fallas post-mineralización, de rumbo sub-paralelo y/o paralelo a las vetas, que originan ensanchamientos (cabalgamiento), acuñamientos y discontinuidad local de las estructuras mineralizadas; muchos de éstos son de carácter normal-sinistral e inversadextral, con desplazamientos que van desde 5 a 10 cm. 10 – 20 metros. En las labores desarrolladas sobre las vetas: Gigante Uno, Esperanza, Yanaracra Sur, Cachaco, Mano de Dios, Yanaracra Uno, también se observan este tipo de fallas.

3.1.8.2. Fallamiento NE-SW a N-S (Sistema Diagonal)

De rumbo promedio Norte a noreste y alto buzamiento al Oeste. Son fallas que se presentan muchas veces agrupadas en bloque (fallamiento gravitacionales), otras veces como estructuras aisladas relativamente. Las vetas en general se hallan afectadas por este tipo de fallamiento ya sea normal, inverso, sinistral o dextral. Es el caso de las fallas: Oeste Uno, Cabana Cuatro, Cinco, La Española, Sistema Chilcas, etc., con desplazamiento normal - sinistral. Cuando las fallas son de bajo ángulo se presentan como sobre-escurrimientos locales.

3.1.8.3. Fallamiento E-W (Sistema Transversal)

De rumbo promedio E-W y alto buzamiento al Norte o Sur, son fallas que desplazan hasta 100 m en la vertical y 300 m en la componente horizontal (sinistral) siendo el bloque Norte el que cae o hunde. Dentro de este sistema destacan: Falla Uno, E-1, falla veta Pumas Uno, Yanaracra Norte Uno, AB, Cinco, Cabana, San Vicente.

La falla Uno es una estructura conocida por su extensión y persistencia y, por las observaciones de campo se deduce que es de movimiento inicial inverso o sinistral.

Muchas de estas fallas son pre-mineralización correspondientes al sistema de vetas NWSE, con reactivaciones post-mineralización.

3.1.8.4. Nivel 2820

Adicionalmente, en el nivel 2820 se identificaron las siguientes estructuras y han clasificadas según su dirección:

- Fallas con dirección NW–SE, de carácter regional como la falla Ventanas y La Española (primer orden)
- Fallas de dirección NE-SW, de carácter local como la falla Patrick, falla NE-1 (2826.6) (segundo orden)
- Vetas-fallas de dirección NW-SE de corto recorrido como resultado de la cinemática de la falla Patrick siendo esta última una falla de rumbo. Estas vetas-fallas.
- Fallas menores paralelas y con la misma cinemática de las vetas-fallas diferenciándose de estas últimas debido a que no se encuentran mineralizadas

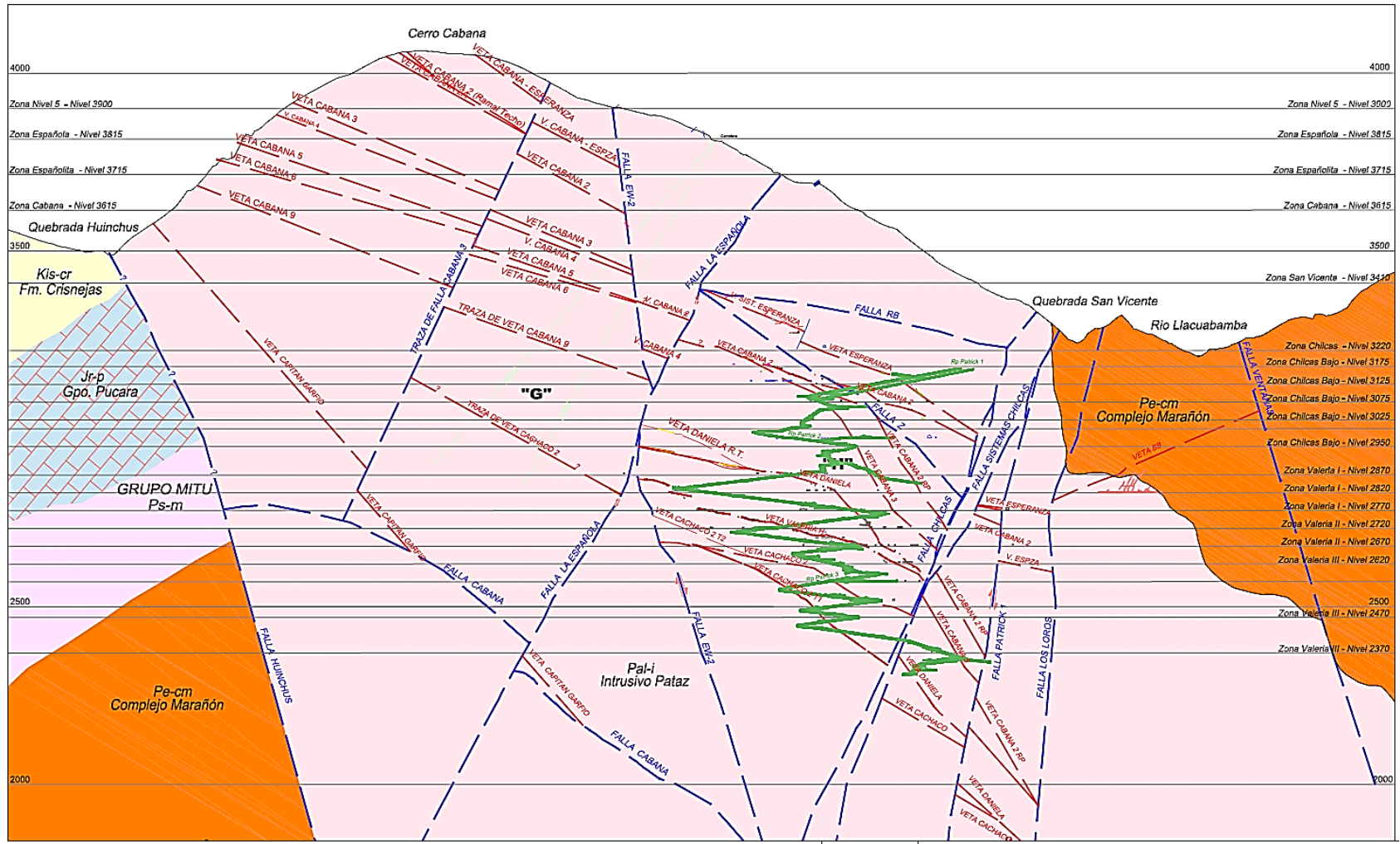


Figura 21. Sección tipo del Yacimiento El Gigante donde se exhibe la distribución de vetas (rojo) y fallas (azul). (Dante, 2015)

3.1.9. Geología económica

La mineralización se emplazó principalmente en rocas microdioritas-dioritas, en menor porcentaje en granodioritas-granitos, cuyos rasgos litológicos y tectónicos se derivan de los procesos de la metalogenia de la Cordillera Central.

Las soluciones mineralizantes circularon a través de fracturas preexistentes dentro del Batolito de Pataz, depositándose en las aberturas a manera de vetas. La reacción con las rocas encajonantes provocaron alteraciones hidrotermales causadas por los cambios físicos y químicos que imperaron en el ambiente deposicional. (Dante, 2014).

3.2. Metodología de la Investigación

3.2.1. Tipo y Método de Investigación

- a) Tipo de investigación: El tipo de investigación es descriptiva – analítica.
- b) Nivel de investigación: El nivel de investigación es interpretativo.
- c) Método de investigación: El método a utilizar es el analítico – explicativo.

3.2.2. Población de Estudio

La población las estructuras del nivel 2670.

3.2.3. Muestra

El corredor H del nivel 2670.

3.2.4. Unidad de Análisis

Proyecciones estereograficas de las fallas del nivel 2670.

3.2.5. Definición de Variables

VARIABLE INDEPENDIENTE (Causa)	VARIABLE DEPENDIENTE (Efecto)
Tectonica	Proyección Estereografica. Análisis Numérico
Dirección y Buzamiento	Esfuerzo principal

Tabla 1. Definición de las variables de la investigación

3.3. Procedimiento y Técnicas de recolección de datos.

Para el estudio de la investigación, se han considerado los diferentes procedimientos de trabajo (PETS) y técnicas de recolección de datos existentes en la unidad minera

3.3.1. Trabajo de campo

Para el trabajo de campo para del presente estudio de investigación se ha considerado los procedimiento de trabajo (PETS) y estándares de seguridad que estipula en forma obligatoria el Departamento de Geomecánica y Seguridad de la Minera Aurífera Retamas- marsa, en la elaboración del mapeo geológico y geomecánico, toma de datos o mapeo estructural.

3.3.2. Trabajo de gabinete

Los trabajos de gabinete y oficina corresponden a la elaboración de planos geológicos, proyecciones estereográficas y análisis estructural de las diferentes estructuras del yacimiento, que servirán para el presente estudio de investigación.

3.3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas usadas para la elaboración del presente estudio, son las mismas usadas para todos los trabajos de investigación.

Los instrumentos usados para el trabajo de campo son la brújula, GPS, Lupa 20x, Picota de Geólogo, Protáctor, imán con planos a escalas diferentes.

Para el trabajo de oficina se usaron computadoras, laptops, impresora, plotter y CDs

3.4. Procesamiento de datos

3.4.1. Metodología de los diedros rectos

Sabemos que se basa en el uso de regiones especiales que se crean a partir de una intersección de una falla y un plano conjugado y que corresponde a cuatro diedros dominados por un estado de esfuerzos que se deriva del Modelo Dinámico de Anderson, al igual que los esfuerzos, los diedros son elementos de análisis abstractos que sirven de guías para conocer la posición, azimut e inclinación de los sigmas 1, 2 y 3, según estos los diedros rectos se localizan en regiones que parcialmente coinciden con los bloques piso y techo.

En el modelo de Anderson se tiene un conjunto de estructuras extensionales y/o de fallamiento normal cuyo desplazamiento principal es caudado por un sigma 1 vertical el cual yace en una región que concentra la mayor parte de deformación, dando lugar a los diedros 2 y 4 en compresión, mientras los diedros 1 y 3, están dominados por extensión.

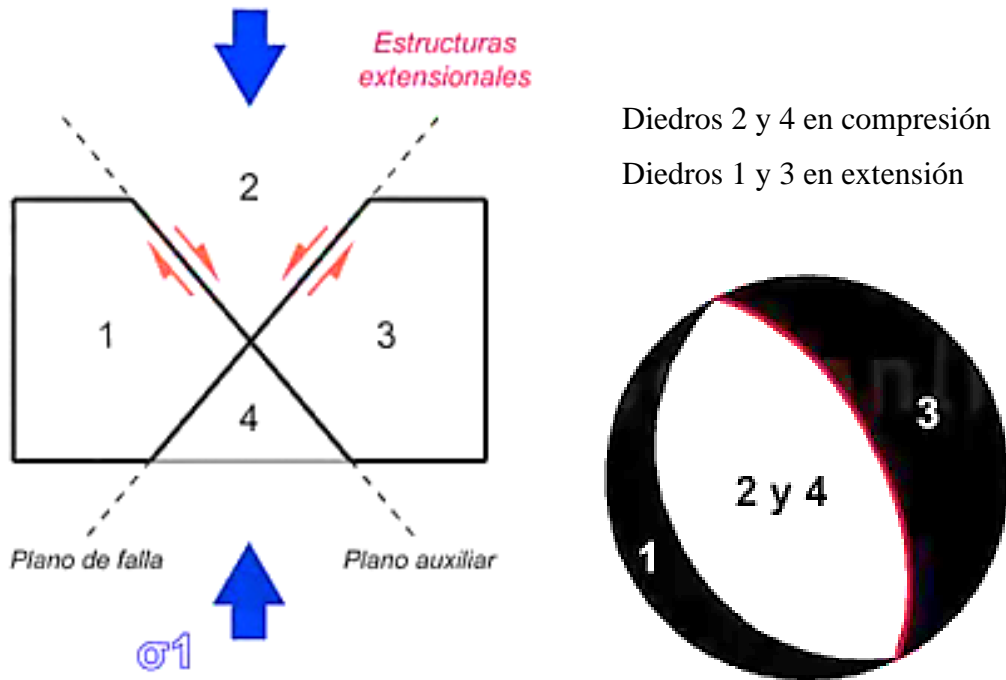


Figura 22: Estructuras Extensionales (Vicente & Muñoz, 1992)

Por otro lado en el caso de estructuras compresionales y/o de fallamiento inverso, la dirección del sigma 1 se ubica a lo largo de un plano horizontal, donde la deformación se concentra ahora en los diedros 1 y 3, por lo que los diedros 2 y 4 se encuentran ahora en extensión. Pudiéndose representar la posición de los diedros por estereogramas para su cálculo y visualización.

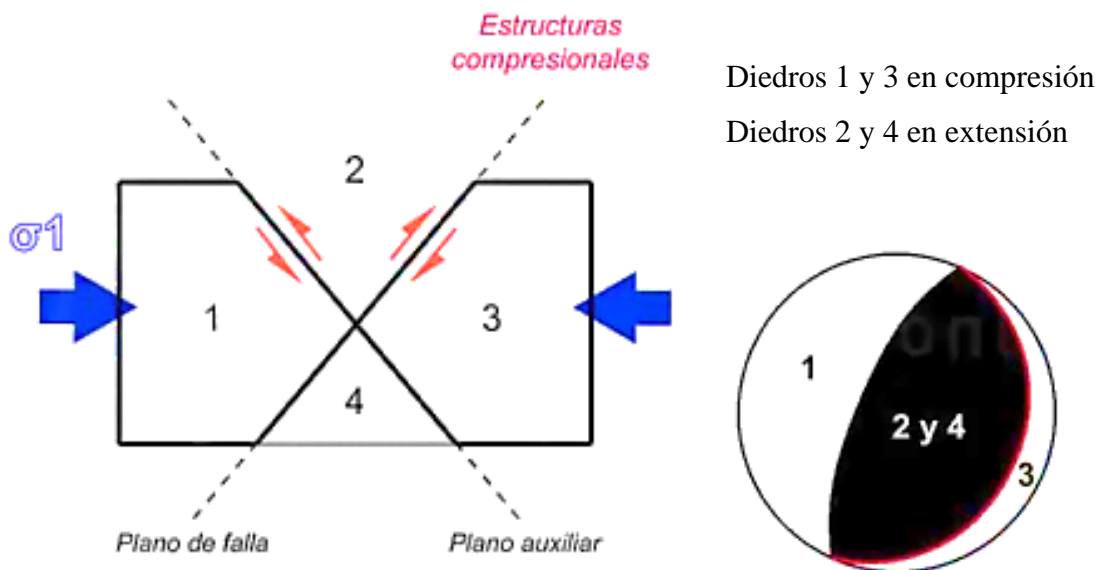


Figura 23: Estructuras Compresoras (Vicente & Muñoz, 1992)

Para el uso de los diedros rectos en estereogramas es requisito indispensable conocer el tipo de fallamiento observado en terreno en base a la medición de estrias e identificación de indicadores cinemáticos, tomemos en cuenta que en un mismo estereograma se puede trabajar con estrias que han sido formadas por un buen tiempo similar; por lo que el análisis del fallamiento según la metodología de los diedros rectos es viable para estructuras compatible.

Para ello necesito tres tipos de informacion: rumbo y Buzamiento del plano de falla que adverga a la estria, Magnitud y Dirección de inclinación de cada una de las líneas de estiramiento y la cinemática del fallamiento.

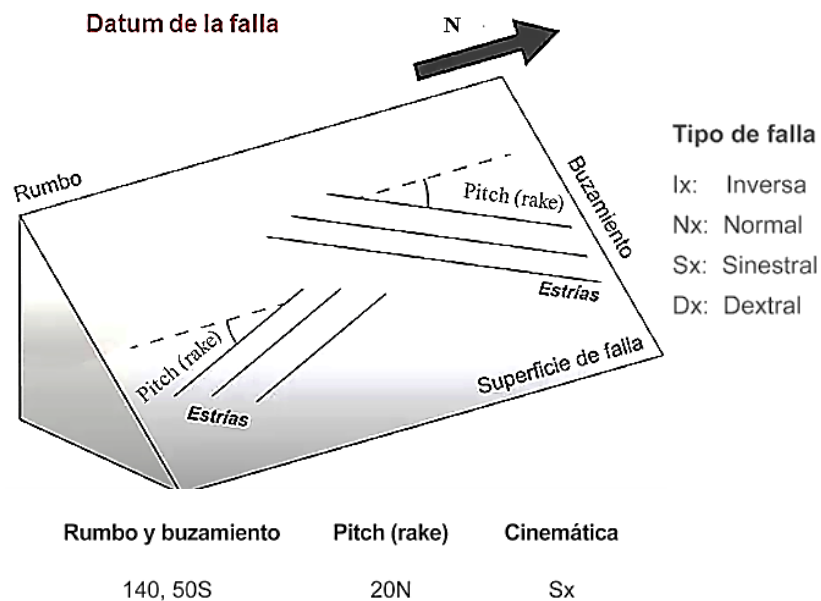


Figura 24: Datum de falla. (Vicente & Muñoz, 1992).

3.4.2. Manejo Tectónico de Estereograma

Durante el análisis de estereogramas, el manejo tectónico de los mismos implica la determinación gráfica del plano real y del auxiliar sobre la falsilla de Schmidt que conserva el área, con el objetivo de estimar la orientación espacial y/o Plunge de los sigmas 1, 2 y 3.

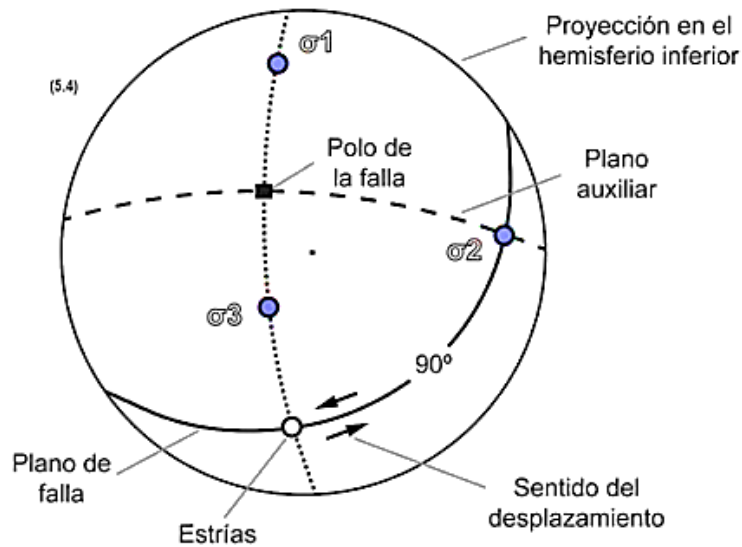


Figura 25: Manejo Tectónico de Estereograma (Alimendinfer, 1987)

Primer Paso: Se grafica el plano de falla F a lo largo de un círculo mayor de acuerdo a su rumbo y buzamiento, así mismo se localiza el polo de la falla, y se indica la cinemática.

Segundo Paso: la estría se ubica como un punto en alguna parte del círculo mayor de la falla, se traza la proyección en planta de la estría cuya intersección con el rombo de la falla forman un Angulo agudo ciertamente oblicuo, mientras que la cinemática se observa sobre la estría proyectada por medio de una flecha cuya dirección coincide con el movimiento del bloque techo.

Tercero Paso: Luego sobre el círculo mayor de la falla, se localiza al sigma 2 a 90° de la posición de la estría.

Cuarto paso: A partir de esto se une el polo de la falla y el punto del sigma 2, según un círculo mayor de línea discontinua que corresponde al plano Filial F prima

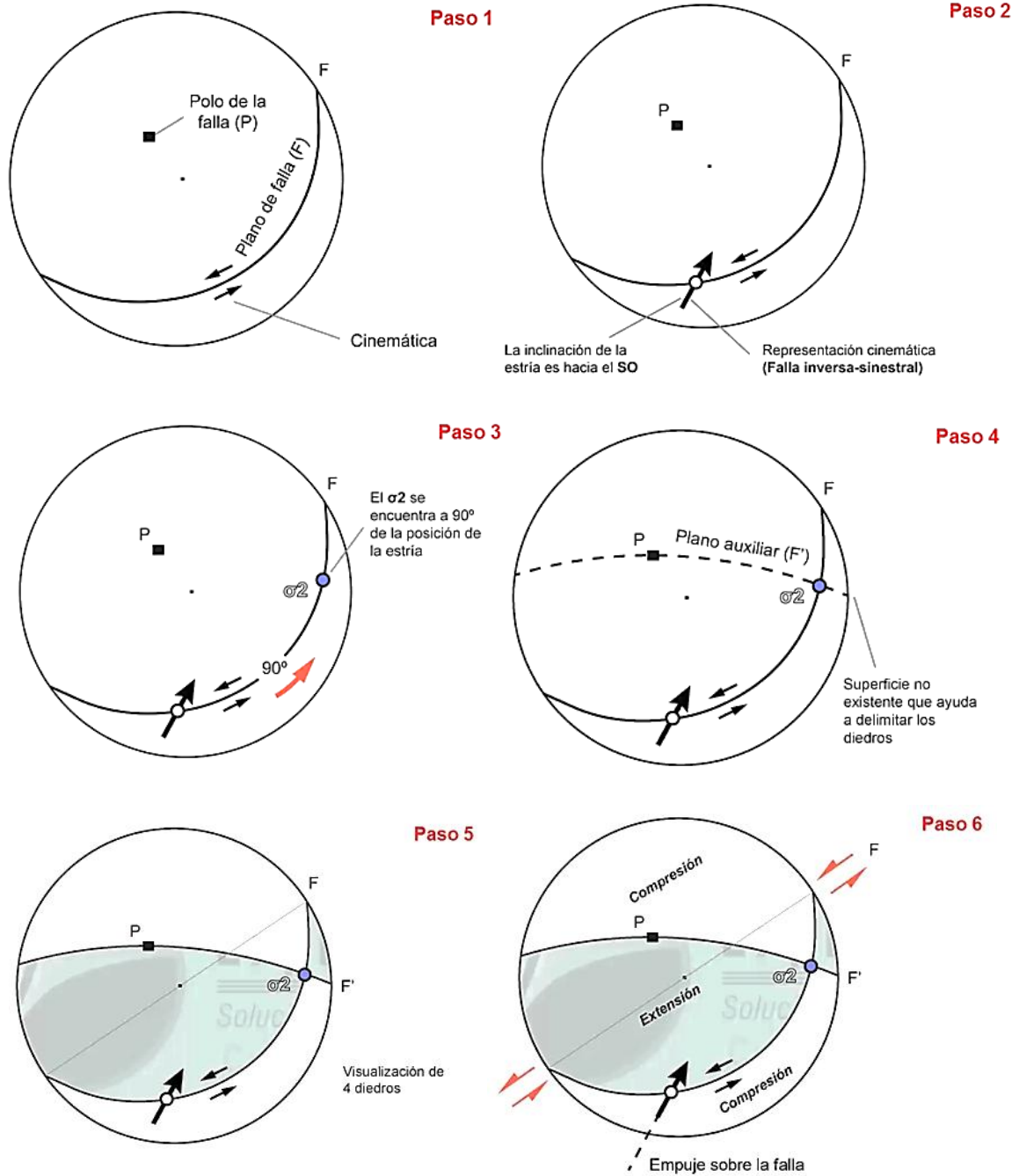
Quinto paso: Así se obtiene los cuatro diedros rectos,

Sexto paso: El empuje que da lugar al movimiento del bloque techo en contra del bloque piso indica que el diedro inferior así como su simétrico superior están en compresión representados en color blanco y los dos restante corresponden al área de Extensión.

Sétimo paso: Según el punto que representa la estría con el polo de la falla, según un círculo mayor de líneas punteadas, de modo que este último plano alberga en su recorrido a los sigmas 1 y 3, por su parte el sigma 1 se encuentra a 45° del polo de la falla dentro del diedro en compresión superior mientras que el sigma 3 del polo de la falla en extensión.

Octavo paso: A partir del Datum de la Falla se determinan las posiciones y orientaciones de los esfuerzos compresivos máximo, intermedio y mínimo.

Noveno paso: y para determinar la dirección de Comprensión principal se debe trazar la línea que une al centro de la falsilla con el eje del sigma 1 la cual tiene una dirección NO – SE con tendencia a hacer NS.



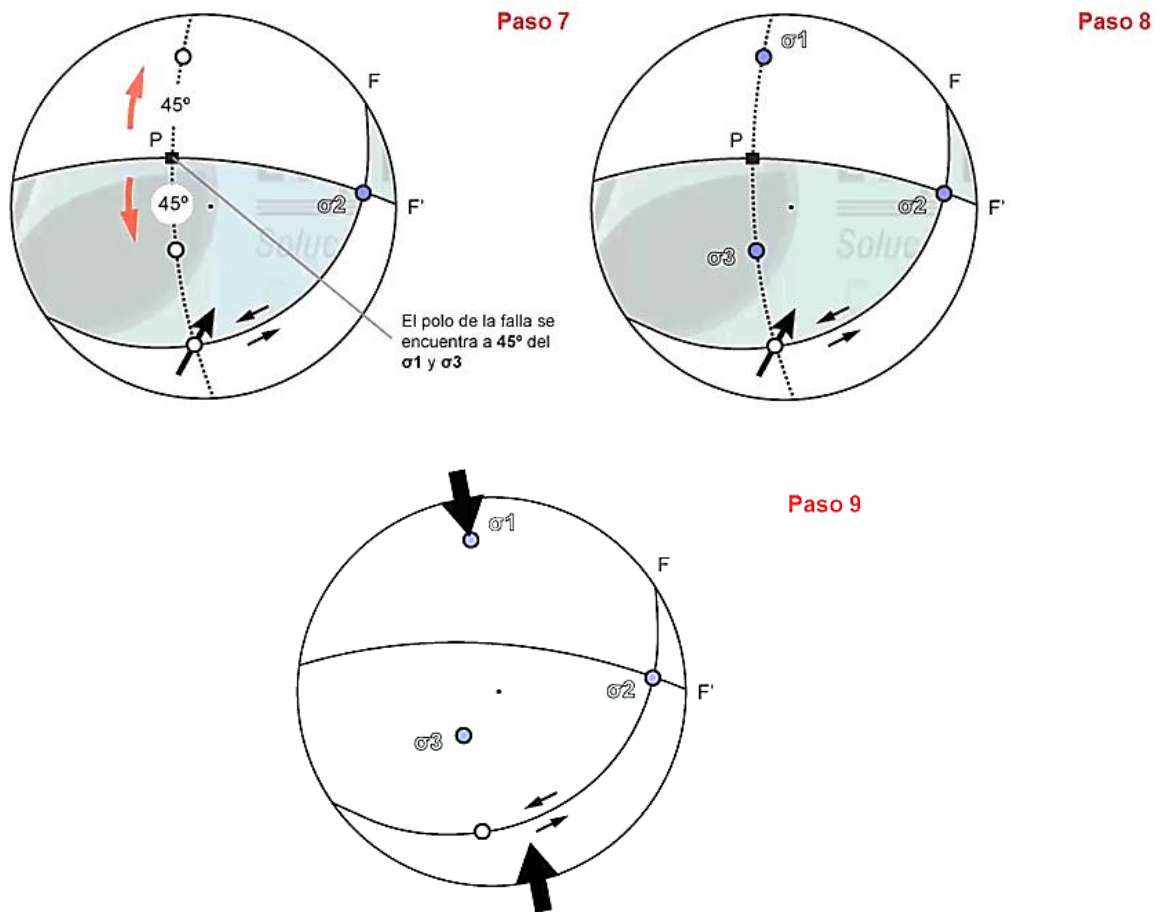


Figura 26: Pasos para generar una Estereograma (Vank, 2004)

3.4.3. Software Faultkin

Conociendo que el ploteo de sus datos estructurales se da por medio de estereogramas en plantillas físicas, resultan mucho más productivo procesar dicha información en software especializado que permita el almacenamiento de un gran volumen de datos, es un software libre, puede dar todos los resultados solicitados y el único que puede verificarlo es el geólogo.

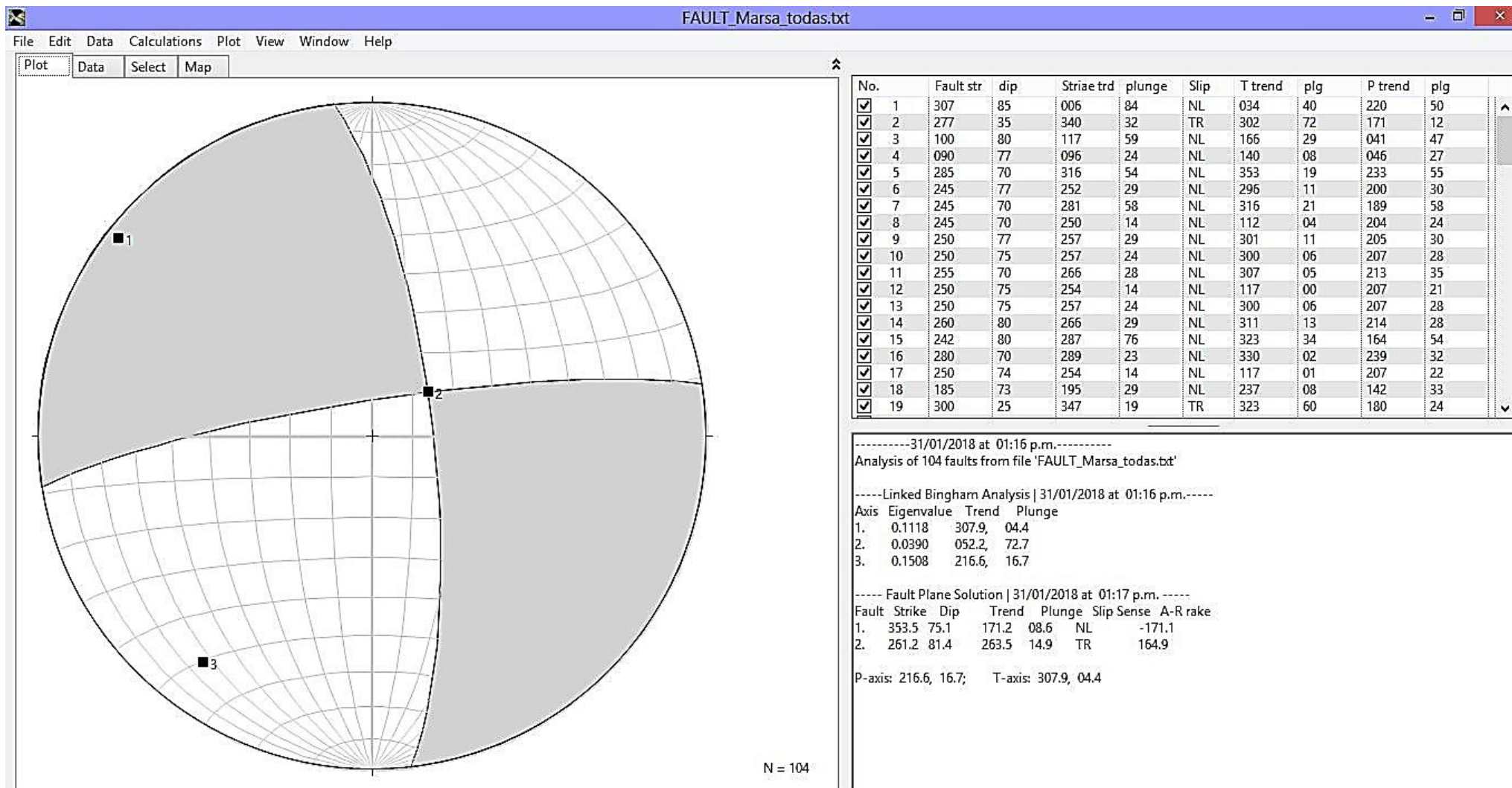


Figura 27: Software Faultkin (Cardozo, 2012)

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Modelo estructural

El principal objetivo del análisis estructural es precisar la naturaleza del control estructural.

Los datos recolectados, según la regla de la mano derecha, corresponden a azimut y manteo del plano de falla, pitch o rake de la estría (ángulo de barrido en el plano), trend (azimut de la estría), plunge (buzamiento de la estría) y sentido de movimiento, mediante el uso de indicadores cinemáticos frágiles (Petit, 1987).

4.1.1. Pre - mineralización

El sistema de deformación estructural más antiguo ocurrido en la zona se desarrolló durante la fase tectónica Eohercínica, cuya manifestación se plasma en la formación de la Fosa del Maraón de orientación SE–NW a N-NW. Este sistema regional genera el principal patrón estructural paralelo al borde de la fosa, afectando al flanco occidental del Batolito de Pataz (Yagua, 2015).

En el reconocimiento de campo se identifica un persistente patrón de fallamiento-fracturamiento NNW a NW, con inclinaciones entre 30° y 50°E. Según Yagua (2015), en el sector norte del batolito persiste el mismo patrón estructural, pero con inclinaciones mayores a 50°, lo anterior podría obedecer a la existencia de una falla tipo rampa.

En esta etapa de deformación se puede situar la zona de falla Huinchus, posteriormente el sistema de fallas Chilcas, posee características que indican una formación en el nivel cortical correspondiente a la transición frágil – dúctil. En un nivel menos profundo (cerca de la deformación frágil) se desarrollaron las otras zonas de fallas NNW (Española, Los Loros y otras)

Asociado a esta deformación pre – mineral, la disposición geométrica imbricada de la mayoría de las vetas partiendo de estas fallas que mantean al E podrían considerarse como fallas de bajo orden heredadas que fueron creadas antes de la mineralización, generando una arquitectura tipo dúplex (Figura 29). Un duplex involucra un set de fallas imbricadas que

transfieren el desplazamiento desde un cabalgamiento de piso a un cabalgamiento de techo. Sin embargo, la naturaleza, geometría y cinemática de las redes de fracturas y fallas en los duplexes de rumbo aún no se conoce a cabalidad (Cembrano et al., 2005).

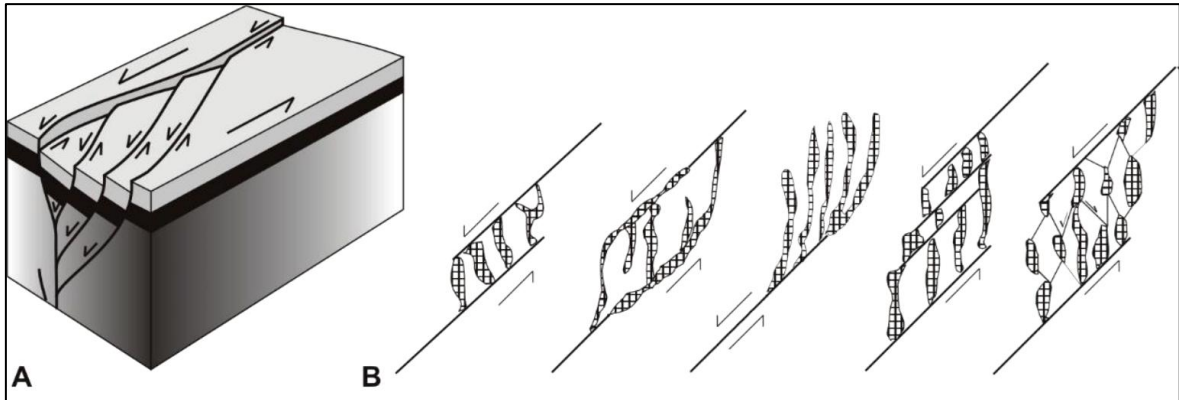


Figura 28. A. Arquitectura tridimensional de un duplex extensional.

AB. Variedad de estructuras internas en los codos dilatacionales (modificado de Sibson, 1990) que pueden corresponder a redes de vetas y fallas interconectadas. Veta en escalón, lazo cimoide, cola de caballo y redes con alternancia cizalle/extensión, respectivamente. Nótese que la geometría de las estructuras es independiente de la escala, milímetros a kilómetros.

4.1.2. Sin – mineralización

El análisis de los plots estereográficos de las vetas evidencia un acortamiento ENE-WSW causando la formación de vetas relacionadas al fallamiento oblicuo (dextral – inverso), favorecidas por la dirección de estiramiento NW que permitió el ingreso de los fluidos hidrotermales desde el NE, concordante con la dirección de flujo mencionado en el estudio de inclusiones fluidas (Bisa, 2011). La evolución cinemática evidencia movimiento inverso y predominantemente dextral; seguido por fallamiento inverso tardío.

Al tratarse de zonas de fallas heredadas (NW) reactivadas como vetas en el período sin mineral es probable que sólo se desarrollen entre las fallas maestras (NNW) con una relación de contacto asintótico con estas y es probable que sólo se extiendan hasta este límite. Por lo tanto, no sería extraño que no exista continuidad en el otro bloque. Son varios los casos de vetas que han sido seguidas sin éxito o se han determinado otras con una potencia y textura distinta. Se debe considerar la disposición en echelón entre corredores NNW restringidos a cada zona o sistema de falla como herramienta de exploración.

4.1.3. Post – mineralización

Se debe considerar que la geometría final de las vetas auríferas fue fuertemente afectada por la sobreimposición de deformación frágil post-mineralización. Las fallas post – mineral presentes en el Yacimiento San Andrés son mayoritariamente de desplazamiento sinistral. Algunas se reconocen fácilmente dado que tienen un relleno de salbanda rica en arcilla o en otras ocasiones clastos de brecha de cuarzo syn – mineral.

Este fracturamiento tardío, incluye tres fases sucesivas frágiles post-Paleozoico Durante el Permo-Triásico los bloques tectónicos prevalecen reactivando las fallas syn-mineralización, subverticales, de orientación E-W y segmentando las estructuras mineralizadas de rumbo NNW (Haeberlin, 2002). Debido a las múltiples sobreimposiciones de fallamiento, las observaciones de estrías en varias de estas fallas E-W no son muy confiables y no pueden ser utilizadas para la determinación de componentes sucesivos de desplazamientos en el rumbo. Sin embargo, la preservación de fábrica S-C en la zona de falla EW 2 evidencia que se trata de una estructura generada en la transición dúctil – frágil por lo que sería compatibles con la reactivación planteada. Sin embargo, en los planos de la mayoría de los niveles, la zona de falla EW2 ha sido extrapolada desplazada sistemáticamente por el sistema NNW, es más, en el nivel 3815 no se observan evidencias de tal desplazamiento. De acuerdo a la evolución cinemática de la zona el efecto es el opuesto: Las zonas de falla dirección EW son las que desplazan sinistralmente, con un componente normal, a las NNW.

Las reconstrucciones de las vetas segmentadas evidencia que aquellas denominadas con nombres diferentes en el lado de estas fallas mayores pertenecen a una misma estructura, lo cual puede extenderse lateralmente por varios metros.

A diferencia, las fallas regionales de rumbo E-W, los otros sistemas tienen escasos efectos sobre la geometría actual de las vetas, y ha generado discontinuidades sólo a pequeña escala, desplazando y duplicando las estructuras mineralizadas.

Tres estados de deformación unidos al ciclo Andino fueron reconocidos a través de datos obtenidos de las estrías: un evento compresional NE-SW y luego uno NW-SE fueron seguidos por una sobreimposición de un evento extensional ENE-WSW. Estas orientaciones de strain sugieren que al mismo tiempo las fallas E-W fueron presumiblemente afectadas primero por un movimiento sinistral, seguido por uno dextral y por un movimiento normal (dextral) tardío.

En relación a las vetas AA y BB, que poseen un rumbo y dirección de manto; y mineralogía, diferente al resto de las vetas, la génesis podría estar relacionada a las zonas de deformación EW. En la revisión de los mapeos de los niveles se determinó que existían otras estructuras con una disposición similar, por ejemplo, en el nivel 2920, corredor G, donde se observa la relación estructural entre la zona de falla EW2 y un patrón de fracturamiento NE con desarrollo de diques, vetas y zonas de alteración. Extrapolando la observación al N, hacia el corredor I, es probable que las vetas AA y BB correspondan a una zona de cola de caballo (horsetail) de la zona de falla Patrick bajo el régimen sinistral (figura 49). Dado que son áreas de mayor dilatación puede favorecer la precipitación de facies de menor temperatura. En un inicio se había considerado el efecto de la zona de falla Ventana (NE), definida en la interpretación de lineamientos distritales pero la revisión en terreno descartó esta como falla, sólo corresponde a una quebrada.



Figura 29. Esquema de un horsetail o cola de caballo de una zona de falla sinistral, evidenciando el posible esquema de formación de las vetas AA y BB.

4.2. Análisis de fallas mediante Proyección estereográfica (Software FaultKin).

4.2.1. Falla española.

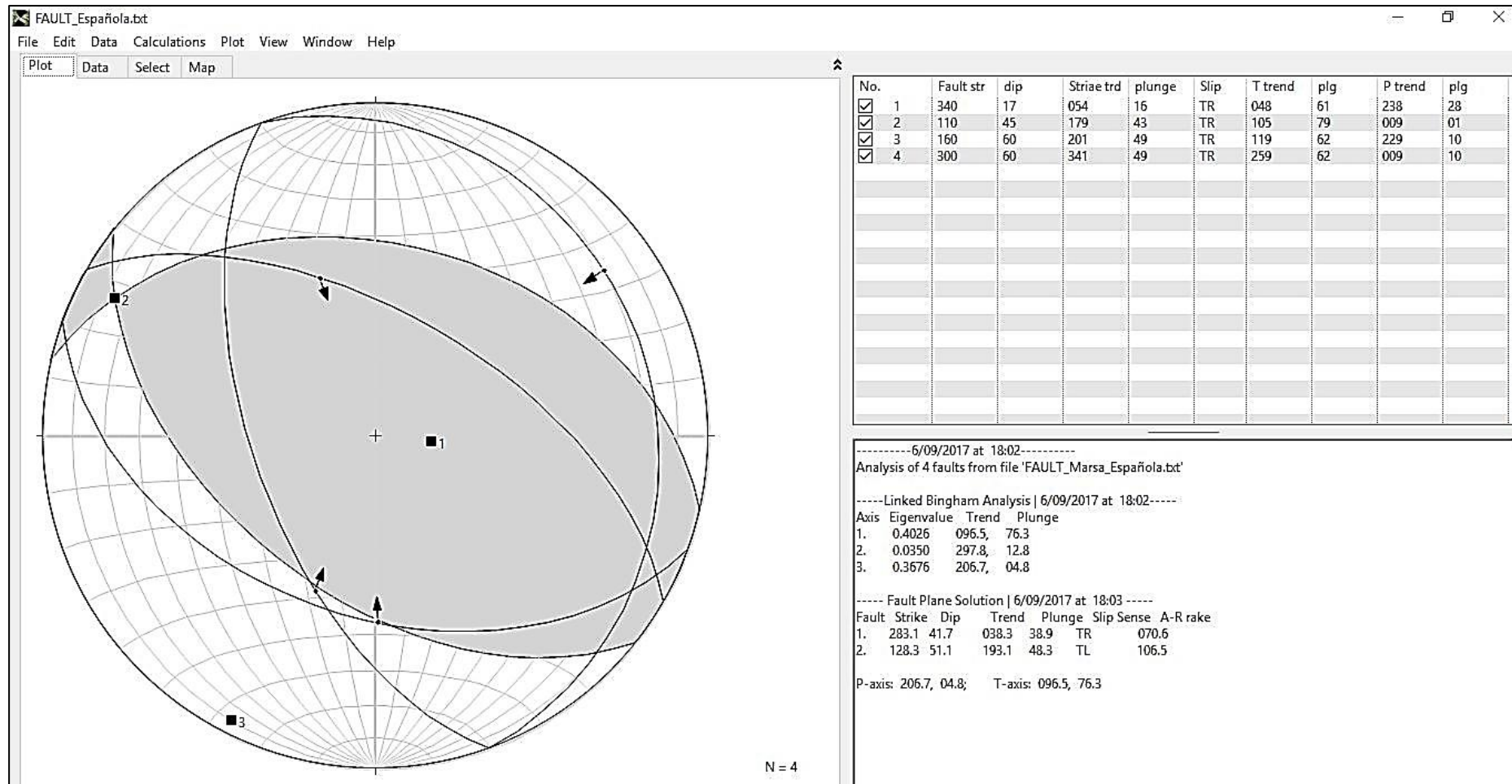


Figura 30. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos falla Española.

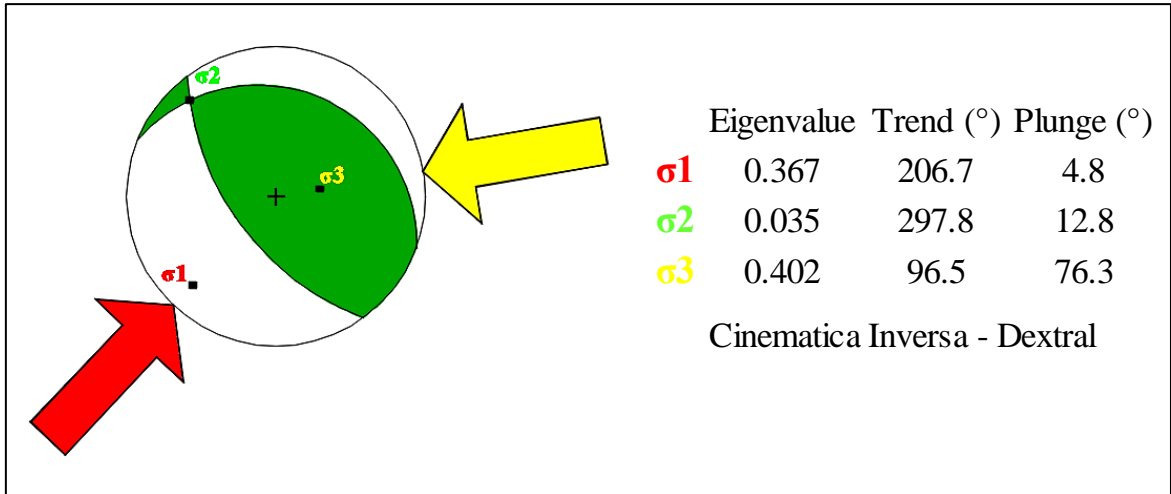


Figura 31. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla Española. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento

Fault Plane Solution						
Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1	283.1	41.7	38.3	38.9	TR	70.6
2	128.3	51.1	193.1	48.3	TL	106.5
P-Axis	206.7/4.8		T-Axis	96.5/76.3		

Tabla 2. Resultados obtenidos de la Falla Española en el Software FaultKin

4.2.2. Falla Patrick-1

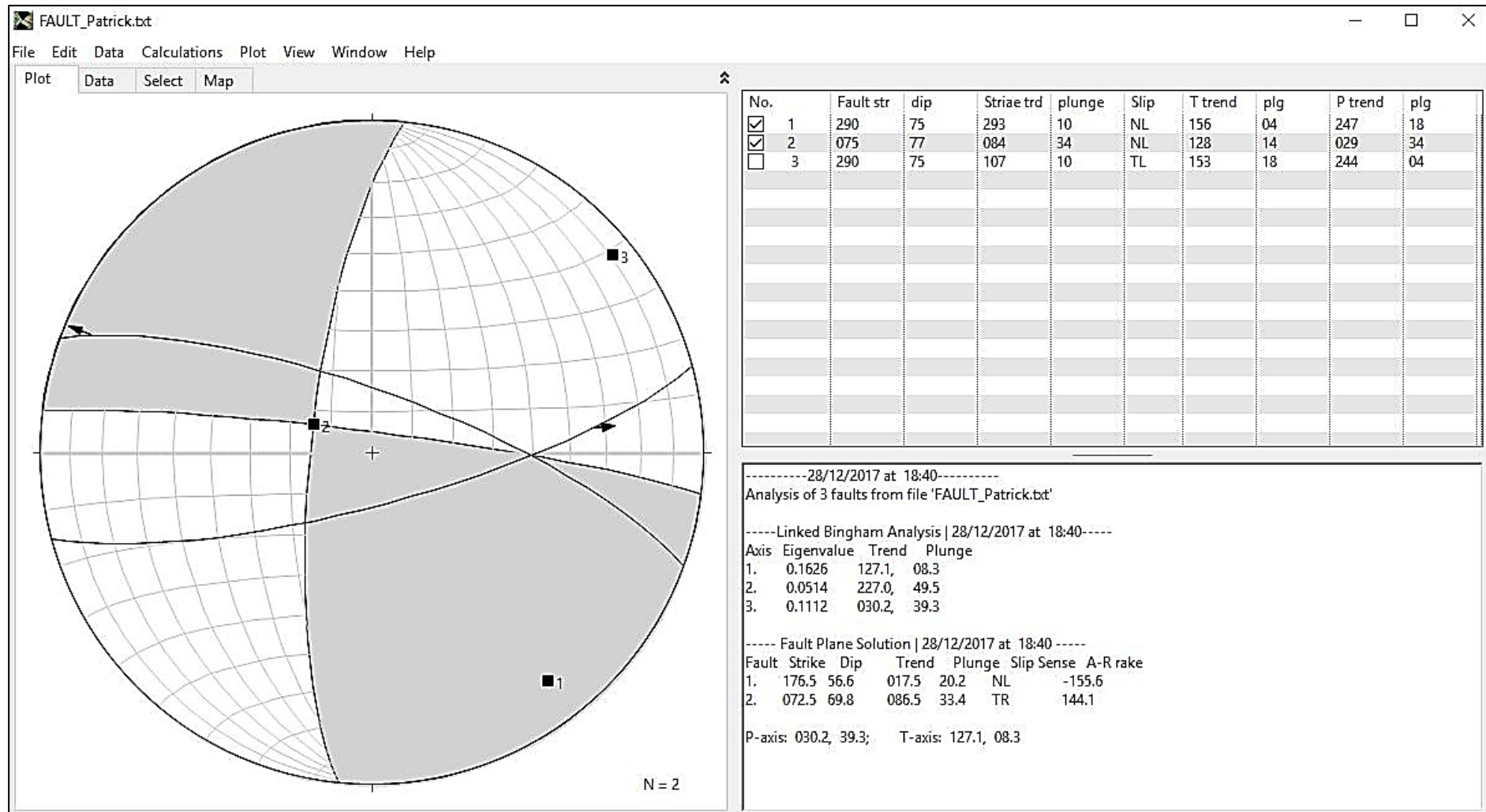


Figura 32. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla Patrick-1.

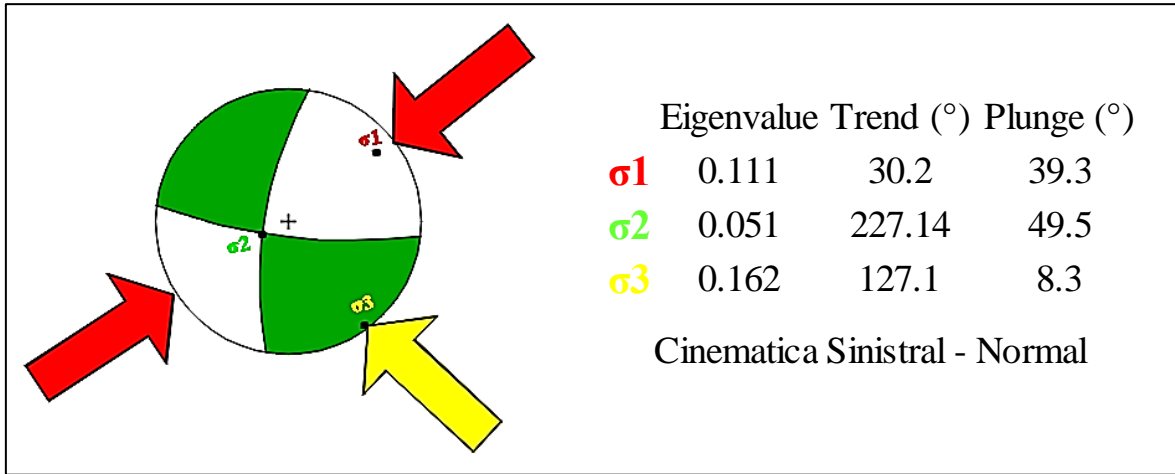


Figura 33. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla Patrick-1. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento.

Fault Plane solution						
Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1	176.5	56.6	17.5	20.2	NL	-155.6
2	72.5	69.8	86.5	33.4	TR	144.1
P-Axis	30.2/39.3		T-Axis	127.1/8.3		

Tabla 3. Resultados obtenidos de la Falla Patrick-1 en el Software FaultKin

4.2.3. Falla chilcas

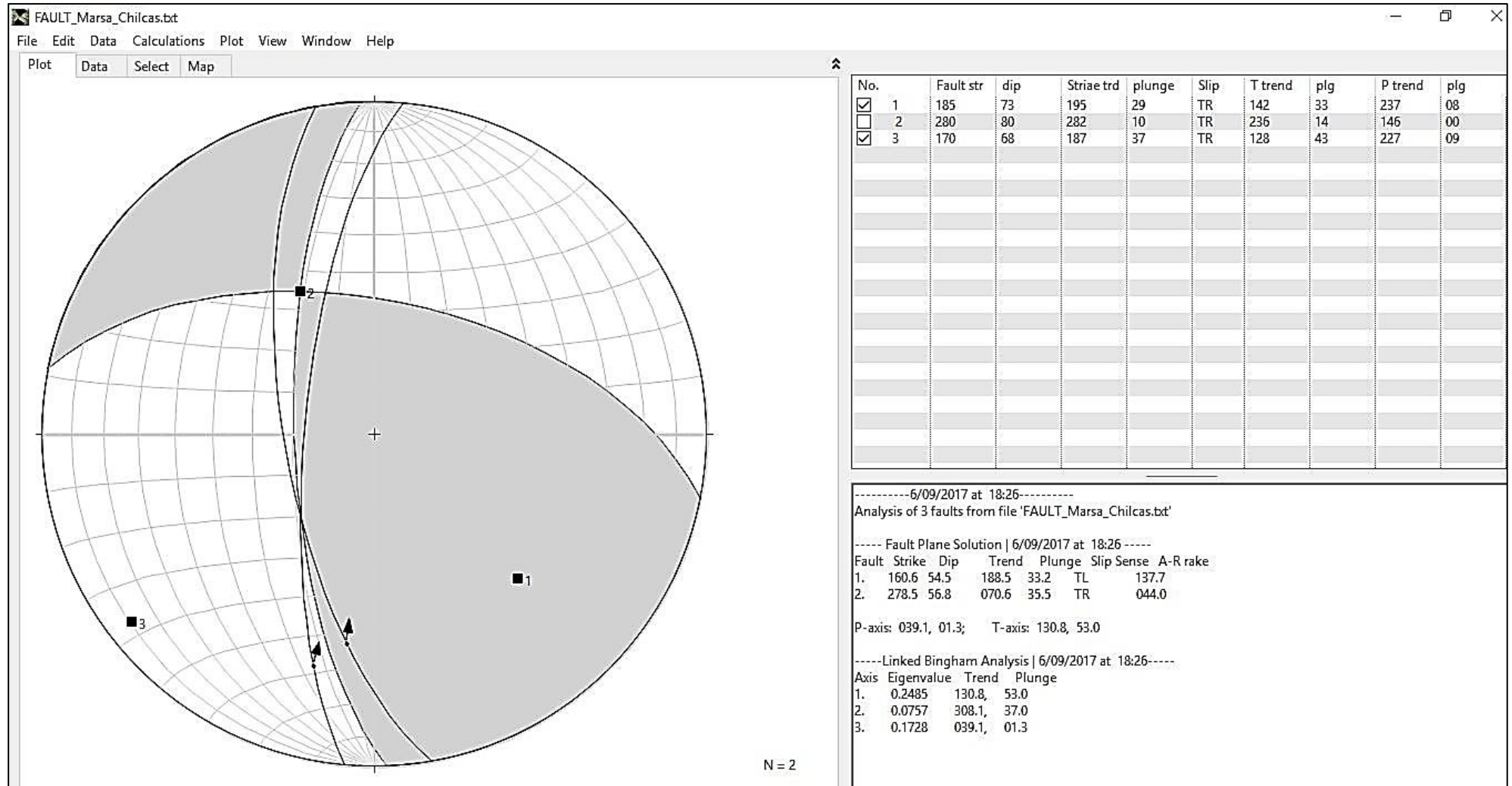


Figura 34. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla Chilcas

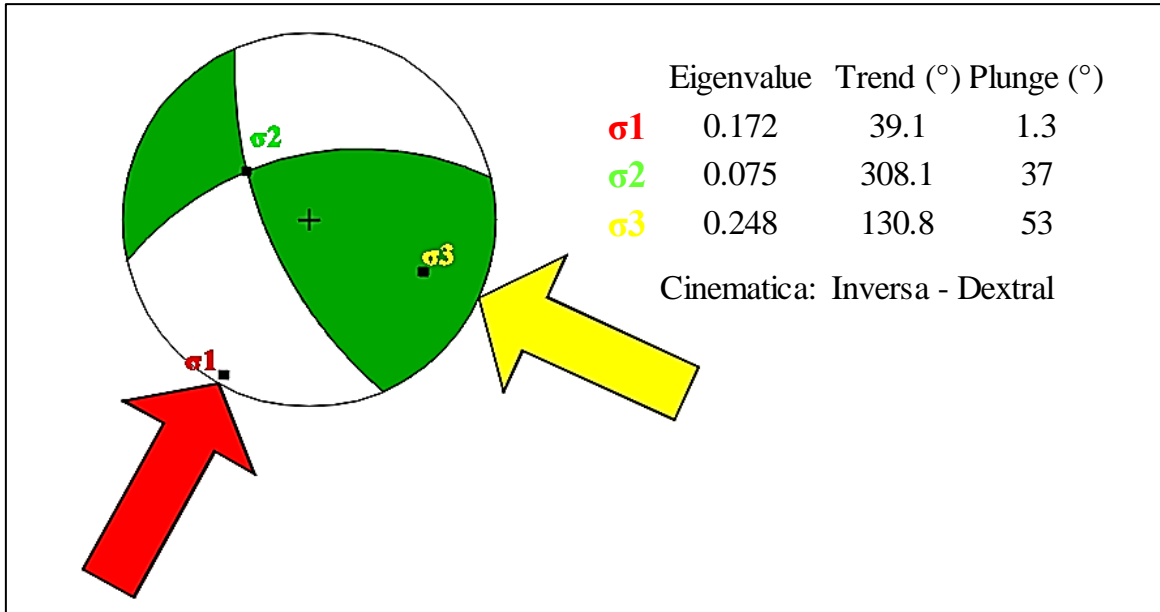


Figura 35. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla Chilcas. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento.

Fault Plane Solution						
Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1	160.6	54.5	188.5	33.2	TL	137.7
2	278.5	56.8	70.6	35.5	TR	44.0
P-Axis	39.1/1.3		T-Axis	130.8/53		

Tabla 4. Resultados obtenidos de la Falla Chilcas en el Software FaultKin

4.2.4. Falla los loros

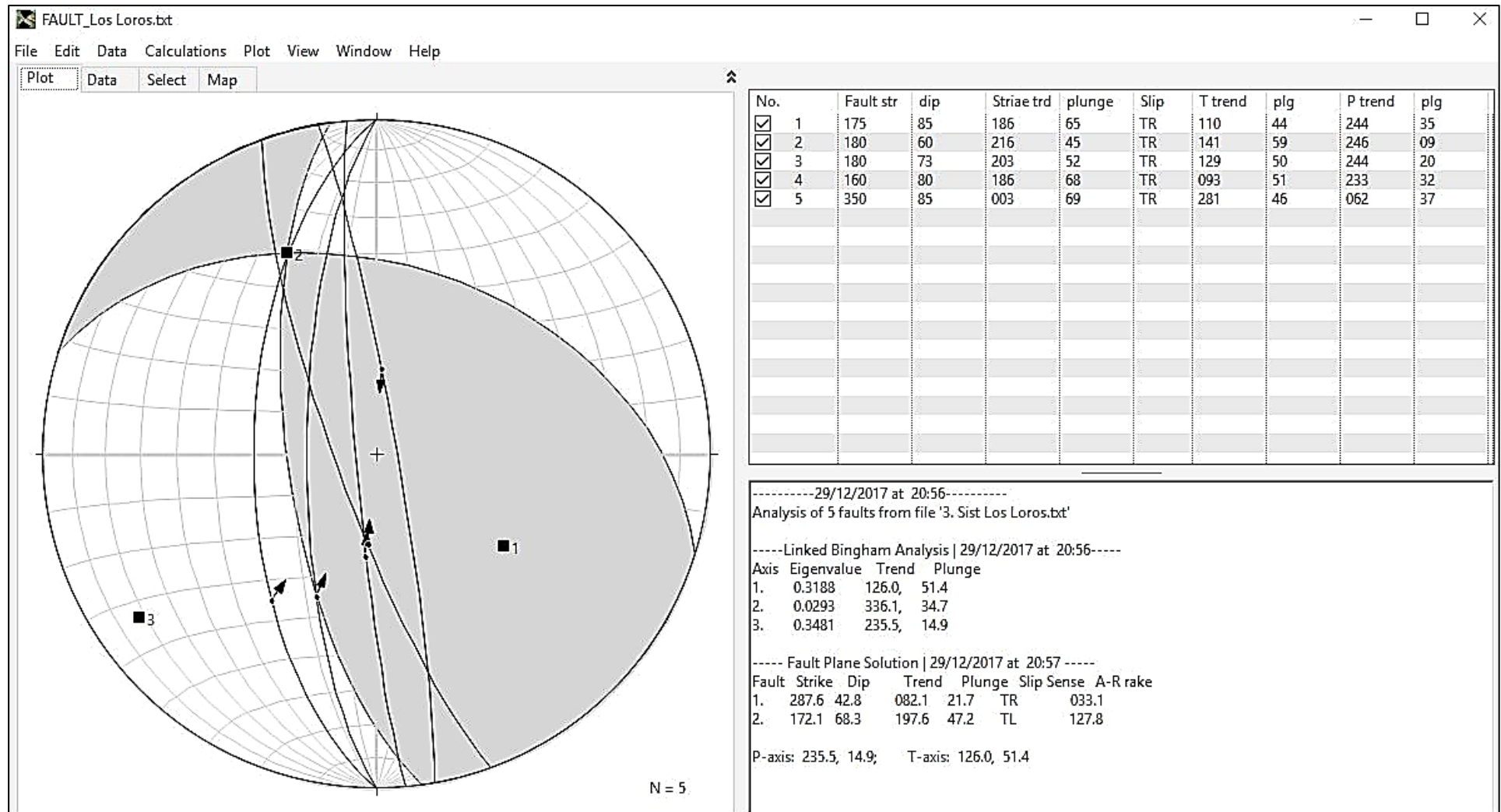


Figura 36: Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla Loros

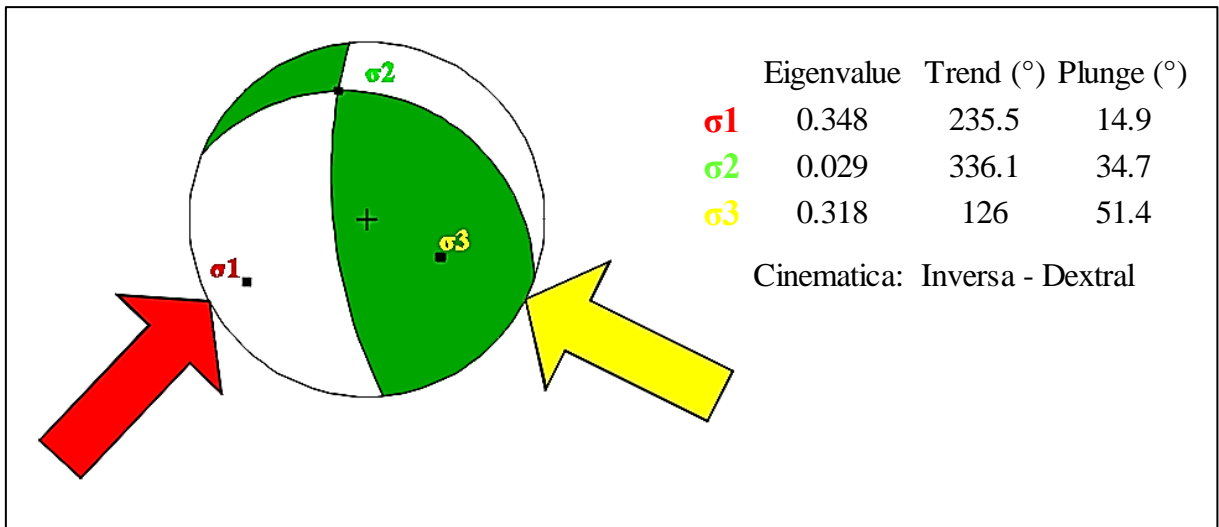


Figura 37. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla los Loros. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento

Fault Plane Solution						
Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1	287.6	42.8	82.1	21.7	TR	33.1
2	172.1	68.3	197.6	47.2	TL	127.8
P-Axis	235.5 / 14.9		T-Axis	126 / 51.4		

Tabla 5. Resultados obtenidos de la Falla los Loros en el Software FaultKin.

4.2.5. Falla EW 2

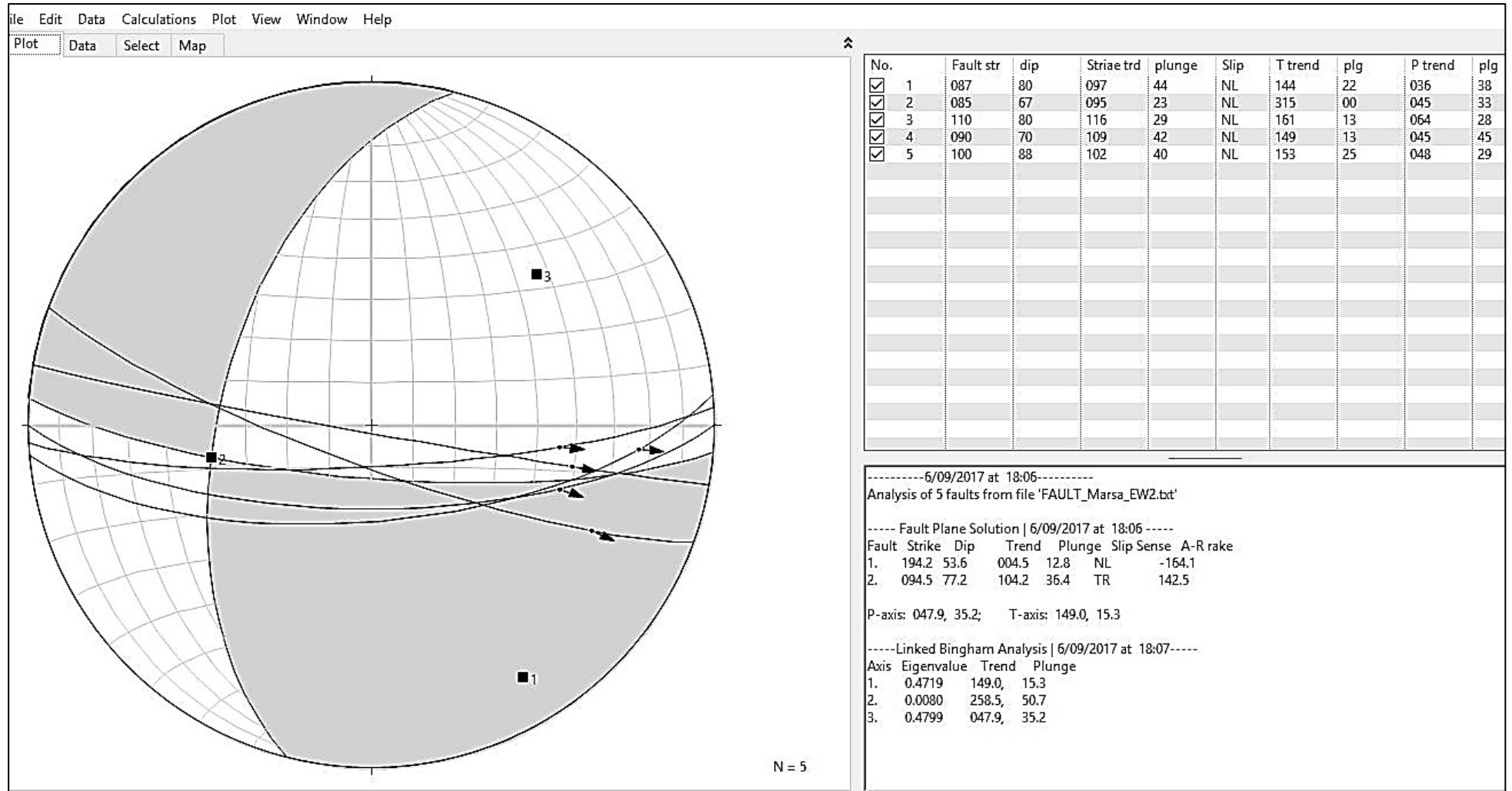


Figura 38. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla EW 2.

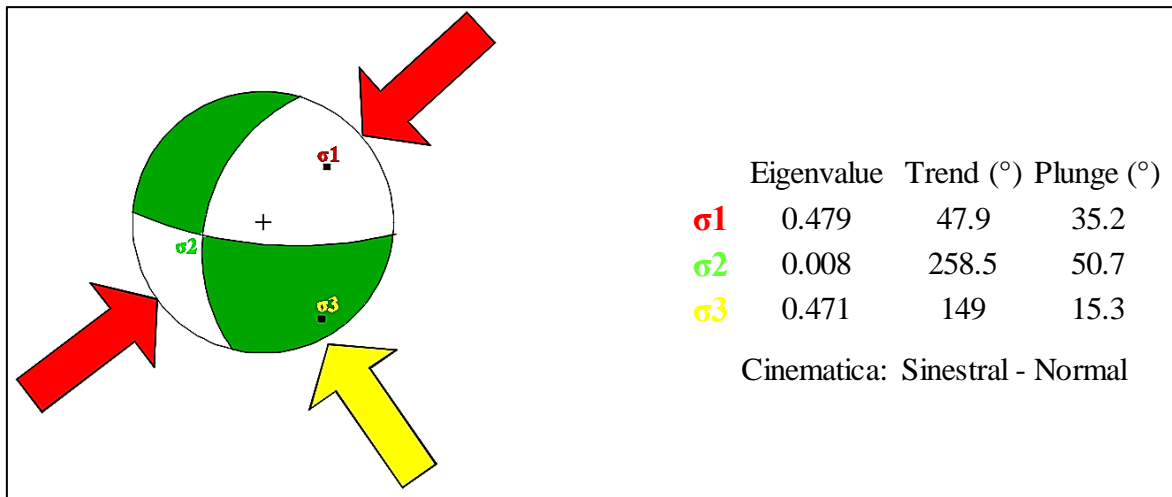


Figura 39. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla EW 2. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento.

Fault Plane Solution						
Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1	194.2	53.6	4.5	12.8	NL	-164.1
2	94.5	77.2	104.2	36.4	TR	142.5
P-Axis	47.9 / 35.2		T-Axis	149 / 15.3		

Tabla 6. Resultados obtenidos de la Falla los EW 2 en el Software FaultKin.

4.2.6. Falla NW2

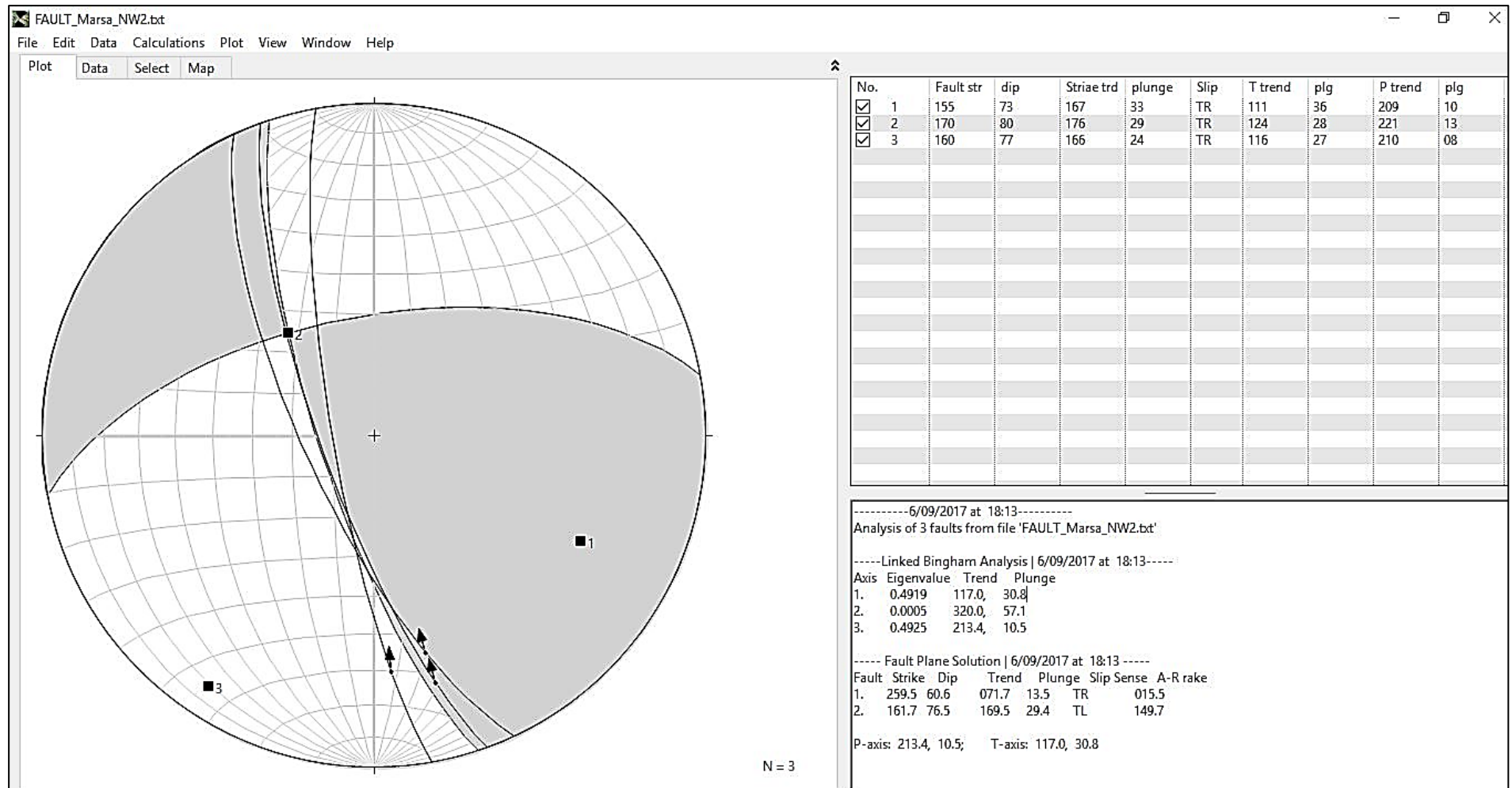


Figura 40. Plot estereográfico y distribución de los planos para todos los datos Falla NW 2.

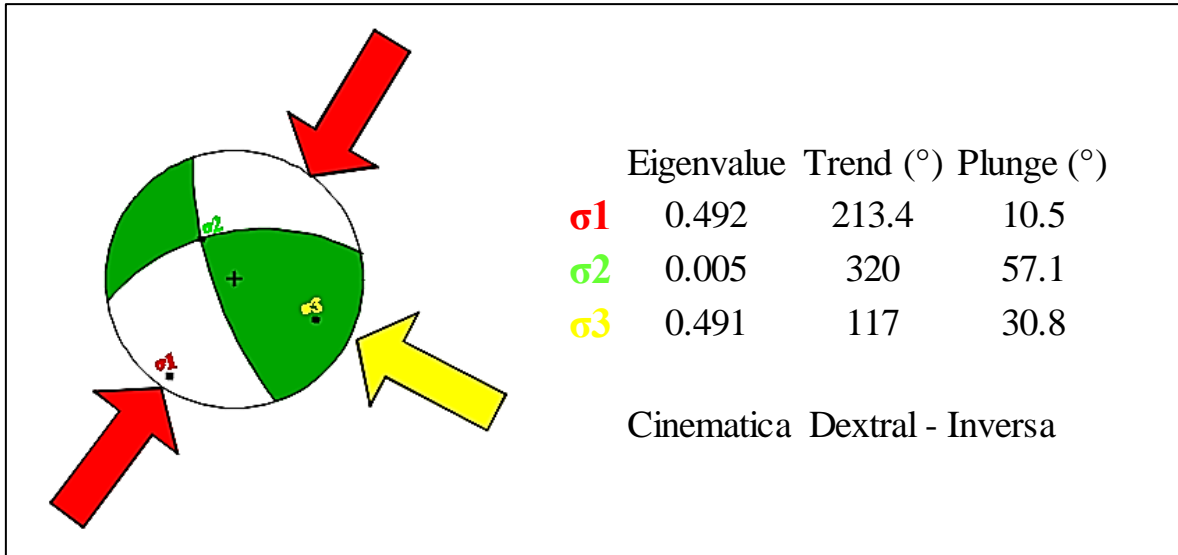


Figura 41. Plot estereográfico con la solución de la cinemática de la Falla NW 2. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento

Fault Plane Solution						
Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1	259.5	60.6	71.7	13.5	TR	15.5
2	161.7	76.5	169.5	29.4	TL	149.7
P-Axis	213.4 / 10.5		T-Axis 117 / 30.8			

Tabla 7. Resultados obtenidos de la Falla los NW 2 en el Software FaultKin.

4.2.7. Análisis conjunto de todas las fallas.

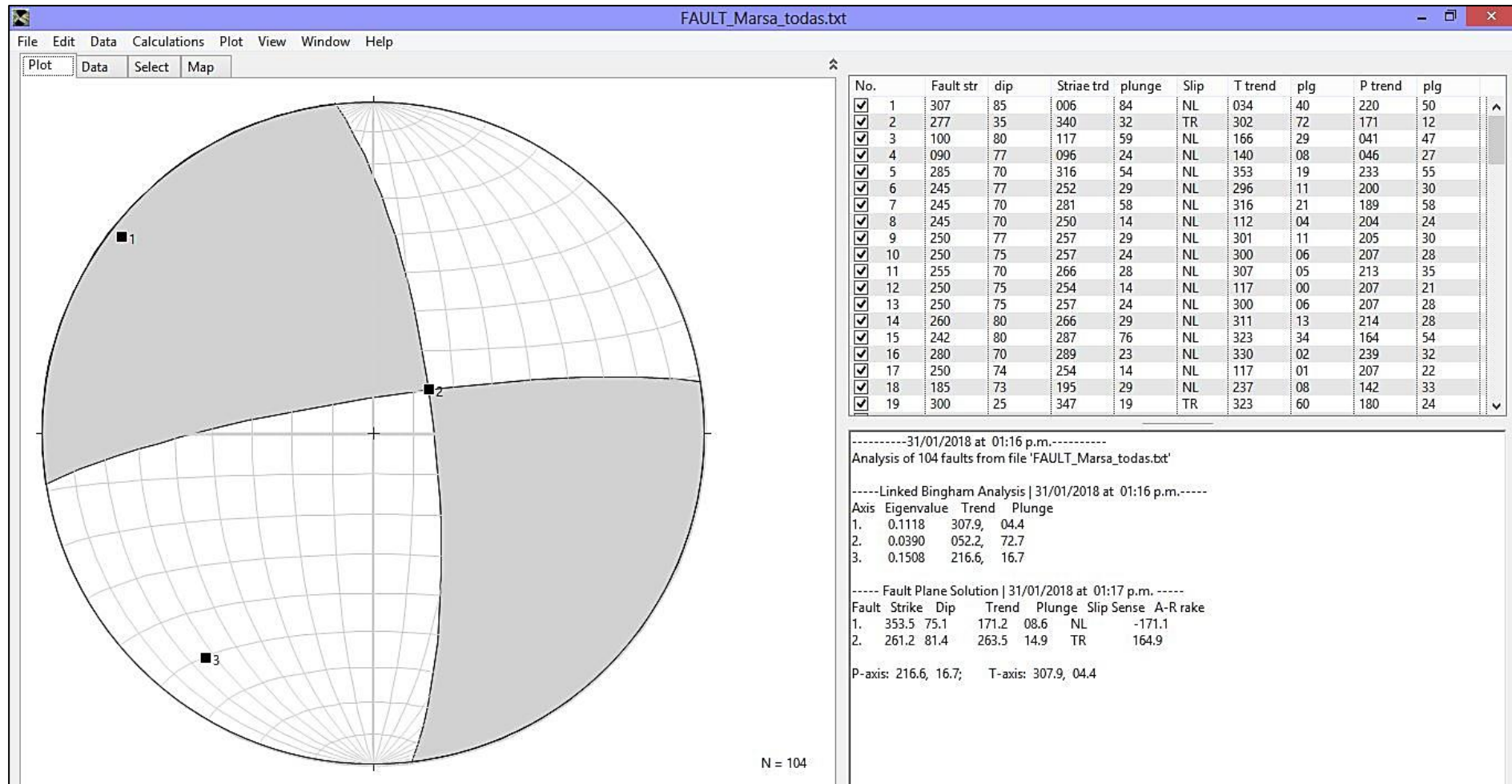


Figura 42: Plot estereográfico de todas las fallas analizadas

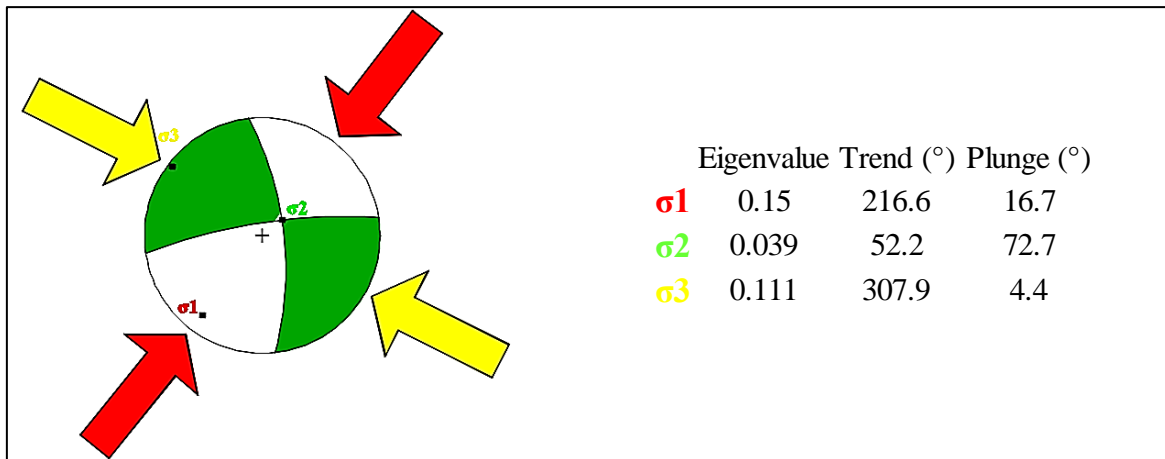


Figura 43. Plot estereográfico con la solución de la todas las fallas. En blanco los cuadrantes de acortamiento y en verde los cuadrantes de estiramiento.

Fault Plane Solution						
Fault	Strike	Dip	Trend	Plunge	Slip Sense	A-R rake
1	353.5	75.1	171.2	8.6	NL	-171.1
2	261.2	81.4	263.5	14.9	TR	164.9
P-Axis	216.6 / 16.7		T-Axis	307.9 / 04.4		

Tabla 8. Resultados obtenidos de todas las fallas en el Software FaultKin

4.3. Contrastación de la hipótesis

En el caso de las zonas de falla se procesaron datos con indicadores cinemáticos confiables (escalones y medias lunas). El procesamiento se realizó separando datos correspondientes a los sistemas y zonas de falla.

Las zonas de falla Española, Los Loros y NW forman una familia cuyo eje de acortamiento es N 215° y cinemática inversa dextral, coincidente con el patrón de deformación pre-mineral.

Los ejes de acortamiento y estiramiento de las zonas de falla EW2 y Patrick se encuentran en los mismos cuadrantes, la dirección de acortamiento promedio es N46° y estiramiento N147°, con cinemática sinistral normal.

Del análisis se desprende que, aunque las zonas de fallas tengan la misma disposición no obedecen a los mismos regímenes de deformación.

Sin embargo se puede observar en el análisis que el esfuerzo principal mayor está orientado NE a SW con un ángulo promedio de inclinación de 16 grados.

FALLA	Estructura	Cinemática	Eje P (σ_1)		Eje T (σ_3)	
			Tren ($^\circ$)	Plunge ($^\circ$)	Tren ($^\circ$)	Plunge ($^\circ$)
	Española	TR	207	5	96	76
	Patrick	LN	30	39	127	9
	Chilcas	RT	39	2	130	53
	Los loros	TR	235	15	126	51
	EW 2	LN	47	35	149	15
	NW 2	RT	213	10	117	30
Todas las fallas			217	17	307	4

Tabla 9. Ejes de acortamiento y estiramiento estimados para las fallas analizadas (T: Inversa; N: Normal; R: Dextral; L: Sinistral)

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se analizó 6 fallas principales Española, Patrick, Chilcas, Loros, EW2 y NW2, Nv. 2670, además de un análisis conjunto de ellas, mediante el uso del software faultkin.

El ángulo de los esfuerzos principales de cada una de las fallas del Nv. 2670, en base a la proyección estereográfica y análisis numérico se muestran en la tabla N° 9.

Los resultados revelan que las zonas de falla Española, Los Loros y NW2 forman una familia cuyo esfuerzo principal (sigma σ_1) es N 215° y cinemática inversa dextral

Los ejes del esfuerzo principal (sigma σ_1) y mínimo (sigma σ_3) de las zonas de falla EW2 y Patrick se encuentran en los mismos cuadrantes, su dirección promedio es N 46° y N 147°, con cinemática sinistral normal.

Los esfuerzos principales constituidos por los fallamientos normales, inversas y de rumbo Nv. 2670 tienen direcciones NW – SE teniendo esfuerzos andinos.

Elaboró plano del comportamiento estructural del Nv. 2670, con Plots estereográficos con las soluciones a la cinemática de las principales zonas de falla en el corredor H.

Realizó el Plots estereográficos de cada una de las fallas principales del Nv 2670, en blanco esfuerzo principal σ_1 y en verde esfuerzo mínimo sigma σ_3 .

5.2. RECOMENDACIONES.

Realizar interpretaciones en cada nivel de la unidad minera, con el fin de correlacionarlo y tener un modelo estructural general del yacimiento.

Realizar el análisis cinemático de todas las fallas principales y secundarias de todos los corredores del yacimiento.

Realizar un modelamiento geomecánico para determinar la deformación de las excavaciones en relación a los esfuerzos principales calculados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVAREZ, P. y. (1994). Síntesis Estratigráfica del Cretáceo y Paleógeno de la Cuenca Oriental DEL Perú. *Petroperú*.
- Arellano, J. (2004). LA correlacion estratigrafica.
- Babin, R. (2010). *Problemas de Geología Estructural*. Madrid.
- BAZÁN, O. (2014). TECTONICA ANDINA Y SU COMPONENTE CIZALLANTE. *Universidad Nacional de Cajamarca*.
- BENAVIDES, V. (1956). *Nota preliminar sobre la Geología de Cajamarca*. Lima.
- Bongiorno. (2011). Determinacion de los esfuerzos principales a traves de analisis numerico y proyecciones estereograficas de la falla de Boconó en es sectopr de Yacانبú Estado Lara.
- Caballero, C. (2012). Medición de Columnas Estrtigraficas.
- CASAS, M. (1990). Los Métodos de Análisis de Paleoesfuerzos a partir de Poblaciones de Fallas: Sistemática y Técnicas de Aplicación.
- Corzo, R. (2004). Medicion y Evaluacion de la Magnitud y Direccion de los Esfuerzos in-situ en Campo.
- Etienne, J. (1990). Evolución de la margen andina en el norte de Perú desde el aptiano superior hasta el senoniano. *Sosiedad Geologica del Perú.*, 81, 3-13.
- FERNÁNDEZ, H. (2010). Estudio Sedimentológico y Estratigráfico en el Área de Cruz Blanca y Alrededores. 12. Recuperado el Abril de 2016
- INGEMMET. (s.f.). Boletin 31. 2009.
- JACAY, J. (2005). ANÁLISIS DE LA SEDIMENTACIÓN DEL SISTEMA CRETÁCEO DE LOS ANDES DEL PERÚ CENTRAL. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, v.08, 11.
- JAILLARD, E. (1990). Evolucion de la Margen Andina en el Norte del Perú desde el Aptiano superior hasta el Senomaniano. *Sociedad Geológica del Perú*.
- JAILLARD, E. (1992). La Fase Peruana (Cretáceo Superior) en la Margen Peruana. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*.

- LAGOS, A y QUISPE, Z. (2007). Aportes al análisis de Cuencas Sedimentarias en los Alrededores de las localidades de los Baños del Inca, Cruz Blanca, Otuzco, Distrito de Cajamarca. 7-12.
- MEDINA, S. (2014). Estratigrafía Secuencial de la Formación Yumagual en el distrito minero de Hualgayoc- Cajamarca.
- Nicols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy* (2 ed ed.). UK, Estados Unidos: Garsington Road. Recuperado el 24 de abril de 2016
- Philips, F. (1971). La Aplicación de la Proyección en la Geología Estructural.
- REYES, L. (1980). Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. *INGEMEET*, 82.
- RIVAS, P. (2014). Caracterización Sediementológica y Estratigráfica del Cretáceo en el Área de Huayllapampa, Cajamarca-Perú. 12. Recuperado el Abril de 2016
- ROBERT, E. J. (2002). LA TRANSGRESIÓN ALBIANA EN LA CUENCA ANDINA (PERÚ CENTRAL - ECUADOR) : MODELO GENERAL Y DIACRONISMO DE LOS DEPÓSITOS MARINOS. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 94 (2002) p. 7-*, p. 7.
- TAFUR, I. (1950). *Nota preliminar sobre la Geología de Cajamarca*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Cajamarca. Recuperado el 26 de abril de 2016
- TERRONES, L. (2014). Cajamarca, Estudio Litológico y Paleontológico de la Formación Yumagual en el Distrito de. 10. Recuperado el 25 de Abril de 2016
- Vera Torres, J. (1994). *Estratigrafía: Principios y Métodos* (1 ed.). Rueda.

ANEXOS

1. Plano de ubicación
2. Plano geológico regional
3. Plano geológico local.
4. Plano geología estructural.
5. Sección N13600
6. Proyecciones estereográficas.