



Smithsonian Tropical Research Institute



**SECCIONES ESTRUCTURALES EN ZONAS DEL PROYECTO DE RESCATE
PALEONTOLOGICO ASOCIADOS A AREAS DE EXPANSION DEL CANAL DE
PANAMA (REGION GAMBOA-ESCLUSAS DE PEDRO MIGUEL, PANAMA)**

SERGIO MUÑOZ RUBIANO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2009**





Smithsonian Tropical Research Institute



**SECCIONES ESTRUCTURALES EN ZONAS DEL PROYECTO DE RESCATE
PALEONTOLOGICO ASOCIADOS A AREAS DE EXPANSION DEL CANAL DE
PANAMA (REGION GAMBOA-ESCLUSAS DE PEDRO MIGUEL, PANAMA)**

SERGIO MUÑOZ RUBIANO

TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE GELOGO

**Director tesis
CAMILO MONTES
Geólogo PHD
SMITHSONIAN TROPICAL RESEARCH INSTITUTE
CIUDAD DE PANAMA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2009**





DEDICATORIA

A Dios, porque con su iluminación y sabiduría me permitió llevar a cabo el desarrollo de este proyecto.

A toda mi familia, que con su apoyo me dio fortaleza en los momentos difíciles.

A Camilo Montes, quien con su apoyo y consejos permitieron mejorar mis capacidades como geólogo.

A Martha Maria, por su apoyo y consejo en todo momento.

A todas las personas que colaboraron en la elaboración del proyecto.



AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar el más profundo agradecimiento a mi familia, agradezco a la mejor escuela de Geología en Colombia, la Escuela de Geología de la Universidad Industrial De Santander por brindarme la oportunidad de hacer parte de ella, a cada uno de los profesores por su inmensa sabiduría, a todos los que colaboraron con la elaboración del proyecto.

Al personal del Smithsonian Tropical Research Institute y todo su calificado equipo de trabajo (Sara, Jan Michel, Nikky, David, Aldo, Luque, Camila, Sandra, Miller, Diana Paola (Geóloga UIS) y todos aquellos que directa o indirectamente hicieron parte de esta grandiosa aventura); en especial al Geologo Phd. Camilo Montes, director del proyecto, por su constante apoyo y dedicación en la realización de este trabajo.

A los calificadores de este proyecto, porque con sus consejos permitieron llevar mejorar el desarrollo del mismo.



RESUMEN

SECCIONES ESTRUCTURALES EN ZONAS DEL PROYECTO DE RESCATE PALEONTOLOGICO ASOCIADOS A AREAS DE EXPANSION DEL CANAL DE PANAMA (REGION GAMBOA-ESCLUSAS DE PEDRO MIGUEL, PANAMA)*

SERGIO MUÑOZ RUBIANO**

Palabras Claves: Rocas volcanosedimentarias, Secciones estructurales, análisis cinemático, Corte culebra

El estudio realizado presenta nuevos datos sobre un sector poco conocido del Canal de Panamá localizado sobre el corte Culebra, ubicado dentro de la cuenca del Canal de Panamá, en formaciones que presentan litologías de rocas de tipo volcánicas y sedimentarias. Se observaron direcciones preferenciales de planos de falla (N61°E, 57°SE), estrías de falla (N24°E, 47°SE) y venas asociadas a fallas (N73°E, 63°SE). Se determinó que el estilo estructural encontrado corresponde a un fallamiento de tipo normal en pliegues sinclinales amplios con el bloque colgante cayendo en dirección sureste. A partir de la elaboración de secciones estructurales con los datos recolectados en campo, se logró determinar los espesores para la Formación Bas Obispo (345 m), Formación Las Cascadas (125 m) y Formación Culebra (142 m), en la zona estudiada.

Por medio de la elaboración del análisis cinemático de las formaciones en estudio, se determinó la ocurrencia de un movimiento de cuerpo rígido que causa rotación en las formaciones lo cual explica anomalías presentadas en las relaciones entre fallas inversas y fallas normales. Se encontraron nuevos fósiles como: Dientes de Cocodrilo, Mandíbula de Oreodontidae y molares de Protoceratidae, principalmente en el tope de la Formación Cascadas, y Semillas de Annonacea, Semillas de Myristicacea, corales, evidencias de alta bioturbación y dientes de tiburón en la Formación Culebra.

* *Proyecto de grado*

** *Facultad de Ciencias Fisicoquímicas, escuela de Geología, Director: Camilo Montes.*



ABSTRACT

STRUCTURAL SECTIONS IN ZONES OF THE PROJECT OF PALEONTOLOGICAL RESCUE ASSOCIATED TO EXPANSION AREAS FROM THE PANAMA CANAL (GAMBOA ZONE TO PEDRO MIGUEL LOCKS, PANAMA) *

SERGIO MUÑOZ RUBIANO**

Key Words: Volcano-clastic rocks, structural Sections, kinematic analysis, Galiard cut.

This study presents new data about an understudied zone of the Panama Canal, in to the Culebra Cut, in the Panama Canal basin, with lithologies on volcanic and sedimentary rocks. Preferential directions of fault planes ($N61^{\circ}E$, $57^{\circ}SE$), fault striaes ($N24^{\circ}E$, $47^{\circ}SE$) and veins associate to faults ($N73^{\circ}E$, $63^{\circ}SE$) were observed. The structural style found corresponds to normal faulted in wide synclinal folds with the hanging wall falling down in Southeast direction. The structural style found corresponds to normal faulted in wide synclinal folds with the hanging wall falling down in Southeast direction. With the field data, were elaborated three structural sections, from this structural sections the thickness for the Bas Obispo Formation (345 m), Formation Las Cascades (125 m) and Formation Culebra (142 m) were determinate.

The elaboration of the kinematic analysis determines the occurrence of a movement of rigid body that causes rotation in the formations which explains anomalies displayed in the structural data, principally in the relation between the normal faults and inverse faults. Were new fossils like: Teeth of Crocodile, Jaw of Oreodontidae and molars of Protoceratidae, in the Cracked top of the Las Cascadas Formation, and Seeds of Annonacea, Seeds of Myristicacea, corals and teeth of shark in the Culebra Formation.

* Undergraduate Thesis

** Faculty of Physic-Chemistry Engineering, school of Geology, Director: Camilo Montes



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GENERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. METODOLOGÍA	4
3.1. ETAPA 1: ETAPA DE PRECAMPO	4
3.2.1 Descripción de la metodología de trabajo de campo	5
3.3 ETAPA 3: TRABAJO DE OFICINA	5
3.2.2 Descripción de la metodología de trabajo de oficina	8
4. MARCO TEORICO	15
4.1 FUNDAMENTOS DE GEOLOGIA ESTRUCTURAL	15
4.1.1 Fallas.	15
4.1.1.1 Conceptos básicos de fallas	15
4.1.2 Creación y movimiento de las fallas	18
4.1.2.1 Conceptos basicos de fallas	18
4.1.2.2 Estructuras de Tipo Convergente	20
4.1.2.3 Fallas Planares Rotadas	21
4.1.2.4 Fallas Normales de Bajo Angulo	22
4.1.2.5 Duplexes y estructuras en flor	22
4.2 ZONAS DE CIZALLA	24
4.3 CRITERIOS TEORICOS DE FRACTURACION DE COULOMB Y GRIFFITH	27
4.4 FUNDAMENTOS DEL ANALISIS CINEMATICO	28
4.4.1 Deformaciones del Cuerpo Rígido	30
4.4.2 Esfuerzo (Deformación de Cuerpos No Rígidos)	30
4.4.3 Aspectos de un sistema de deformación.	31
4.4.4 Medida de la deformación:	32
4.5 ROCAS VOLCANOCLÁSTICAS	33
4.5.1 Conceptos generales.	33
5. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO	40
5.1 GENERALIDADES DEL PROYECTO DE RESCATE PALEONTOLOGICO	40
5.2 LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO	42
5.3 MARCO TECTONICO REGIONAL	44
5.4 ESTRATIGRAFIA REGIONAL	46
5.5 ANTECEDENTES	48
6. ESTRATIGRAFIA DEL AREA DE ESTUDIO	50
6.1 FORMACIÓN BAS OBISPO	52



6.2 FORMACION CASCADAS	54
6.3 FORMACION CULEBRA	57
7. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	66
7.1 FORMACIÓN BAS OBISPO	66
7.2 FORMACION CASCADAS	71
7.2 FORMACIÓN CULEBRA	74
7.4 SECCIONES ESTRUCTURALES DE LAS FORMACIONES EN ESTUDIO	78
7.4.1 Sección estructural formación Bas Obispo.	79
7.4.2 Seccion Estructural Formación Las Cascadas	81
7.4.3 Seccion Estructural Formación Culebra	83
8. ANALISIS CINEMATICO	85
8.1 ANALISIS CINEMATICO FORMACION BAS OBISPO	85
8.2 ANALISIS CINEMATICO FORMACION LAS CASCADAS	106
8.3 ANALISIS CINEMATICO FORMACION CULEBRA	109
8.4 CONCLUSIONES DEL ANALISIS CINEMATICO	113
9. ASPECTOS PALEONTOLOGICOS DEL AREA DE ESTUDIO	114
9.1 FOSILES DE LA FORMACIÓN LAS CASCADAS:	115
9.2 FOSILES DE LA FORMACIÓN CULEBRA:	118
10. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA	124
10.1 RESULTADOS	125
11. CONCLUSIONES	126
12. RECOMENDACIONES	128
13. BIBLIOGRAFÍA	129
14. ANEXOS	131



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Esquema para la toma de datos de lineaciones en campo. Modificado de Goldstein y Marshack. (2004)	7
FIGURA 3.2: Lineaciones observadas en campo, las cuales se midieron durante la investigación en curso	7
FIGURA 3.3: Lineaciones observadas en campo, las cuales se midieron durante la investigación en curso	8
FIGURA 3.4: Diagrama de densidad de estrias de falla para la formación Bas Obispo.	9
FIGURA 3.5: Mapa georeferenciado, con la ubicación de las zonas donde se recolectaban datos. Consta de 8 afloramientos.	10
FIGURA 3.6: Datos de el contacto (Lineas rojas) Fallado de la Formación Cascadas con la Formación Culebra.	10
FIGURA 3.7: Proyección de los buzamientos reales en un mapa a una línea de sección vertical, utilizando la línea de rumbo de cada dato estructural. Modificado de Modificado de Goldstein y Marshack. (2004)	11
FIGURA 3.8: Tabla de conversión de los buzamientos reales en un mapa a buzamientos aparentes en un corte. Modificado de Modificado de Goldstein y Marshack. (2004)	11
FIGURA 3.9: Dibujo de campo para el afloramiento 0 de la formación Bas Obispo.	12
FIGURA 3.10: Capas guía de la formación Baso Obispo usadas en la elaboración de las secciones estructurales.	12
FIGURA 3.11: Miembro Calizas Emperador, capas guía de la formación Culebra, usadas en la elaboración de las secciones estructurales.	13
FIGURA 4.1: Clasificación dinámica Andersoniana de las fallas. 1, 2, 3: vectores de compresión s 1,2, 3. Tomada de McClay (1987).	14
FIGURA 4.2: Ejemplo de fallamiento normal de carácter lístrico en la región costa afuera de Nova Scotia. Modificado de Davis y Reynolds (1996).	15
FIGURA 4.3: Sistema tipo detachment extensional. Wernicke (1985).	15
FIGURA 4.4: Clasificación de las fallas en función del sentido de deslizamiento. Modificado de Davis y Reynolds (1996).	17
FIGURA 4.5 : Teoría de fracturación de Anderson, modificado de Martínez 2003.	19
FIGURA 4.6: Relación de las diaclasas con fallas normales, inversas y de desgarre. modificado de Martínez 2003	20
FIGURA 4.7: rotaciones observadas en los movimientos de los rift modificado de Martínez 2003	21
FIGURA 4.8: Ecuación para calcular extensión horizontal, modificado de Martínez 2003	22
FIGURA 4.9: Fallas normales de bajo ángulo, modificado de Martínez 2003	22
FIGURA 4.10 : Estructuras tipo flor negativa (A) y flor positiva (B). Woodcock y Fischer (1986)	24
FIGURA 4.11: Zona de cizalla, Formación Bas Obispo.	26
FIGURA 4.12: Esquema de una gran zona de cizalla y rocas asociadas. Transición dúctil-frágil en líneas verticales. Simplificada de Sibson (1977).	27
FIGURA 4.13: Planos de fractura y su relación con los esfuerzos principales. A la derecha, proyección estereográfica de las fracturas y esfuerzos principales. Modificado de Martínez 2003.	28



FIGURA 4.14: tipos de movimiento C: Objeto original, A: Traslación de cuerpo rígido, B: Rotación de cuerpo rígido, D: Deformación de cuerpo rígido por dilatación, E: Deformación de cuerpo rígido por distorsión. Modificado de Hache	29
FIGURA: 4.15 Trayectoria de desplazamiento de las partículas de un cuerpo.	30
FIGURA 4.16: Sentidos de rotación y ejes de los cuerpos, modificado de Martínez 2004.	30
FIGURA 4.17: Relación de deformación continua y discontinua. Modificado de Martínez 2004.	31
FIGURA 4.18: Aspectos de la deformación, 1) posición actual, 2) desplazamiento, 3) trayectoria, , 4) Trayectoria fechada.	32
FIGURA 4.19: Denominación de depósitos y rocas volcanoclasticas, modificado de: Tucker 2007	36
FIGURA 4.20: Clasificación de las rocas volcanoclasticas de acuerdo a los porcentajes de sus componentes	37
FIGURA 4.21: depósitos volcanoclasticos y epiclasticos, modificado de TUCKER (2007)	37
FIGURA 5.1: localización del área de estudio corte Culebra (Galliard cut), Ubicación de la misma dentro de la cuenca del canal de Panamá, Modificado de StewartStewart-CanalMap1980.	43
FIGURA 5.2: Mapa topográfico con la localización de el area de estudio (Canal de Panama), se señalan los afloramientos y su ubicación	44
FIGURA 5.3: mapa georeferenciado con la ubicación de los afloramientos	44
FIGURA 5.4: Localización de los principales bloques de Panamá.	45
FIGURA 5.5: Geología general de la cuenca del canal de Panamá.	46
FIGURA 5.6: Ubicación de la Microplaca de Panamá y las placas relacionadas.	47
FIGURA 5.7: Esquema de correlación litoestratigrafica de las secciones realizadas por Morón y Montes 2008.	49
FIGURA 6.1: Columna estratigrafica generalizada del area de estudio	51
FIGURA 6.2: Afloramientos correspondientes a la Formacion Bas-Obispo, Corte Culebra, Canal de Panamá.	52
FIGURA6.3: Afloramiento 3 de la formación Bas Obispo, se señalan los planos de estratificación observados en las tobas.	53
FIGURA 6.4: Afloramiento 4 de la formación Bas Obispo, se señalan los planos de estratificación observados en las tobas.	53
FIGURA 6.5: Tobas pertenecientes a la Formacion Cascadas	54
FIGURA 6.6: Tobas vitreo lítico cristalinas y presentan fragmentos mayores a 1cm	55
FIGURA 6.7. Fragmentos de texturas fibrosas mayores a 5cm de longitud	56
FIGURA 6.8: Contacto superior de la formacion Cascadas con la formacion Culebra, en rojo contacto Fallado, en amarillo contacto neto.	57
FIGURA 6.9 Coral cerebro fosil rodado, perteneciente a la base de la formación Culebra.	58
FIGURA 6.10: Formación Culebra, detalle de los miembros mas importantes	59
FIGURA 6.11. Presencia de Capas de Carbon en la formacion Culebra	60
FIGURA 6.12 . Presencia de Thalassinoides en la Formacion Culebra	61
FIGURA 6.13: Diente de tiburón.	62
FIGURA 6.14: Concreciones encontradas en la Formación Culebra	62
FIGURA 6.15: estratificación cruzada observada en la formacion Culebra	63
FIGURA: 6.16: Capas de arenas (Encerradas en líneas rojas) intercaladas con capas de lodolitas. Formación Culebra	64
FIGURA 7.1: Vena de Calcita rellenando una falla perteneciente a la Formacion Bas-Obispo, Afloramiento 5	65



FIGURA 7.2 Afloramiento 2 de la Formación Bas Obispo.	66
FIGURA 7.3: Diagrama de polos de datos de fallas para la formación Bas Obispo	67
FIGURA 7.4: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación BasObispo	68
FIGURA 7.5: Diagrama de polos de datos de cizallas para la formación Bas Obispo	68
FIGURA 7.6: Diagrama de polos de datos de estrias para la formación Bas Obispo	69
FIGURA 7.7: Representación estereografica de las fallas presentes en la Formacion Las Cascadas. se observa la tendencia de la orientación sur-este de los planos de Falla	70
FIGURA 7.8: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación Las Cascadas.	71
FIGURA 7.9: Diagrama de polos de datos de cizallas para la formación Las Cascadas.	71
FIGURA 7.10: Proyección estereográfica de los datos lineales recolectados en campo (Formación Las Cascadas)	72
FIGURA 7.11: representación estereográfica de las fallas presentes en la Formacion Culebra.	73
FIGURA 7.12: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación Culebra	73
FIGURA 7.13: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación Culebra	74
FIGURA 7.14: Proyección estereográfica de los datos lineales recolectados en campo (Formación Culebra).	75
FIGURA 7.15: Fotografía aérea del area de estudio con la ubicación de las secciones elaboradas	75
FIGURA 7.16: Sección estructural de la Formación Bas Obispo, correspondiente a 6 afloramientos. (Ver Anexo 3).	76
FIGURA 7.17: Sección estructural de la Formación Las Cascadas, (Ver anexo 4).	77
FIGURA 7.18: Anticlinal observado cerca de el contacto fallado entre la Formación Cascadas y la Formación Bas Obispo.	78
FIGURA 7.19: Sección estructural de la Formación Culebra, (Ver anexo 4).	78
FIGURA 7.20: Dibujos de campo de la formación Culebra en el sector conocido como lirio.	79
FIGURA 8.1: Diagrama de densidad de fallas la Formacion Bas Obispo para el Afloramiento 0	82
FIGURA 8.2: Representación estereografica de las fallas presentes en el afloramiento 0	82
FIGURA 8.3: Diagrama de densidad de polos de estrias de las fallas presentes en el afloramiento 0	83
FIGURA 8.4: Representación estereografica de las estrias de falla presentes en el afloramiento 0	83
FIGURA 8.5: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 0	84
FIGURA 8.6: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 0	84
FIGURA 8.7: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 1	85
FIGURA 8.8: Representación estereografica de las fallas presentes en el afloramiento 1	85
FIGURA 8.9: Diagrama de polos de estrias de las fallas presentes en el afloramiento 1	86
FIGURA 8.10: Diagrama de densidad de polos de estrias de las fallas presentes en el afloramiento 1	86
FIGURA 8.11: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 1	87
FIGURA 8.12: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 1	87



FIGURA 8.13: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 2	88
FIGURA 8.14: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 2	88
FIGURA 8.15: Diagrama de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 2	89
FIGURA 8.16: Diagrama de densidad de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 2	89
FIGURA 8.17: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 2	90
FIGURA 8.18: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 2	90
FIGURA 8.19: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 3	91
Fig 8.20: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 3	91
FIGURA 8.21: Diagrama de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 3	92
FIGURA 8.22: Diagrama de densidad de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 3	92
FIGURA 8.23: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 3	93
FIGURA 8.24: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 3	93
FIGURA 8.25: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 4	94
FIGURA 8.26: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 4	94
FIGURA 8.27: Diagrama de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 4	95
FIGURA 8.28: Diagrama de densidad de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 4	95
FIGURA 8.29: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 4	96
FIGURA 8.30: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 4	96
FIGURA 8.31: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 5	97
FIGURA 8.32: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 5	97
FIGURA 8.33: Diagrama de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 5	98
FIGURA 8.34: Diagrama de densidad de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 5	98
FIGURA 8.35: Representación estereográfica de las fallas presentes en la Formación Las Cascadas	99
FIGURA 8.36: Diagrama de densidad de las fallas presentes en la Formación Las Cascadas.	99
FIGURA 8.37: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación Las Cascadas.	100
FIGURA 8.38: Diagrama de polos de datos de cizallas para la formación Las Cascadas	100
FIGURA 8.39: Diagrama de densidad de las estrías de falla Formación Las Cascadas	101
FIGURA 8.40: Proyección estereográfica de los datos lineales recolectados en campo (Formación Las Cascadas)	101
FIGURA 8.41: Representación de la relación entre fallas normales(Circulo Azul) y fallas inversas (Circulo Rojo), Formación Las Cascadas.	102
FIGURA 8.42: Relación de fallas normales e inversas, Formación Las Cascadas,	102
FIGURA 8.43: representación estereográfica de las fallas presentes en la Formación Culebra. se observa la tendencia de la orientación sur-este de los planos de Falla.	103
FIGURA 8.44: diagrama de densidad de las fallas presentes en la Formación Culebra.	104



FIGURA 8.45: diagrama de densidad de las estrías de falla medidas en campo, presentes en la Formación Culebra. se observa mayor densidad de estrías de falla pertenecientes a fallas normales con promedio de buzamiento 48°.	104
FIGURA 8.46 Proyección estereográfica de los datos lineales recolectados en campo (Formación Culebra), se continua observando la tendencia de verticalización de fallas inversas y la tendencia de ángulo medio a bajo para las fallas normales.	105
FIGURA 8.47: Representación de la relación entre fallas normales (Círculo Azul) y fallas inversas (Círculo Rojo), Formación Culebra.	105
FIGURA 8.48: Relación de fallas normales e inversas, Formación Culebra.	106
FIGURA 8.49: Representación gráfica del comportamiento cinemático presentado en las formaciones de estudio, las líneas rojas representan fallas normales, las líneas azules fallas inversas. Rotación de cuerpo rígido.	108
FIGURA 9.1. Fotografía de un diente de Cocodrilo, encontrado en el tope de la formación Las Cascadas	110
FIGURA 9.2: Fotografía de una mandíbula de <i>Areodontidae</i> encontrada en el tope de la formación Las Cascadas,	110
FIGURA 9.3. Fotografía de una mandíbula de <i>Areodontidae</i> encontrada en el tope de la formación Las Cascadas	111
FIGURA 9.4: Fotografías correspondientes a un molar de <i>Protoceratidae</i> , encontrado al tope de la Formación Las Cascadas.	111
FIGURA 9.5: Fotografías correspondientes a un molar de <i>Protoceratidae</i> , encontrado al tope de la Formación Las Cascadas	112
FIGURA 9.6: Presencia de <i>Thalassinoides</i> en La Formación Culebra.	113
FIGURA 9.7 Coral cerebro fósil rodado, perteneciente a la base de la formación Culebra.	114
FIGURA 9.8: Miembro Calizas emperador, se observa gran cantidad de corales y pectens.	115
FIGURA 9.9: Fotografía tomada en microscopio de una semilla de Annonacea.	115
FIGURA 9.10. Fotografía tomada en microscopio de una semilla de Myristicacea	116
FIGURA 9.11. Fotografía de una mandíbula de PECCARY	116
FIGURA 9.12 Diente de tiburón	117



LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1: base de datos elaborada en Excel, por medio de la importación de datos de Argis.	8
Tabla 5.1: Nombre de los afloramientos usados en el estudio.	43
Tabla 7.1: Datos estructurales planares de la formación Bas Obispo.	66
Tabla 7.2: Datos lineales de la Formación Bas Obispo.	69
Tabla 7.3: Datos estructurales planares medidos en la Formación Las Cascadas.	70
Tabla 7.4: Datos estructurales lineales medidos en la Formación Las Cascadas.	72
Tabla 7.5: Datos estructurales planares medidos en la Formación Culebra	72
Tabla 7.6: Datos estructurales lineales medidos en la Formación Culebra	74
Tabla 8.1: Datos estructurales generales de la Formación Bas Obispo	80
Tabla 8.2: Datos lineales generales de la Formación Bas Obispo	80
Tabla 8.3: Datos estructurales del afloramiento 0	82
Tabla 8.4: Datos lineales del afloramiento 0	83
Tabla 8.5: Datos estructurales del afloramiento 1	85
Tabla 8.6: Datos lineales generales del afloramiento 1	86
Tabla 8.7: Datos estructurales del afloramiento 2	88
Tabla 8.8: Datos lineales generales del afloramiento 2	89
Tabla 8.9: Datos estructurales del afloramiento 3	91
Tabla 8.10: Datos lineales generales del afloramiento 3	92
Tabla 8.11: Datos estructurales del afloramiento 4	94
Tabla 8.12: Datos lineales generales del afloramiento 4	95
Tabla 8.13: Datos estructurales del afloramiento 5	97
Tabla 8.14: Datos lineales generales del afloramiento 5	98
Tabla 8.15: Datos estructurales planares medidos en la Formación Las Cascadas.	100
Tabla 8.16: Datos estructurales lineales medidos en la Formación Las Cascadas.	101
Tabla 8.17: Datos estructurales planares medidos en la Formación Culebra.	103
Tabla 8.18: Datos estructurales lineales medidos en la Formación Culebra.	104
Tabla 8.19: Direcciones preferenciales de las fallas para las formaciones en estudio.	107



1. INTRODUCCION

El análisis de la geología estructural en una región, es un aspecto importante el cual se debe tener en cuenta al diseñar las construcciones de grandes magnitudes. Pueden ser diversas las causas que determinan en estilo estructural en una región, el cual se puede analizar a través de las secciones estructurales elaboradas en una región determinada, pero la que nos lleva a entender mejor la geología estructural, es el análisis cinemático de la zona en estudio.

El análisis cinemático de una región, también implica el aporte de información estratigráfica y paleontológica, para entender las condiciones de depositación de los cuerpos de roca y el ambiente en general

Cualquier variación en lo que se pudiera llamar un modelo ideal del comportamiento estructural en una región, nos puede indicar que se han presentado movimientos tales como rotaciones de los cuerpos rocosos o exhumaciones de cuerpos formados a gran profundidad.

La elaboración de un análisis cinemático, implica recolectar la mayor cantidad posible de datos de las formaciones en estudio. Es por esto que esta investigación apunta a **elaborar secciones estructurales en áreas de expansión del canal de Panamá**, mediante el análisis de datos estructurales, estratigráficos y paleontológicos recolectados en campo, y mediante la elaboración de un análisis cinemático de las formaciones en estudio.

La metodología utilizada para tal fin se elaboro en tres etapas de igual importancia.

➤ La primera etapa, consistió en la recopilación de información contenida en SMITHSONIAN TROPICAL RESEARCH INSTITUTE (PANAMA), en la



selección y reconocimiento del área de estudio y en la elaboración de metodologías de trabajo.

- La segunda etapa consistió en el trabajo de campo, la recolección de datos de campo, la elaboración de una base de datos para procesar los datos recolectados.

- La tercera etapa consistió en el análisis y procesamiento de datos, la elaboración de los cortes estructurales correspondientes y el análisis cinemático del área estudiada.



2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Elaborar secciones estructurales en las áreas de expansión del canal de Panamá, aplicadas al proyecto del rescate paleontológico de Material del Canal de Panamá.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar la cartografía geológica del área de estudio,
- Elaborar las secciones estructurales correspondientes del área estudiada.
- Realizar un análisis cinemático de las formaciones en estudio, utilizando los datos estructurales recolectados en campo.
- Aportar información de geología estructural al proyecto de rescate paleontológico de Material del Canal de Panamá.



3. METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto, se planteo una metodología de trabajo, teniendo como principal objetivo análisis de datos estructurales medidos directamente en campo.

La metodología de trabajo se diseño basada en diferentes trabajos, los cuales sirvieron para aportar ideas al trabajo a realizar.

La investigacion se llevo a cabo durante un periodo de 7 meses, los cuales fueron divididos en 3 etapas de la siguiente manera:

3.1. ETAPA 1: ETAPA DE PRECAMPO

- Revisión Bibliográfica, revisión y análisis de la información existente en el SMITHSONIAN TROPICAL RESEARCH INSTITUTE (PANAMA) e Información en la Web.
- Selección del área de estudio teniendo en la mayor cantidad de afloramientos posibles, información existente y técnicas a utilizar.
- Planteamiento de objetivos basándose en aportar nueva información para el área de estudio.
- Etapa de reconocimiento de campo en la cual se escogieron los afloramientos para realizar la cartografía correspondiente.
- Selección de técnicas a utilizar, planteamiento de metodología para el tratamiento de la información recolectada.



3.2. ETAPA 2: TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo (4 días por semana), consistió en la recolección de datos estructurales, se siguió una metodología la cual se describe a continuación:

3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO DE CAMPO

Para tomar los datos estructurales en campo, Se utilizo una brújula BRUNTON. Los datos se expresaron en Azimut de buzamiento, debido al formato original de la base de datos que se utilizo (Argis).

Para la recolección de datos se uso un GPS ProMark 3 marca Magellan Mobile Mapper GX, con precisión de 1m, lo que mejora la calidad de los datos tomados.

El uso de GPS facilito el trabajo de campo, ya que permitía tomar gran cantidad de datos posibles por punto, a un solo punto de coordenadas además de los datos estructurales, se podían amarrar datos litológicos y paleontológicos, lo que hacía que la precisión de el mapeo de los datos fuera mejor.

En el GPS los datos eran manejados mediante un programa, el cual permitía clasificarlos.

Los datos se clasificaron en la toma, por:

- ❖ Muestras
- ❖ Estructuras Lineales
- ❖ Venas
- ❖ Estructuras Planares



- ❖ Zonas de Fósiles
- ❖ Unidad de Roca
- ❖ Contactos
- ❖ Línea de estructura
- ❖ Fotos
- ❖ Notas y Caminos.

Cada ítem tiene todas las opciones necesarias para la obtención de la mayor cantidad de información posible. Para elaborar el informe fue necesario utilizar las estructuras planares, las estructuras lineales y el análisis estratigráfico elaborado a cada formación.

Con la elaboración de los correspondientes dibujos de campo por cada afloramiento, que sirvieron para apoyar la elaboración de las secciones estructurales, se contribuyó a entender el estilo estructural de las formaciones en estudio, ya que ellos fueron el principal aspecto tenido en cuenta al momento de integrar todos los datos recolectados.

Para la toma de datos de lineaciones en campo se utilizó la metodología propuesta por Goldstein y Marshack. Por medio de este método, se tomaron datos de estrías de falla, en su mayoría correspondientes a fallas normales, ya que son la que más se observan en la zona.

Este método para el análisis de estrías de falla, nos ayuda a indicar la dirección que la misma presenta, si es normal, inversa, etc. (FIGURA 3.1), (FIGURA 3.2).

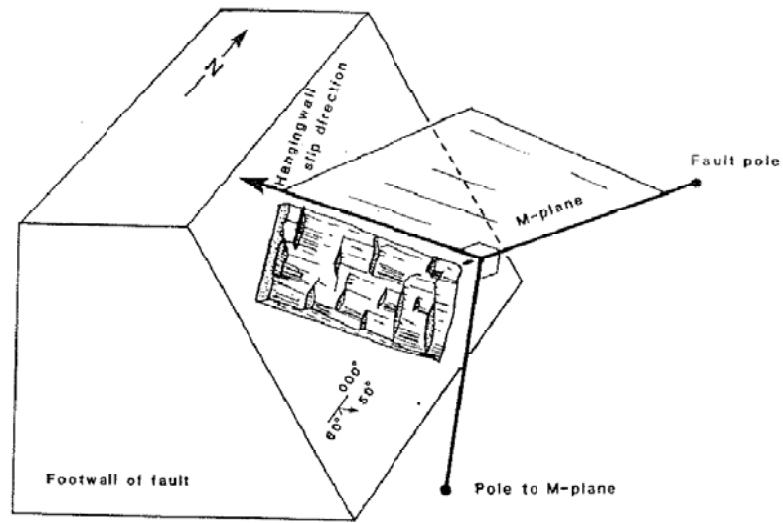


FIGURA 3.1: esquema para la toma de datos de lineaciones en campo. Modificado de Goldstein y Marshack. (2004).



FIGURA 3.2: Lineaciones observadas en campo, las cuales se midieron durante la investigación en curso



El método consiste en medir primero la dirección de buzamiento del plano de falla, posteriormente se mide el Angulo entre la dirección de buzamiento y la estría de falla. Si el ángulo es mayor de 45 grados, se tomara la falla con normal o inversa, dependiendo del análisis de otros rasgos observados en la falla, como mineralizaciones en espacios dejados por el movimiento de los bloques, los cuales en su mayoría son llamados “escalones” (Figuras 3.2 y 3.3).



FIGURA 3.3: Lineaciones observadas en campo, las cuales se midieron durante la investigación realizada.

3.3 ETAPA 3: TRABAJO DE OFICINA

3.2.2 Descripción de la metodología de trabajo de oficina

Como fase importante del trabajo de oficina, la elaboración de una base de datos con información de datos estructurales recolectados en campo, fue el principal factor para elaborar los cortes estructurales.



Los datos tomados con GPS diferencial se introdujeron seguidamente en el programa ARGIS, posteriormente, se cargaron en una base de datos, y fueron manejados en Excel, ordenándolos, para finalmente ser llevados al programa STERONETT 32, en el cual por medio de la interpretación de los diagramas de polos, se determino el estilo estructural de las formaciones en estudio.

OBJECTID	TYPE	DIP_DIR	DIP	Lithotype	POINT_X	POINT_Y	POINT_Z	POINT_M
55	Intrusive	160	60	Aglomerate	644142,23910000000	1006170,65960000000	62,07958478510	
459	Fault_plane	81	61	Aglomerate	644132,97080000000	1006187,08040000000	47,11648478510	
460	ShearZone	134	45	Aglomerate	644075,39940000000	1006255,88560000000	65,87808478510	
461	ShearZone	69	48	Aglomerate	644081,00920000000	1006253,03940000000	66,00998478510	
462	ShearZone	160	86	Aglomerate	644086,25040000000	1006242,44290000000	66,48368478510	
463	Normal_Bedding	3	38	Aglomerate	644092,16090000000	1006233,09960000000	66,65758478510	

Tabla 3.1: base de datos elaborada en Excel, por medio de la importación de datos de Argis.

Procesamiento y análisis de la información

Diariamente la información recolectada en campo era introducida en la base de datos, posteriormente se seleccionaban los datos para el análisis y se hacían filtros para determinar qué datos habían sido mal tomados y podrían haber afectado los resultados.

Posteriormente, los datos obtenidos por afloramiento, eran cargados e interpretados en el programa STERONETT 32, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- ❖ Dirección y buzamiento de los planos de falla.
- ❖ Tipo de falla (Normal, Inversa, de Rumbo,), mediante el análisis de las estrías de falla
- ❖ Densidad de polos.
- ❖ Diagramas de densidades de estrías de falla. (FIGURA 3.4).

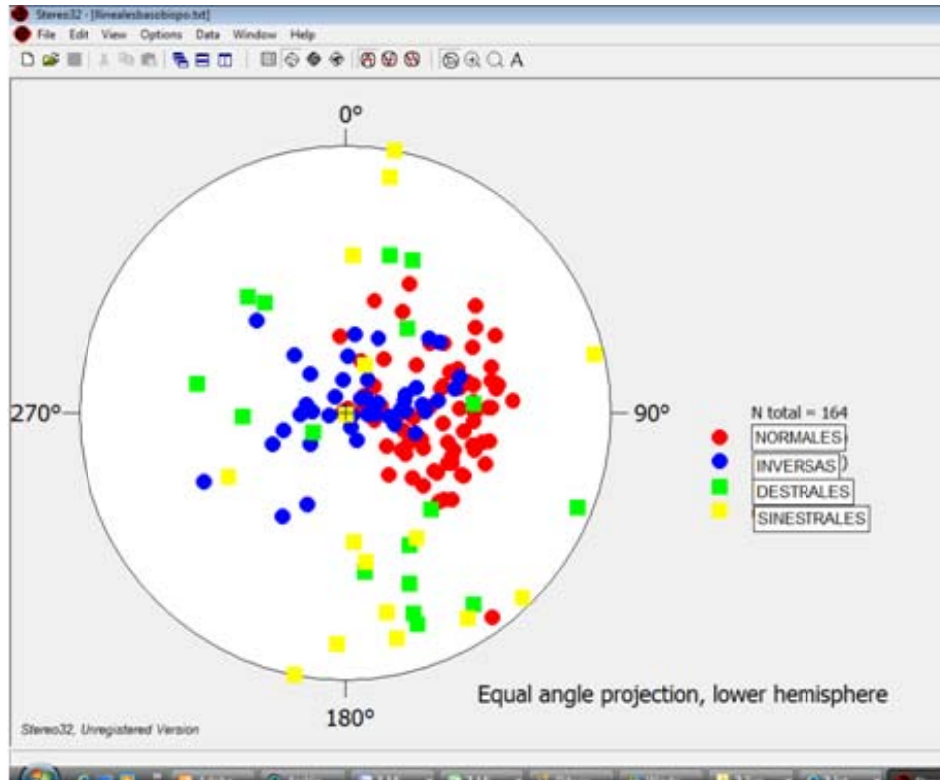


FIGURA 3.4: Diagrama de densidad de estrías de falla para la formación Bas Obispo.

Elaboración de cortes geológicos y modelos correspondientes

Los información obtenida de el análisis de los datos en los diagramas de polos, fue posteriormente comparada con la representación de los mismos datos en un mapa georeferenciado en ARGIS. Posteriormente se analizaron datos como contactos, planos de estratificación, los cuales fueron vitales a la hora de elaborar las secciones.

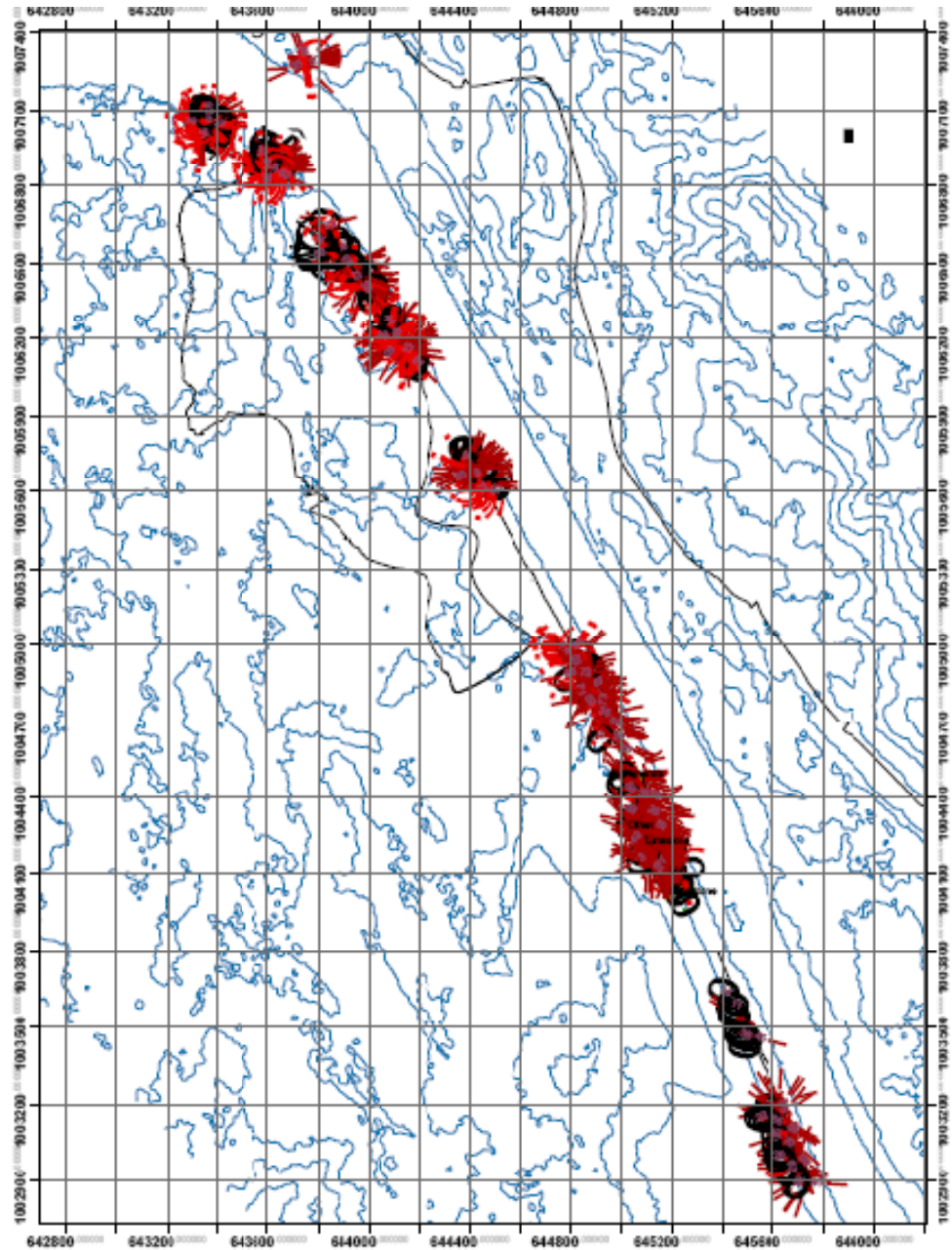


FIGURA 3.5: mapa georeferenciado, con la ubicación de las zonas donde se recolectaban datos. Consta de 8 afloramientos.

Los mapas eran impresos, posteriormente se hacía sobre los mismos la proyección de los buzamientos reales a buzamientos aparentes hacia el corte a elaborar.

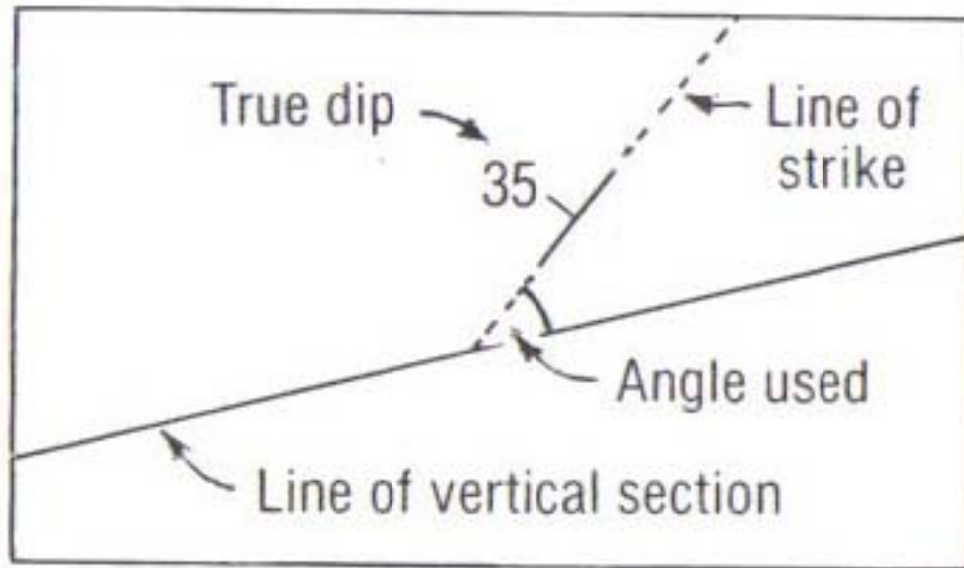


FIGURA 3.6: Proyección de los buzamientos reales en un mapa a una línea de sección vertical, utilizando la línea de rumbo de cada dato estructural. Modificado de Goldstein y Marshack. (2004)

True dip	ACUTE ANGLE BETWEEN STRIKE AND LINE OF VERTICAL SECTION															
	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80
5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	2.5	3.0	3.0	3.5	4.0	4.0	4.5	4.5	5.0	5.0
10	0.5	1.0	2.0	2.5	3.5	4.0	5.0	6.0	6.5	7.0	8.0	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
15	1.0	1.5	3.0	4.0	5.0	6.5	8.0	9.0	10.0	11.0	11.5	12.5	13.0	13.5	14.0	15.0
20	1.0	2.0	3.5	5.5	7.0	9.0	10.0	12.0	13.0	14.5	15.5	16.5	17.5	18.0	19.0	20.0
25	1.0	2.0	4.5	7.0	9.0	11.0	13.0	15.0	17.0	18.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0
30	1.5	3.0	6.0	8.0	11.0	14.0	16.0	18.5	20.5	22.0	24.0	25.0	26.5	27.5	28.5	29.5
35	2.0	3.5	7.0	10.5	13.5	16.5	19.5	22.0	24.0	26.5	28.0	30.0	31.0	32.5	33.5	35.5
40	2.0	4.0	8.0	12.0	16.0	19.5	23.0	26.0	28.5	30.5	33.0	34.0	36.0	37.0	38.5	39.5
45	2.5	5.0	10.0	14.5	19.0	23.0	26.5	30.0	33.0	35.0	37.0	39.0	41.0	42.0	43.0	44.5
50	3.0	6.0	11.5	17.0	22.0	27.0	31.0	34.5	37.5	40.0	42.5	44.0	46.0	47.0	48.0	49.5
55	4.0	7.0	14.0	20.0	26.0	31.0	35.5	39.5	42.5	45.0	47.5	49.5	51.0	52.5	53.5	54.5
60	4.5	8.5	16.5	24.0	30.5	36.0	41.0	45.0	48.0	51.0	53.0	55.0	56.0	57.5	58.5	59.5
65	5.5	10.5	20.5	29.0	36.0	42.0	47.0	51.0	54.0	56.5	58.5	60.0	62.0	63.0	63.5	64.5
70	6.5	13.0	25.5	35.0	43.0	49.0	54.0	57.5	60.5	63.0	64.5	66.0	67.0	68.0	69.0	69.5
75	9.0	18.0	33.0	44.0	52.0	57.5	62.0	65.0	67.5	69.0	70.5	72.0	73.0	73.5	74.0	75.0
80	13.5	26.5	44.5	56.0	63.0	67.5	70.5	73.0	74.5	76.0	77.0	78.0	78.5	79.0	79.5	80.0
85	26.0	45.0	63.5	71.5	75.5	78.0	80.0	81.5	82.0	83.0	83.5	84.0	84.0	84.5	84.5	85.0

FIGURA 3.7: Tabla de conversión de los buzamientos reales en un mapa a buzamientos aparentes en un corte. Modificado de Goldstein y Marshack. (2004)



De esta forma y amarrando la información de la base de datos e integrándola con los dibujos de campo, se elaboraron las secciones estructurales.

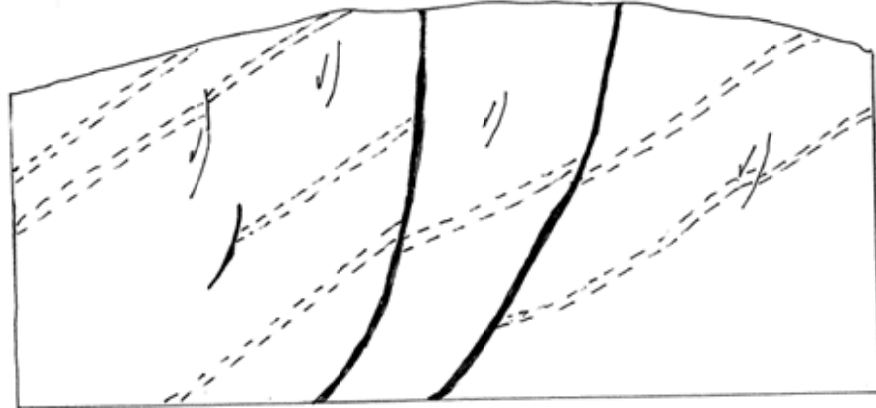


FIGURA 3.8: Dibujo de campo para el afloramiento 0 de la formación Bas Obispo.

Para cada sección, se tomaron capas guía para su correspondiente elaboración, y se relacionaron con capas cercanas con tendencias iguales en cuanto a tamaño de bloques, fabrica, etc., En el caso de la Formación Culebra, se tomo el miembro Calizas emperador como capa guía.



FIGURA 3.9: Capas guía de la formación Baso Obispo usadas en la elaboración de las secciones estructurales.

El análisis cinemático se elaboro siguiendo los parámetros establecidos en la ley de fallamiento de Anderson (1957), teniendo en cuenta factores como rotación y deformación de los cuerpos de roca.

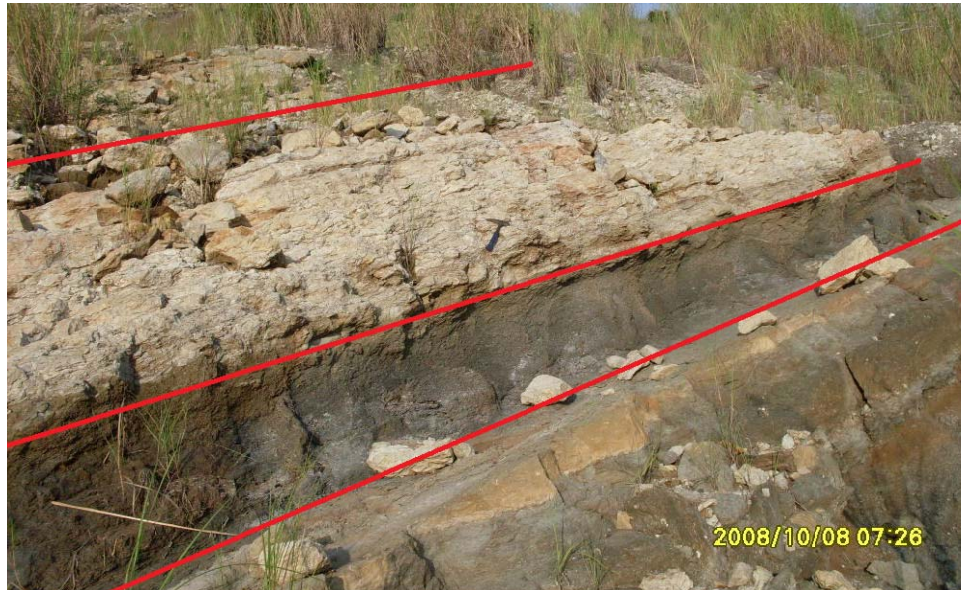


FIGURA 3.10: Miembro Calizas Emperador, capas guía de la formación Culebra, usadas en la elaboración de las secciones estructurales.

Finalmente se elaboraban los cortes en el programa ADOBE ILLUSTRATOR, Con la información recolectada, se elaboro una comparación y amarre de la información y resultados a otros proyectos de investigación que se están realizando en el canal.

Elaboración de Conclusiones e informe final

Con el análisis de los cortes, la información de los diagramas de polos y las observaciones realizadas en campo, se elaboro el correspondiente análisis cinemático de las formaciones en estudio y el informe final.

4. MARCO TEORICO

4.1 FUNDAMENTOS DE GEOLOGIA ESTRUCTURAL

4.1.1 Fallas.

4.1.1.1 Conceptos básicos de fallas

Anderson (1905) realizó a comienzos de siglo una clasificación dinámica de las fallas basada en posicionamiento de tres vectores principales de esfuerzos: s_1 , s_2 , s_3 , ortogonales entre sí, que cumplen el requisito general de $s_1 > s_2 > s_3$ (FIGURA 4.1).

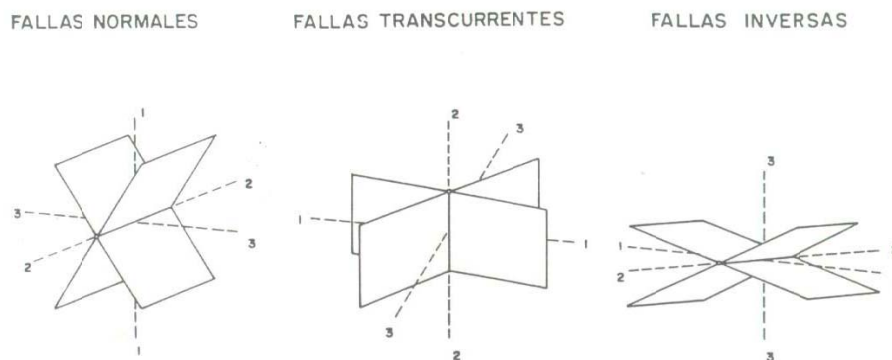


FIGURA 4.1: Clasificación dinámica Andersoniana de las fallas. 1, 2, 3: vectores de compresión s 1,2, 3. Tomada de McClay (1987).

Dependiendo de las posiciones de los vectores se definen los tres tipos de fallas principales: **normal** (s_1 vertical, s_2 y s_3 horizontal), **transcurrente** (s_2 vertical, s_1 y s_3 horizontal), e **inversa** (s_3 vertical, s_1 y s_2 horizontal).

La clasificación de Anderson es muy restringida y presenta problemas para la interpretación de muchos casos. Por ejemplo, no explica el comportamiento **lístrico** (curvamiento progresivo del plano de falla en profundidad) de las fallas normales (FIGURA 4.2), ni menos las grandes superficies tipo "*detachments extensionales*" (FIGURA 4.3), o el carácter irregular (con variaciones en el rumbo) de las fallas transcurrentes. Otro aspecto a considerar es el hecho de

que muchas veces las fallas presentan un movimiento combinado, (normal-transcurrente) .En resumen, las fallas distan mucho de presentar un comportamiento "ideal" Andersoniano y al respecto deberíamos recordar una premisa fundamental: **las fallas se curvan y de hecho casi nunca son planos sino más bien superficies.** Producto de esas curvaturas se generan situaciones asimétricas en la distribución de esfuerzos a ambos lados de la falla o zona de falla, resultando en zonas de extensión o compresión locales. DAVIS Y REYNOLDS (1996)

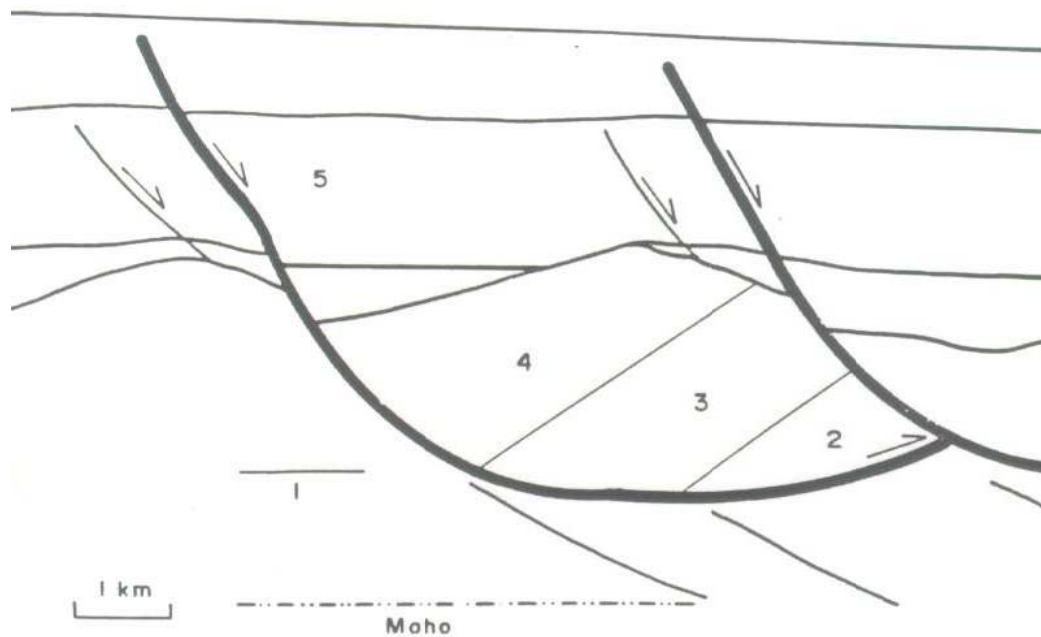


FIGURA 4.2: Ejemplo de fallamiento normal de carácter lístrico en la región costa afuera de Nova Scotia. Modificado de Davis y Reynolds (1996).



FIGURA 4.3: Sistema tipo detachment extensional. Wernicke (1985).



De acuerdo al sentido de movimiento podemos decir que una **falla normal** (FIGURA 4.4) es aquella en la que el bloque del techo se mueve hacia abajo con respecto al bloque del muro. Estas fallas suelen tener buzamientos moderados a altos, con un promedio de 60° . Con buzamientos menores a 45° (no previstos por la dinámica Andersoniana) pasan a denominarse **fallas normales de bajo ángulo**. Las **fallas transcurrentes** son aquellas que acomodan movimiento horizontal de los bloques adyacentes. Estas dependiendo a su vez del movimiento relativo de un bloque con respecto al otro, pueden ser de dos tipos: **dextrales** o **sinestrales**. Por su parte, las **fallas inversas** se caracterizan por un movimiento del bloque del techo hacia arriba con respecto al muro. Las fallas inversas tienen generalmente un buzamiento menor a 45° , en promedio 30° . Si estas buzán más 45° pasan a denominarse **fallas inversas de gran ángulo**. Tanto las fallas normales como las inversas pueden ser lítricas. Davis y Reynolds (1996).

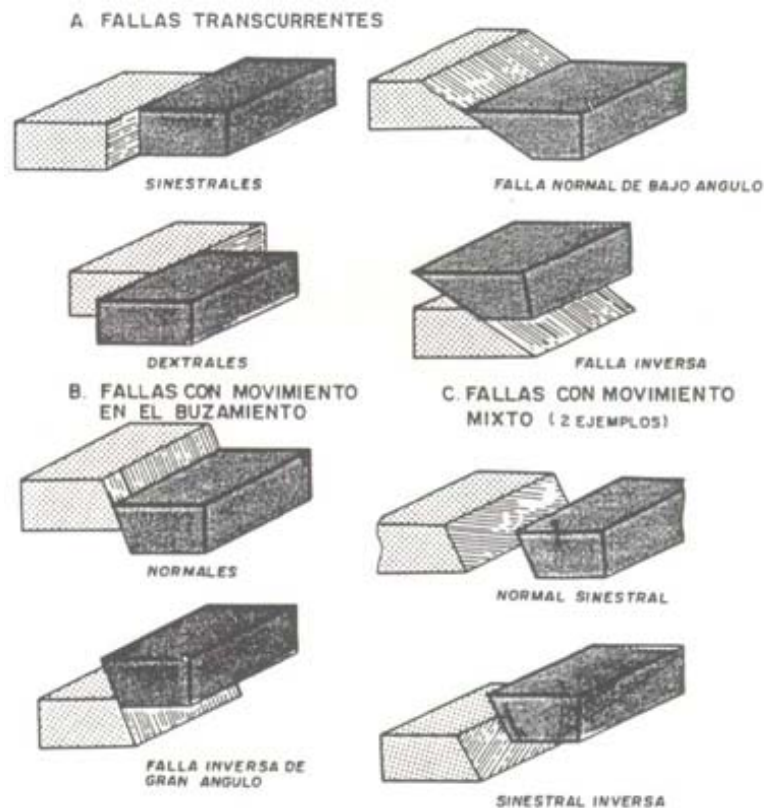


FIGURA 4.4: Clasificación de las fallas en función del sentido de deslizamiento. Modificado de Davis y Reynolds (1996).



A esto habría que agregar el movimiento combinado que pueden tener las fallas, hablaremos en este caso de **fallas con deslizamiento oblicuo**, que son combinaciones de movimiento (mixto) entre fallas transcurrentes (traslación horizontal) con movimientos normales o inversos (deslizamiento hacia arriba o abajo a lo largo del plano de falla).

4.1.2 Creación y movimiento de las fallas

4.1.2.1 Conceptos básicos de fallas.

Las fallas son fracturas de cizalla con un movimiento relativo apreciable. En rocas que no están fracturadas previamente, las fallas, como cualquier otro tipo de fracturas, se crean cuando el estado de esfuerzo es tal que en planos determinados de la roca se cumple la condición de fracturación, que viene dada por la envolvente de Mohr de esa roca. Como la superficie terrestre es siempre un plano principal del elipsoide de esfuerzo y como aproximadamente es horizontal a gran escala, dos de los esfuerzos principales cerca de la superficie deben ser horizontales y uno vertical. Martínez (2003).

Un modelo sencillo de generación de fallas a poca profundidad es el conocido como la **teoría de fracturación de Anderson** (FIGURA 4.5). La teoría asume un comportamiento de tipo Coulomb y predice que se formarán fallas normales allí donde el esfuerzo vertical sea el esfuerzo máximo, fallas inversas donde el esfuerzo vertical sea el mínimo y fallas de desgarre donde el esfuerzo vertical sea el intermedio. La teoría también predice que las fallas se formarán en dos familias conjugadas, que las fallas de desgarre serán verticales y que las fallas normales buzarán más que las inversas. Esto último se debe a que el ángulo que forman con el esfuerzo mayor debe ser de entre 25° y 35° . Por tanto, el máximo buzamiento de las fallas inversas previsto es de 35° y el mínimo buzamiento de las normales será de 55° . Martínez (2003).



Esto concluye que:

El tipo de falla que se formará depende de la ubicación de los stresses principales.

θ : Angulo entre el plano de falla y el stress principal máximo.

- Si σ_1 es vertical $\Rightarrow \theta = 30^\circ$. Las fallas tendrán $\mu = 60^\circ$ y el sentido de cizalle será el de una falla normal.
- Si σ_3 es vertical y $\theta = 30^\circ \Rightarrow$ falla con sentido de cizalle característico de una falla inversa.
- Si σ_2 es vertical \Rightarrow el plano de falla (que siempre contiene a σ_2) es vertical y σ_1 y σ_3 son horizontales \Rightarrow fallas de rumbo.

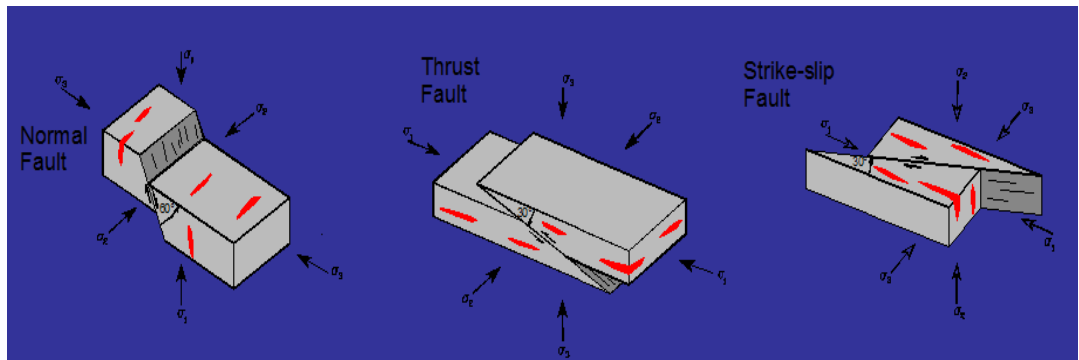


FIGURA 4.5 :Teoría de fracturación de Anderson, modificado de Martínez 2003.

La teoría se adapta bastante bien a la realidad para el caso de muchas fallas normales y desgarres. Sin embargo, no explica las fallas inversas de alto ángulo, ni tampoco el hecho de que la existencia de dos familias conjugadas no sea frecuente en el caso de los cabalgamientos. La existencia, común, de fallas con buzamientos diferentes de los previstos, puede tener varias explicaciones. Una de ellas es simplemente que las fallas hayan sufrido rotación después de su formación, un ejemplo puede ser por basculamiento debido a otra falla o por plegamiento. Otra causa posible es que sean fallas generadas en profundidad que han sido exhumadas por la erosión. En profundidad, los esfuerzos



principales ya no tienen por qué ser horizontales o verticales y, de hecho, en general las trayectorias de esfuerzo se curvan hacia abajo.

Las fallas no se crean en su totalidad en un instante dado. Por el contrario, primero se crea una pequeña fractura que después se va propagando de forma más o menos radial. La zona donde se ha producido translación es la falla y se termina en la línea terminación, la translación es mayor en el centro de la falla y se va amortiguando hacia la línea terminación. Martínez (2003).

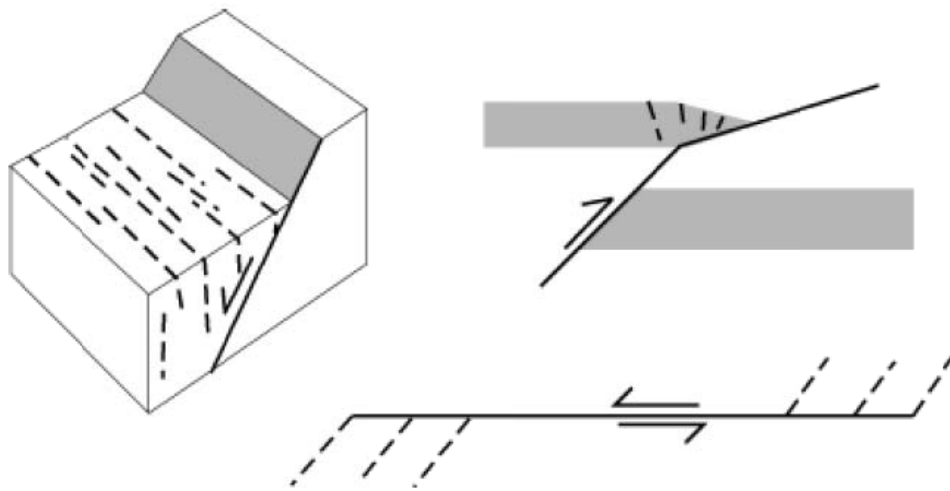


FIGURA 4.6: Relación de las diaclasas con fallas normales, inversas y de desgarre. modificado de Martínez 2003

4.1.2.2 Estructuras de Tipo Convergente

Las estructuras de tipo convergente algunas veces han sido referidas como estructuras transpresionales, un término genérico que confunde esfuerzo y fatiga.

En las estructuras convergentes, vemos

- Desarrollo incrementado de los pliegues en echelon
- Desarrollo de las fallas de cabalgamiento subparalelas a los ejes de los pliegues
- Formación de “estructuras en flor”

4.1.2.3 Fallas Planares Rotadas

En esta geometría, las fallas son planares pero ellas rotan cuando se mueven, tal como colapsan una fila de dominós. Por esta razón es llamado el modelo domino. La cuenca resultante la cual se forma en el tope de los dominós es llamada graben medio asimétrico porque están limitados por una falla solo en a un lado. Este modelo produce las rotaciones comúnmente observadas en las provincias de rif. Martínez (2003).

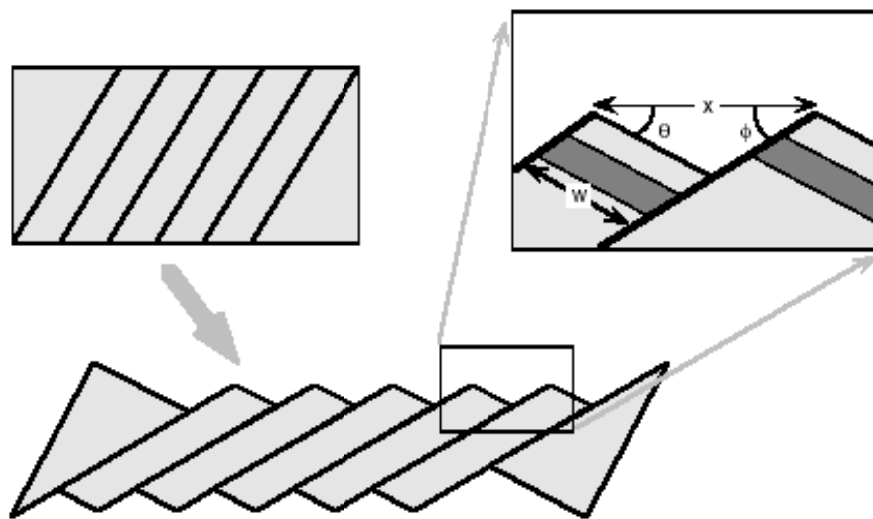


FIGURA 4.7: rotaciones observadas en los movimientos de los rift modificado de Martínez 2003

Si conocemos el buzamiento de la estratificación rotada y el buzamiento de la falla, podemos calcular la extensión horizontal asumiendo un modelo de domino a partir de la siguiente ecuación (Thompson, 1960):

$$\% \text{ extension} = \frac{|x - W|}{W} 100 = \left[\frac{\sin(\phi + \theta)}{\sin \phi} - 1 \right] 100$$

Cuando las fallas rotan a un bajo ángulo, ellas no están orientadas apropiadamente para el deslizamiento. Luego, un nuevo grupo de fallas pueden



formarse a un alto ángulo. Varios episodios de fallas normales rotadas pueden resultar en extensiones muy grandes.

4.1.2.4 Fallas Normales de Bajo Angulo

Esas fallas son muy controversiales porque ellas están marcadamente en pro con la ley de fallamiento de Anderson. Dada la debilidad de las rocas bajo tensión, parece probable que ellas se mueven por su propio peso y sobre superficies virtualmente libres de fricción. (FIGURA 4.8).

Su mecánica es pobremente conocida y muy debatida. Esas fallas acomodan más extensión que las fallas normales de alto ángulo.



FIGURA 4.8: Fallas normales de bajo ángulo, modificado de Martínez 2003

4.1.2.5 Duplexes y estructuras en flor

La presencia de inflexiones y saltos a lo largo de una falla promueve la formación de estructuras denominadas **duplexes** (Woodcox y Fischer, 1986). Las rocas que se encuentran dentro de la zona de influencia de una inflexión o salto se pueden fallar progresivamente (fallas menores paralelas a la dirección de la inflexión) generando sistemas imbricados en relación a la falla principal. Por otra parte en el caso de fallas de traza recta, la formación de un duplex puede originarse a través del desarrollo de fracturas de Riedel.

El análisis del proceso de formación de duplexes puede realizarse a través de dos mecanismos: procesos de **deformación planar** (*plane-strain*) y de **deformación no planar** (*non-plane strain*) (e.g., Davis y Reynolds, 1996). En el



caso teórico de la deformación planar si una esfera es deformada triaxialmente y ocurre un estiramiento en la dirección S_1 (máximo estiramiento) éste será compensado de manera perfecta por un acortamiento en la dirección S_3 (mínimo estiramiento), sin que se produzcan cambios en la dirección S_2 , así una esfera perfecta se transformará en un elipsoide perfecto (de revolución). Si llevamos ésto al caso que nos interesa (sistemas de fallas transcurrentes), la situación será la siguiente (Woodcock y Fischer, 1996): dado que s_1 (esfuerzo máximo) y s_3 (esfuerzo mínimo) están en la horizontal, todos los cambios ocurrirán ahí. En otras palabras, bajo esta perspectiva teórica, no habrían levantamientos (*pop-ups*, *push-ups*) o hundimientos (*pull-aparts*), ya que estos tendrían que ocurrir en la dirección de s_2 (en este caso, equivalente a S_2), que es perpendicular a la superficie horizontal. La deformación planar es difícil de mantener en sistemas reales, pero sirve en todo caso como referente para introducir el modelo cinemático.

La diferencia principal que presentará la formación de duplexes por **deformación no planar** (caso más cercano a la realidad) se encuentra en la compensación volumétrica por hundimientos y levantamientos. Así en duplexes extensionales se formaran hundimientos, y en los compresionales, levantamientos. Unas de las estructuras más notables derivadas de la deformación no planar son las denominadas **flores positivas** (*positive flowers*) y **flores negativas** (*negative flowers*) (Woodcock y Fischer, 1986) (FIGURA 4.9), que a su vez se corresponden con los casos de duplex compresional y extensional, respectivamente. La geometría interior de las fallas secundarias en un duplex muestra que estas convergen en profundidad hacia una zona de falla única. En el caso de una estructura en flor negativa, las fallas secundarias dentro del duplex tendrán un comportamiento mixto, transcurrente-normal, por lo cual podemos decir que la zona interior está en extensión y sometida a hundimiento. Por el contrario, en una estructura tipo flor positiva, las fallas interiores se comportarán como transcurrentes-inversas, por lo cual podemos decir que la zona está en compresión y por lo tanto sometida a levantamiento.

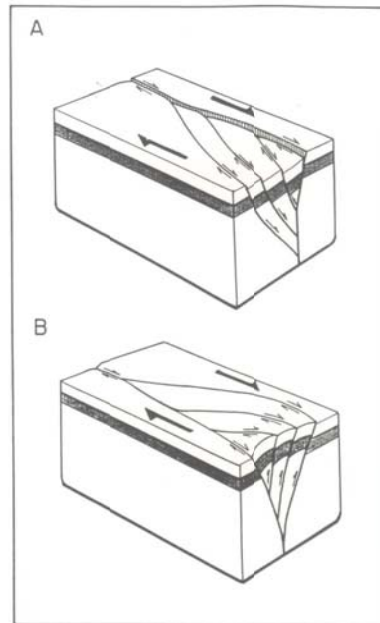


FIGURA 4.9 : Estructuras tipo flor negativa (A) y flor positiva (B). Woodcock y Fischer (1986).

4.2 ZONAS DE CIZALLA

Una **zona de cizalla** (FIGURA 4.10) es una estructura ancha formada bajo condiciones dúctiles a dúctiles-frágiles compuesta por rocas de la serie milonítica. La intensidad de la deformación dentro de una zona de zona de cizalla es muy grande. Por ejemplo, granitos afectados por una zona de cizalla pueden dar el aspecto, y ser erróneamente cartografiados, como ortogneisses, metarolitas o esquistos o pizarras de origen metasedimentario. Las zonas de cizalla pueden tener desde centenares de kilómetros de largo, kilómetros de ancho (y cortar a escala cortical) hasta solo algunos centímetros de largo por un milímetro de ancho. Las grandes zonas de cizalla pueden mostrar desplazamientos relativos de los bloques de decenas a centenares de kilómetros. Muchas veces las zonas de cizalla son en realidad sets de múltiples subzonas de mayor o menos grado de la deformación, subparalelas a oblicuas entre sí, resultando en una morfología anastomosada. Una zona de cizalla dúctil evoluciona hacia zonas más superficiales hacia una zona de cizalla más estrecha en régimen dúctil-frágil, dando lugar en las zonas más someras a una compleja zona de falla frágil.



Además una zona de cizalla grada hacia arriba hacia una zona de falla. Las rocas son deformadas frágilmente en los niveles superiores de la corteza terrestre y dúctilmente en los inferiores. La profundidad a la que la deformación pasa de frágil a dúctil es conocida como la **transición dúctil-frágil** y generalmente se encuentra a unos 10-15 km bajo la superficie (FIGURA 4.11).



FIGURA 4.10: Zona de cizalla, Formación Bas Obispo.



En dicha transición se desarrollan ambos tipos de deformación, mientras que por encima o por debajo la importancia relativa de una de estas disminuye progresivamente. De cualquier manera los 10-15 km antes mencionados deben ser solamente considerados como un referente general solamente, ya que zonas de deformación dúctil pueden desarrollarse a profundidades menores bajo condiciones de un gradiente geotérmico anómalamente alto (Magmatismo activo, actividad hidrotermal de alta temperatura generalizada, etc), y también pueden darse deformaciones frágiles en profundidad como respuesta a movimientos sísmicos bruscos

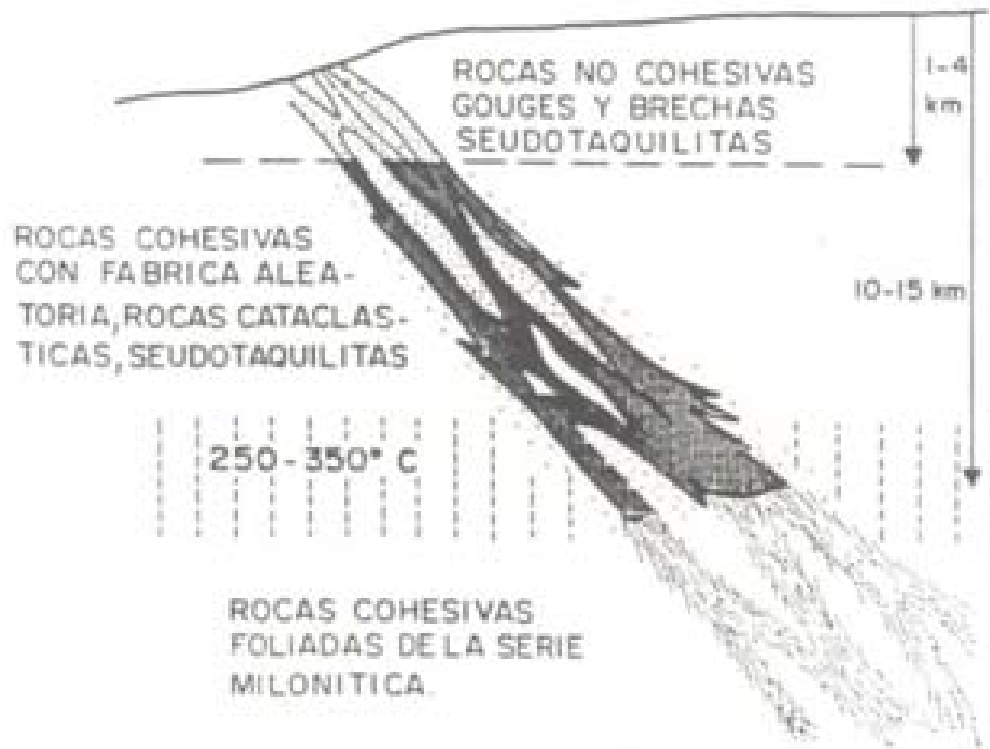


FIGURA 4.11: Esquema de una gran zona de cizalla y rocas asociadas. Transición dúctil-frágil en líneas verticales. Simplificada de Sibson (1977).



4.3 CRITERIOS TEORICOS DE FRACTURACION DE COULOMB Y GRIFFITH

Esencialmente, existen dos tipos de fracturas en las rocas:

Las producidas por esfuerzos tensionales y las producidas por esfuerzos de cizalla. Las primeras se llaman **fracturas de tensión** y se producen según superficies aproximadamente perpendiculares a la dirección de aplicación del esfuerzo tensional. MARTÍNEZ (2003).

Una vez creadas, las dos partes del cuerpo a ambos lados de la fractura tienden a separarse, dejando un hueco que puede ser ocupado por precipitados minerales o por material fundido que se encuentre en las proximidades. Cuando no se rellena, la fractura se denomina **grieta** si es grande y **fisura** si es pequeña. Si se rellena de material por precipitación a partir de fluidos se llama **filón**, si es grande, y **vena** si es pequeña. Cuando es ocupado por un magma da lugar a un **dique**. MARTÍNEZ (2003).

En las producidas por esfuerzos de cizalla, denominadas **fracturas de cizalla**, los labios no tienden a separarse, sino que deslizan uno sobre otro. Parece lógico, a primera vista, que una roca sometida a un estado de esfuerzo triaxial podría romperse si se alcanza el esfuerzo de rotura, que es un determinado valor del esfuerzo diferencial ($\sigma_1 - \sigma_3$) y que se rompería por los planos que están sometidos al máximo esfuerzo de cizalla ($\tau_{\text{máx}} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$), que son los que están a 45° de los esfuerzos mayor y menor y que contienen al esfuerzo principal intermedio. Esto daría lugar a dos familias de fracturas conjugadas perpendiculares entre sí. Sin embargo, esto no sucede ni en la naturaleza ni en el laboratorio

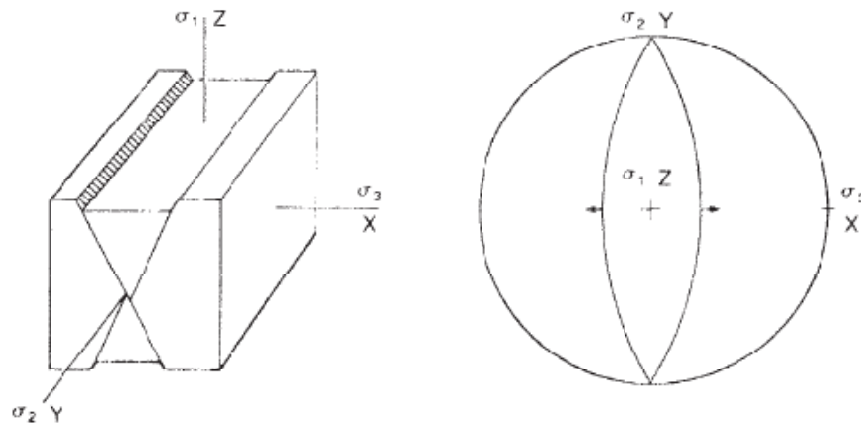


FIGURA 4.12: Planos de fractura y su relación con los esfuerzos principales. A la derecha, proyección estereográfica de las fracturas y esfuerzos principales. Modificado de Martínez 2003.

4.4 FUNDAMENTOS DEL ANALISIS CINEMATICO

El análisis cinemático es la reconstrucción de los movimientos que toman lugar durante la formación y deformación de rocas, en todas las escalas.

Esto se realiza externamente sin referencia a las fuerzas o presiones que causan la deformación. Se hace un seguimiento y descripción de los movimientos que toman lugar, analizando qué generó los movimientos. El interés principal está en el análisis de la deformación secundaria, como la **rotación** de las capas de la roca durante los plegamientos; las dislocaciones a lo largo de una falla o dentro de un sistema de falla; o la rotura de una pared de roca debido a la intrusión de un dique. El análisis cinemático también se aplica a los movimientos primarios que acompañan las mayorías de rocas en su formación.

La principal estrategia de análisis cinemático de deformación estructural depende en si la observación de que la roca bajo análisis haya experimentado movimiento de tipo rígido o no rígido.

La distinción entre rígido o no rígido depende en si del cuerpo de roca, de la escala de observación, de movimientos intactos sin un cambio en forma o



tamaño, (Deformación de cuerpo rígido), o con cambios en tamaño o forma (Deformación de cuerpo no rígido). La prueba en si es que cada punto en el cuerpo durante la deformación mantenga la misma relación y ubicación con los puntos cercanos, si es así, entonces es una deformación de cuerpo rígido, si no, es una deformación de cuerpo no rígido. Hatcher (2004).

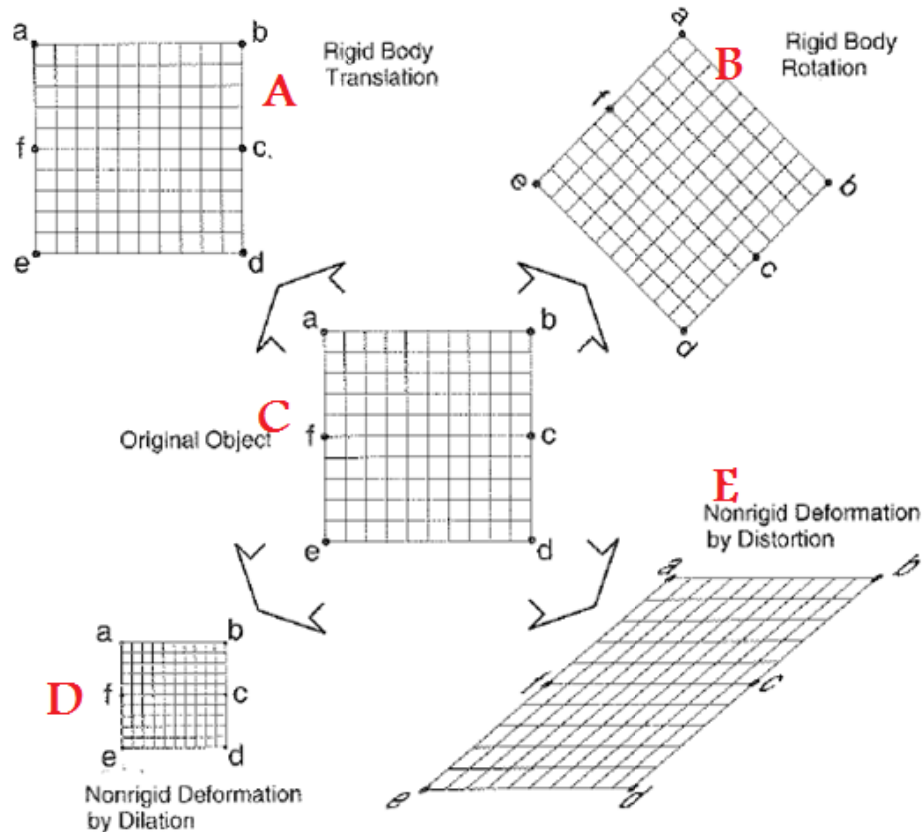


FIGURA 4.13: tipos de movimiento C: Objeto original, A: Traducción de cuerpo rígido, B: Rotación de cuerpo rígido, D: Deformación de cuerpo rígido por dilatación, E: Deformación de cuerpo rígido por distorsión. Modificado de Hatcher (2004).

Las deformaciones del cuerpo rígido se miden por parámetros que expresan el cambio de posición: la traducción rígida por la distancia recorrida por el cuerpo y la rotación rígida por el ángulo que éste ha girado. La deformación interna utiliza parámetros de tres tipos diferentes, que miden respectivamente cambios en la longitud de las líneas, cambios en los ángulos y cambios en volumen. Hatcher (2004).



4.4.1 Deformaciones del Cuerpo Rígido

Traslación = Movimiento de un cuerpo sin rotación o distorsión:

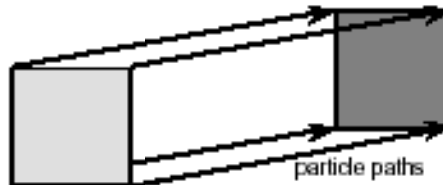


FIGURA: 4.14 Trayectoria de desplazamiento de las partículas de un cuerpo. MARTÍNEZ (2003).

En la traslación, todas las trayectorias de las partículas son rectas, longitud constante, y paralelas a cada una.

Rotación: rotación del cuerpo alrededor de un eje común. En la rotación, las trayectorias de las partículas son curvas y concéntricas. Los sentidos de rotación dependen de la posición del observador. El eje de rotación es definido por un vector indicando en la dirección que el observador está mirando:



FIGURA 4.15: Sentidos de rotación y ejes de los cuerpos, modificado de Martínez 2003.

La traslación y la rotación ocurren comúnmente al mismo tiempo, pero matemáticamente podemos tratarlos por separado.

4.4.2 Esfuerzo (Deformación de Cuerpos No Rígidos)

Cuatro términos muy importantes son tenidos en cuenta:



Continuo: las propiedades de esfuerzos varían suavemente a través del cuerpo sin cambios abruptos.

Discontinuo: Cambios abruptos en las superficies, o rupturas en la roca.

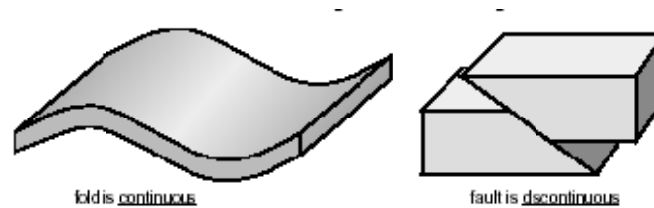


FIGURA 4.16: Relación de deformación continua y discontinua. Modificado de Martínez 2003.

Homogéneo: Las propiedades de esfuerzo son idénticas a través del material.

Cada partícula del material es distorsionada en la misma manera. Hay una prueba simple si la deformación es homogénea

1. Líneas rectas permanecen rectas
2. Líneas paralelas permanecen paralelas

Heterogéneo: El tipo y la cantidad de esfuerzo varia a través del material, así que esa parte es mas deformada que otra parte Este diagrama no se ajusta a la prueba anterior de manera que es heterogéneo. Usted vera que un pliegue seria una deformación heterogénea.

4.4.3 Aspectos de un sistema de deformación.

La posición actual es fácil de obtener. Es solo la longitud y la Latitud, o cualquier medida conveniente que desee utilizar (Ejemplo: Distancia a un punto de referencia).

El desplazamiento es mas difícil de obtenerlo debido a que se necesita saber tanto la posición inicial como la final de la partícula. La línea que conecta las posiciones iniciales y finales es el vector desplazamiento, o la trayectoria de la partícula.

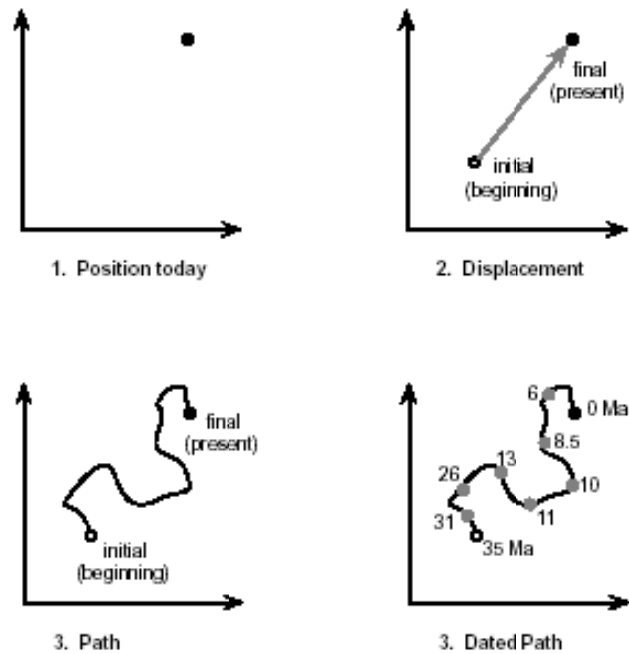


FIGURA 4.17: Aspectos de la deformación, 1) posición actual, 2) desplazamiento, 3) trayectoria, 4) Trayectoria fechada. MARTÍNEZ (2003).

4.4.4 Medida de la deformación:

Hay tres tipos de cosas que se pueden medir

1. Cambios en las longitudes de las líneas
2. Cambios en los ángulos
3. Cambios en volumen

En todos los casos, comparamos un estado final con el inicial. Lo que pasa entre esos dos estados no tiene en cuenta (trayectorias de desplazamiento).



4.4 ROCAS VOLCANOCLÁSTICAS

4.5.1 Conceptos generales.

Las rocas volcanoclásticas son Rocas constituidas por todo tipo de materiales volcánicos clásticos con independencia del proceso de fragmentación, dispersados por cualquier agente de transporte y depositados en cualquier ambiente, o mezclados en proporción significativa con fragmentos no volcánicos. TUCKER 2007

La clasificación es descriptiva –considera el término piroclasto en sentido amplio– y puede ser aplicada a depósitos aéreos de caída, de flujo, avalanchas, lahares, hialoclastitas, brechas intrusivas y extrusivas, diques de tobas, diatremas, etc. Los términos usados en la clasificación sólo describen la granulometría de la roca o depósito, y pueden combinarse con otros términos aportando información composicional o genética. TUCKER 2007

Los límites de tamaño de grano usados son provisionales hasta que exista consenso sobre la división granulométrica de las rocas sedimentarias. El tamaño de grano de un piroclasto se refiere al diámetro medio del individuo, y cuando se considera un conjunto de piroclastos al mayoritario de la población. Normalmente no se indica como se ha determinado el tamaño, cuando se considere necesario puede especificarse el método.

A continuación se explican algunos términos usados en la descripción de rocas volcanoclasticas:

Piroclasto: Fragmento generado por rotura como resultado directo de actividad volcánica explosiva. El fragmento pueden ser un cristal individual, un fragmento de cristales, un fragmento de vidrio o un fragmento de roca. La forma de un piroclasto (adquirida durante la rotura o el transporte posterior, siempre dentro de depósitos primarios) no debe estar alterada por procesos



postdeposicionales, si lo está se denomina piroclasto retrabajado y cuando su origen es incierto epiclasto.

Los distintos tipos de piroclastos se distinguen fundamentalmente por su tamaño:

- ❖ **Bomba:** piroclasto mayor de 64 mm, con forma o superficie externa que indican un estado total o parcialmente fundido durante su formación y transporte.
- ❖ **Bloque:** piroclasto mayor de 64 mm, con forma angulosa o subangulosa que indican estado sólido durante su formación.
- ❖ **Lapilli:** piroclasto de tamaño medio entre 64 y 2 mm, de cualquier forma.
- ❖ **Grano de ceniza:** piroclasto menor de 2 mm. Puede dividirse en:
 - grano de ceniza gruesa (tamaño arena) y
 - grano de ceniza fina (tamaño lutita), también denominado grano de polvo.

Depósito piroclástico: Conjunto de piroclastos, consolidados o no, que contienen más del 75 % en volumen de piroclastos, acompañados de materiales de origen diverso (epiclástico, orgánico, químico o autógeno). Cuando está consolidado se habla de roca piroclástica y cuando no lo están de tefra.

Los siguientes son términos para clasificar rocas piroclásticas unimodales bien calibradas:

Aglomerado: depósito piroclástico formado mayoritariamente por piroclastos mayor de 64 mm, donde predominan los piroclastos redondeados.



Brecha piroclástica: roca piroclástica formada mayoritariamente por piroclastos mayor de 64 mm, donde predominan los piroclastos angulosos.

Lapillita: roca piroclástica formado mayoritariamente por piroclastos entre 64 y 2 mm.

Toba (de ceniza): roca piroclástica, formada mayoritariamente por piroclastos menores de 2 mm. Puede dividirse en toba gruesa y toba fina (toba de polvo).

DENOMINACIÓN:

- **DEPÓSITOS Y ROCAS PIROCLÁSTICAS:**
→ f (tamaño de grano, grado de consolidación, angulosidad):

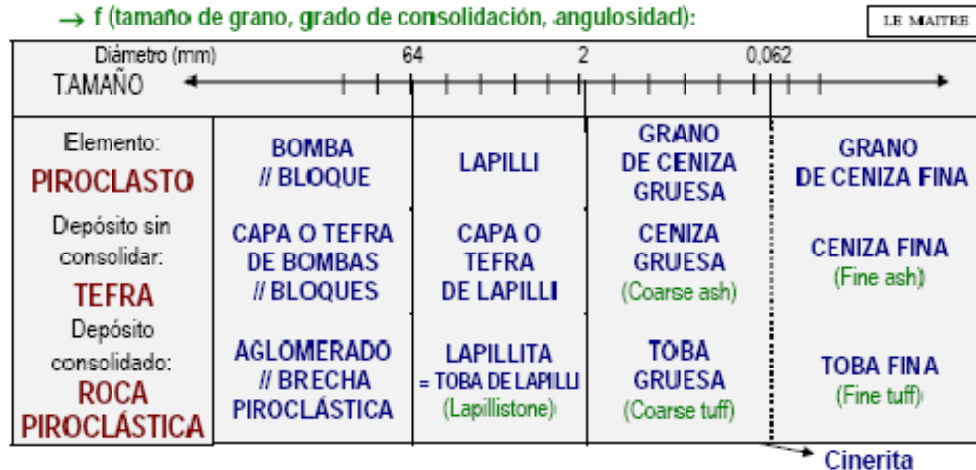


FIGURA 4.18: Denominación de depósitos y rocas volcanoclasticas, modificado de: Tucker 2007

Posteriormente tobas y cenizas pueden clasificarse de acuerdo con la composición mayoritaria de sus fragmentos: toba lítica, toba de vidrio y toba de cristales. Dichos términos pueden ser posteriormente matizados por adjetivos: toba aéreo, de flujo, de lapilli basáltico, lacustre, ceniza riolítica, aglomerado de respiradero. También pueden utilizarse términos genéticos: hialoclastita, depósito de nube ardiente. TUCKER 2007

Rocas piroclásticas pobremente calibrados o polimodales. Pueden



denominarse como combinación de términos:

- Toba de lapilli y cenizas (lapilli > cenizas).
- Toba de cenizas y lapilli (cenizas > lapilli).
- Capa de lapilli y cenizas.
- Tefra de cenizas y lapilli (ceniza > lapilli).

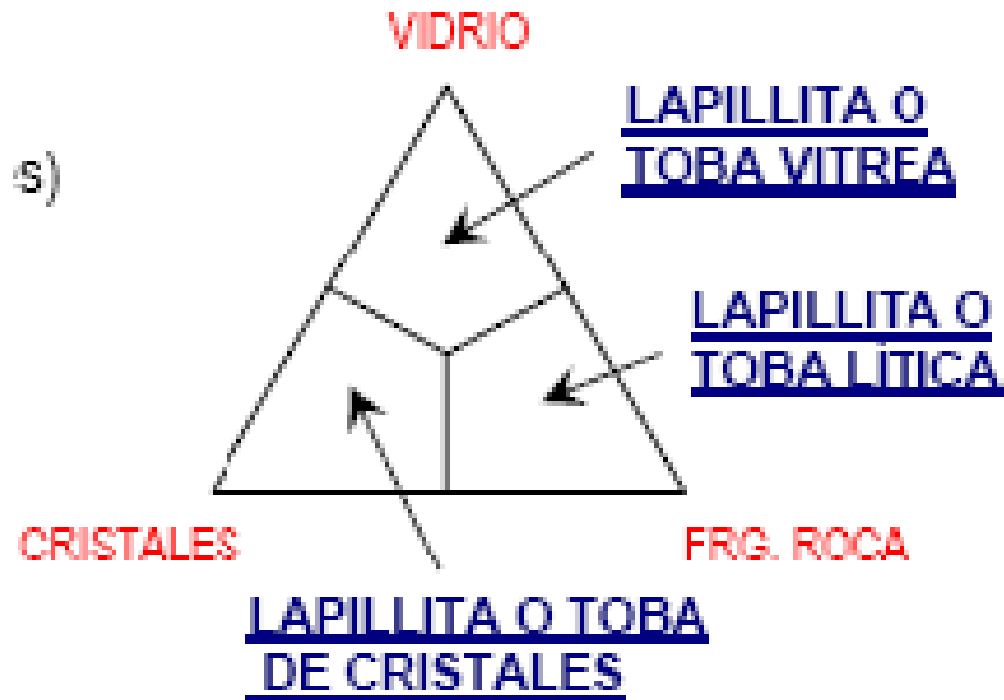


FIGURA 4.19: Clasificación de las rocas volcanoclasticas de acuerdo a los porcentajes de sus componentes

Depósitos mixtos epiclásticos y piroclásticos: Contienen ambos componentes (piroclastos y epiclastos o clastos normales). Para estas rocas se sugiere el término de tobáceas (“tufitas”), y pueden dividirse y denominarse –de acuerdo con su tamaño– añadiendo al término sedimentario normal (conglomerado, arenisca, lutita...) el adjetivo tobácea.

Estructuras de rocas volcanoclasticas

Presentan gran interés en la identificación de las rocas piroclásticas.



Geometría: tamaño y forma del depósito, distribución en superficie (en abanico, relleno de valle...) y distribución vertical (en cuña, lente...)

Estratificación: relación con las superficies subyacente y suprayacente (techo plano y base con relieve erosivo, techo y base paralelas...), sucesión de estratos...

▪ **DEPÓSITOS VOLCANOCLÁSTICOS Y EPICLÁSTICOS:**

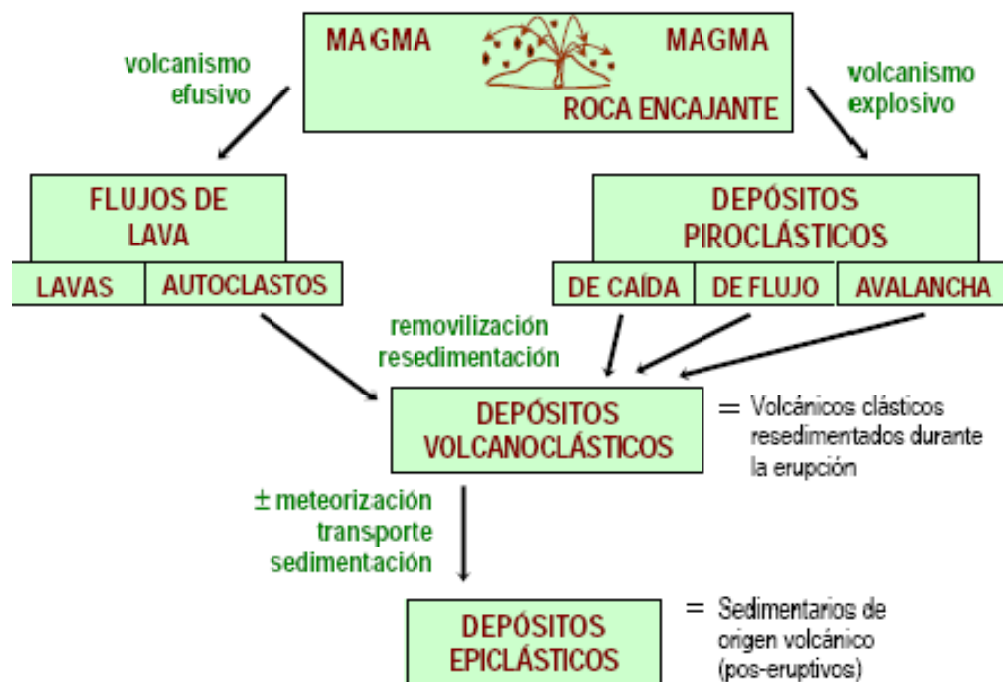


FIGURA 4.20: depósitos volcanoclasticos y epiclasticos, modificado de TUCKER (2007)

Estructuras del interior de los estratos:

Estratos masivos: sin organización visible, de aspecto homogéneo, consecuencia normalmente de su pobre calibrado (lapilli y bloques dispersos de forma irregular en una matriz de grano fino); son propios de depósitos de flujo, lahares y brechas.



Laminación: capas más o menos paralelas de espesor menor de 1 cm.

Estratificación alineada y orientada: disposición en línea de fragmentos aislados o en bandas dentro de capas masivas (los fragmentos son trozos de pumita o líticos de mayor tamaño), normalmente muestran escasa continuidad lateral; cuando los fragmentos son tabulares se orientan según la estratificación generando capas orientadas y fábricas anisótropas; es propia de depósitos de flujo.

Estratificación gradada: cambios verticales progresivos en el tamaño o naturaleza (sobre todo densidad) de los fragmentos dentro de un estrato, pueden presentarse distintos tipos: normal, inversa, simétrica...; es propia de depósitos de caída y puede relacionarse con las características del evento volcánico y sus pulsos (tipo, duración, intensidad...) o con el ambiente de depósito (aéreo, acuoso...)

Estratificación cruzada: conjunto de capas donde cada una de ellas está dispuesta en ángulo con sus contiguas, es debida al movimiento de granos sobre la superficie por el viento o el agua y genera en superficie formas onduladas (ripples o dunas); es propia de depósitos de avalanchas piroclásticas.

Marcas en la superficie de los estratos:

- ❖ Marcas de choque, propias de depósitos de caída
- ❖ Marcas de corriente, propias de depósitos de avalancha
- ❖ Grietas de desecación, propias de depósitos de avalancha
- ❖ Marcas de carga, propias de depósitos de avalancha
- ❖ Estructuras de deformación, propias de depósitos de avalancha



Tipos genéticos de fragmentos volcánicos

Piroclasto: partícula expulsada por cráteres volcánicos, en relación con cualquier proceso relacionado con la actividad volcánica, independientemente de su naturaleza o del origen de la erupción.

Hidroclasto: tipo de piroclasto generado en el contacto agua-magma, donde la fragmentación es debida a explosiones de vapor y al rápido enfriamiento de la lava.

Epiclasto: partícula producida por meteorización y erosión de rocas volcánicas más antiguas (litoclastos de origen volcánico, comunes en arenitas y grauvacas líticas y pueden presentarse en rocas carbonatadas o cualquier otro tipo de roca sedimentaria).

Autoclasto: fragmento producido durante el movimiento de la lava –por fricción mecánica o explosión gaseosa– o durante el desmoronamiento de domos por gravedad.

Aloclasto: fragmento de roca volcánica preexistente, generado por procesos ígneos bajo la superficie terrestre, sin relación con la intrusión de magma nuevo.

Clasificación de los piroclastos por su procedencia

Esencial o juvenil: cuando procede directamente del magma en erupción.

Accesorio o parental: proceden de rocas volcánicas o subvolcánicas de erupciones previas del mismo volcán.

Accidental: del basamento subvolcánico, puede ser de cualquier composición.



5. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO

5.1 GENERALIDADES DEL PROYECTO DE RESCATE PALEONTOLOGICO:

Con el proyecto de ampliación del Canal de Panamá, y la creación de un nuevo juego de esclusas, se ha hecho una gran cantidad de excavaciones en los terrenos que rodean la zona donde se realizara la construcción de un nuevo tramo de canal y un nuevo juego de esclusas correspondiente, lo cual ha permitido la obtención de nuevos afloramientos, en los cuales se pueden observar muy bien los aspectos geológicos mas importantes de los cuerpos rocosos.

En estos nuevos afloramientos se hace necesario recolectar nueva información acerca del estado de la geología estructural, debido a que los muestreos que se están realizando en la zona, los cuales son usados para las investigaciones paleontológicas, geocronologicas y geoquímicas respectivamente, no cuentan con el suficiente soporte de información relacionada con la geología estructural, no solo de la zona correspondiente al Canal si no también a la región alrededor del mismo.

Para el STRI, SMITHSONIAN TROPICAL RESEARCH INSTITUTE, Center for Tropical Paleoecology and Archeology (CTPA), es importante llevar a cabo la recolección de nueva información, la cual es utilizada en el proyecto de rescate paleontológico de Material del Canal de Panamá, labor que se hace con el apoyo de la ACP (Autoridad del Canal de Panama).

Este proyecto consiste en la recolección y clasificación de las especies encontradas, para aplicarlas al estudio del intercambio de especies entre los continentes suramericano y centroamericano.



5.2 LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en afloramientos que están a los lados del canal de Panamá, los cuales principalmente se encuentran en una zona denominada corte Culebra (Galliard Cut), la cual en su mayoría son afloramientos de rocas duras, con secuencias volcanosedimentarias, con litologías de aglomerados, cenizas volcánicas, lodolitas y paleosuelos principalmente.

La zona está comprendida entre la localidad de Gamboa al norte, ubicada en la desembocadura del río Chagres, el cual deposita sus aguas en el Canal de Panamá, y la zona denominada como Lirio al sur, en zonas de control de la ACP.(Autoridad del Canal de Panamá).

En este lugar es donde actualmente se realizan cortes de ampliación del Canal; Corte Culebra. Dicho corte abarca la región comprendida entre las coordenadas W: 643.000–646.000 y N: 1'002.600–1'007.700 con origen "WGS1984/ UTM/ ZONA 17 Norte", representando un área aproximada de 15km².

A medida que se realizaba el estudio correspondiente, se determinó ordenar los afloramientos en secuencia, a medida que se hacía un análisis de la zona.

En total se describen 8 afloramientos, cada uno identificado con un número, de acuerdo a medida que se iban tomando datos y clasificando. Los afloramientos por formaciones son los siguientes:

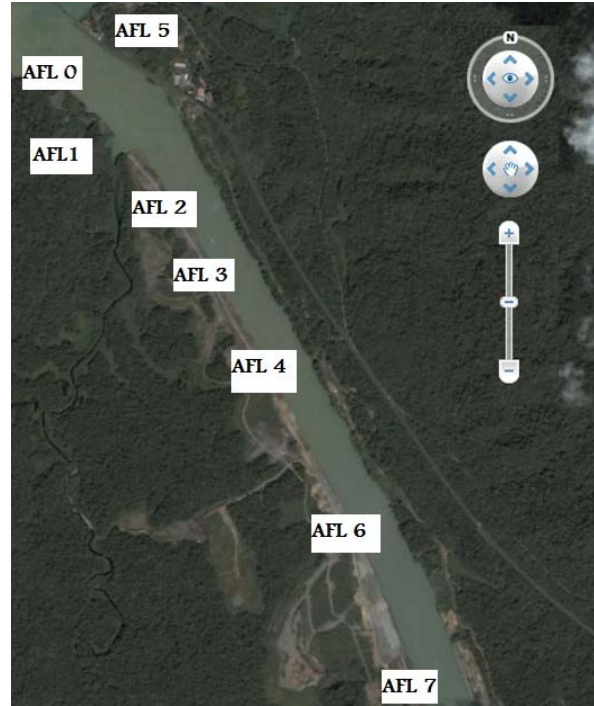


FIGURA 5.2: Mapa topográfico con la localización del área de estudio (Canal de Panamá), se señalan los afloramientos y su ubicación

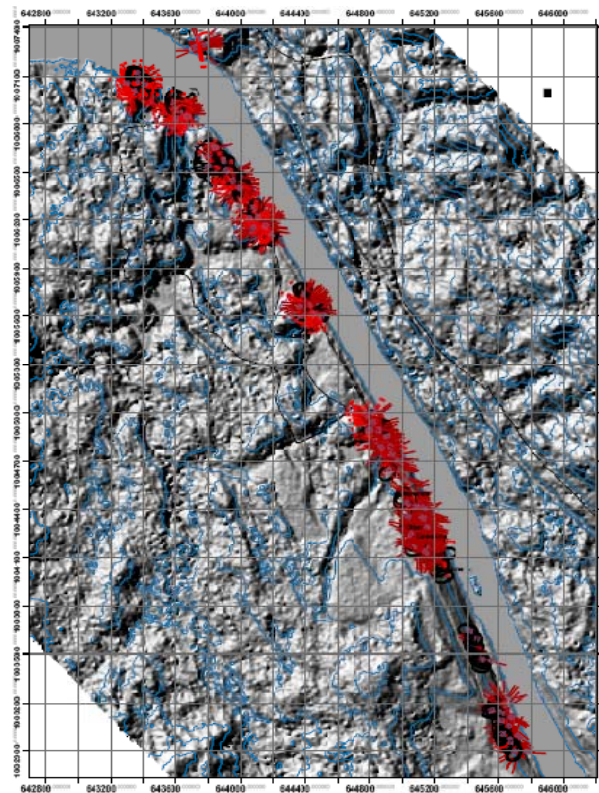


FIGURA 5.3: mapa georeferenciado con la ubicación de los afloramientos



5.3 MARCO TECTONICO REGIONAL

La Cuenca del Canal de Panamá es una estructura terciaria que abarca la frontera entre los bloques tectónicos de Chorotega y Choco, pertenecientes a la microplaca de Panamá.

Como parte del arco volcánico de América Central, la Microplaca de Panamá fue formada a través de la subducción de las diversas placas oceánicas durante el Cretácico y Cenozoico.

Esta microplaca se encuentra entre las placas de Cocos y de Nazca, al sur, la placa Caribe hacia el norte y la placa de América del Sur hacia el este.

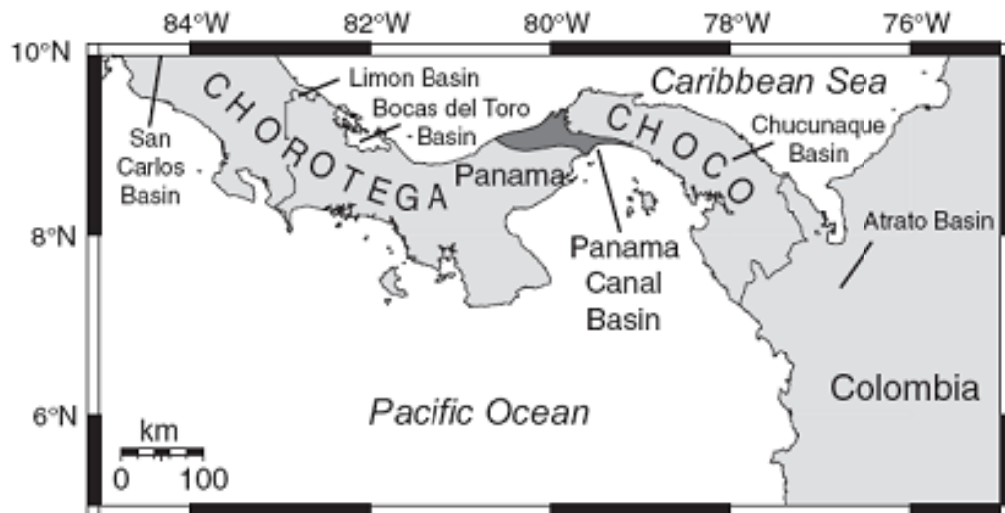


FIGURA 5.4: Localización de los principales bloques de Panamá. Kirby Et Al, (2008).

La formación de la Cuenca del Canal de Panamá puede estar relacionada hipotéticamente con la Zona de Falla Gatún, que puede representar la frontera tectónica entre los bloques Chorotega y Choco, en este caso puede inferirse la existencia de una profunda zona de cizalla con tendencias noroeste-sureste, aproximadamente paralelo al Canal de Panamá. Se especuló que esta zona oculta puede ser responsable de un desplazamiento lateral y pueden ser de edad Cenozoico temprano.

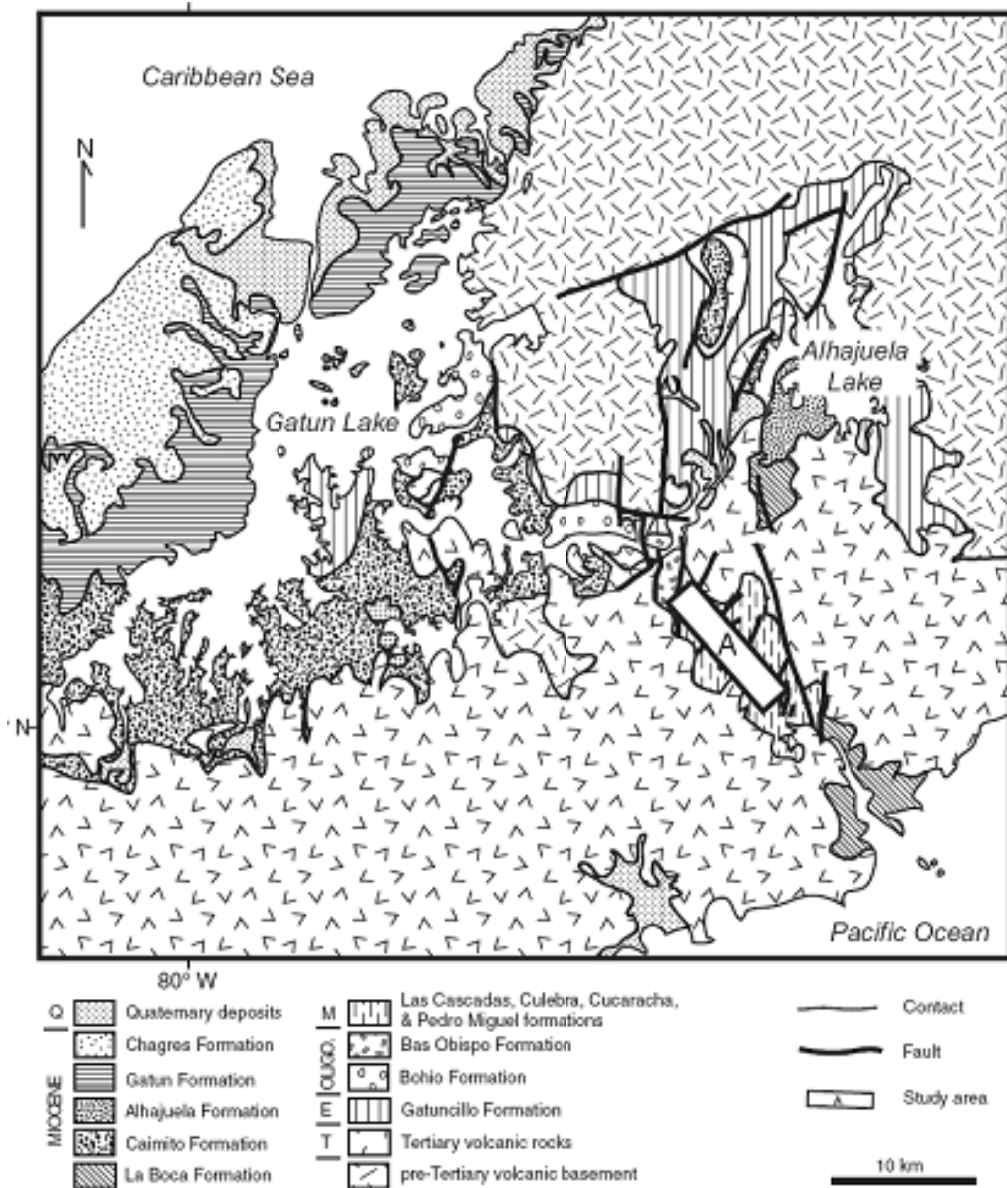


FIGURA 5.5: Geología general de la cuenca del canal de Panamá. Kirby Et Al, (2008).

Sin embargo, en la Cuenca del Canal de Panamá existe en un área estructuralmente compleja, indicada por miles de tendencias conjuntos de fallas noreste-suroeste.

La naturaleza de la tectónica de esta cuenca sigue siendo poco claro, pero puede representar un cuenca antearco activo o fisura.

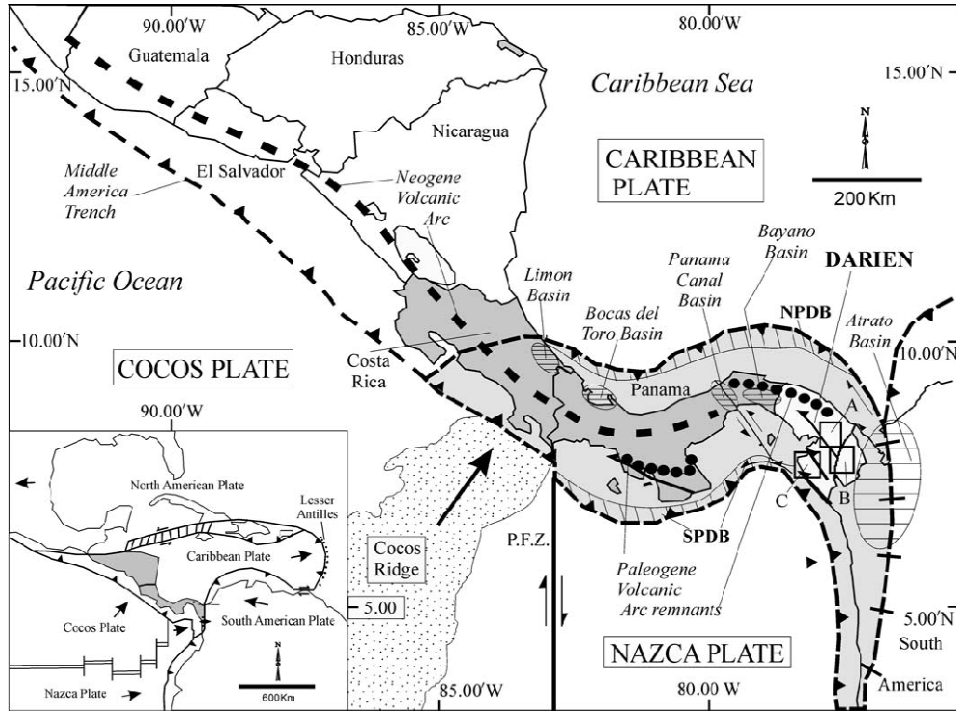


FIGURA 5.6: Ubicación de la Microplaca de Panamá y las placas relacionadas. Kirby Et Al, (2008).

5.4 ESTRATIGRAFIA REGIONAL

La Cuenca del Canal de Panamá contiene una espesa secuencia de sedimentos y rocas volcánicas (2900 m) del Eoceno al Pleistoceno. Las unidades sedimentarias inferiores corresponden a la unidad Formación Gatuncillo (Eoceno), que contiene mudstone marinos, limolitas y calizas, y basamento pre-Terciario volcánico.

Superpuestos a la formación Gatuncillo, esta la Formación Bohío (Oligoceno), que contiene conglomerado marino y no marino, arenisca tufacea y limolita.

Estratigráficamente superior se encuentran las formaciones Bas Obispo



(Oligoceno) y Las Cascadas, que constan de aglomerados y tobas.

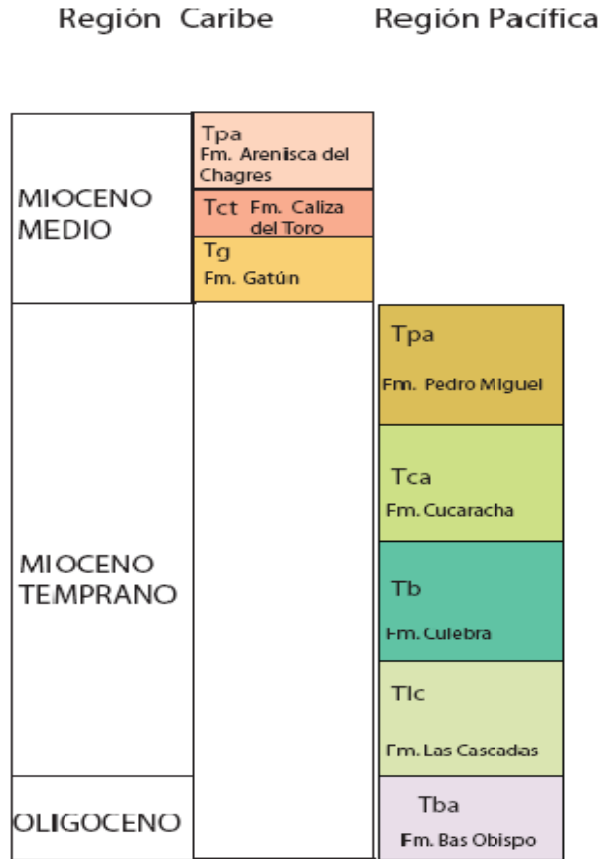


FIGURA 5.7: Esquema de correlación litoestratigrafica de las secciones realizadas por Morón y Montes 2008.

Superpuestos de una manera conforme a la Formación Las Cascadas esta la Formación Culebra (Mioceno inferior) que contiene mudstone marina, arenisca, caliza, conglomerado y lignito.

Las secciones de La Boca, y Alhajuela Caimito son correlativas con la Formación Culebra, la cual es suprayacida por la Formación Cucaracha (Mioceno medio) y consiste en arcillas, arenisca, conglomerado y lignito, que muestra desarrollo de paleosuelos.



La Formación Pedro Miguel (Mioceno medio) suprayace conforme a la Formación Cucaracha y contiene basaltos y aglomerado.

Estratigráficamente mas arriba se encuentra la Formación Gatún (Mioceno superior) que contiene limolitas marinas, arenisca y conglomerado.

5.5 ANTECEDENTES

La zona norte del área de estudio ha sido visitada por escasos geólogos hacia la zona donde aflora la Formación Bas Obispo, no así el área que va desde el tope de esta Formación hacia el sur. Esto se debió a su potencial paleontológico y estratigráfico, así como al más fácil acceso de la zona sur.

Las Formaciones Las Cascadas, La Caliza Emperador, Culebra, Cucaracha y Pedro Miguel fueron descritas por primera vez por Hill (1898) y Howe (1908). Posteriormente el Departamento de Operación y Mantenimiento del Canal de Panamá, realizo nuevos estudios para la excavación de un Tercer Juego de Exclusas (1941), el cual corresponde a un compilado de libros con mayor carácter de ingeniería que de geología, pero con pequeñas descripciones de algunas rocas y fósiles encontrados en la zona. El primer estudio regional de importancia corresponde a Woodring & Thompson (1949), quienes describieron cuidadosamente la estratigrafía y paleontología y establecieron su estructura en un mapa geológico que abarca desde la Formación Gatuncillo hasta la Formación Chagres (Eoceno tardío – Plioceno temprano). Woodring (1964) cambia la posición estratigráfica de la caliza Emperador volviéndola un miembro de la Formación Boca y finalmente Stewart et al., (1980) consideran que la formación Las Cascadas es Mioceno Superior.

Kirby MX, Jones DS & MacFadden BJ (2008) hicieron un detallado estudio estratigráfico del Mioceno temprano donde citaron diferentes formaciones aflorantes en el Canal, retomando el concepto de Woodring y Thompson (1948), con el siguiente orden estratigráfico: Formación Bas Obispo, Formación



Las Cascadas, Formación Culebra con un miembro medio que lo llaman Caliza del Emperador, La Formación Cucaracha y al tope la Formación Pedro Miguel, corroborando las edades con quimioestratigrafía de Estroncio, asimismo proponiendo la eliminación de la Formación la Boca.

En el año de 1949, Woodring y Thompson, realizan un estudio general de la estratigrafía de el canal de Panamá, y sus aspectos más sobresalientes.

En la década de los 50, el gobierno de los Estados Unidos representado por la ACP (AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMA), realiza varios estudios generales de tectónica y geología estructural, con el fin de determinar la viabilidad y posibilidad de la ampliación del canal y la creación de un nuevo juego de esclusas.

En 1992, Coates, realiza un estudio relacionado con las posibles fechas del cierre del istmo de Panamá.

En 1994, Mann y Kolarsky realizan un estudio general sobre el cinturón deformado del este de Panamá.

En 2006, Johnson y Kirby, realizan un estudio estratigráfico sobre las calizas Emperador, para definir si es una formación independiente de la formación Culebra.

En 2007, Kirby realiza un nuevo estudio estratigráfico, con el fin de aportar información nueva relacionada con la estratigrafía del Canal de Panamá.

En 2007, Molnar realiza un estudio con el objetivo de entender cuáles son los aspectos más importantes relacionados con el istmo de Panamá, y las posibles edades de su conexión.



6. ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Canal de Panamá es de edad Terciaria, abarcando la frontera tectónica entre los bloques Choco y Chorotega de la cuenca de Panamá (Coates AG 1999). Hace parte del arco volcánico de América Central, formado a través de subducción de las diversas placas oceánicas durante el Cretácico – Cenozoico. Esta microplaca se encuentra entre la placas de Cocos y Nazca, al sur, la placa del Caribe hacia el norte y la Placa de América del Sur hacia el este. Esta cuenca existe en un área estructuralmente compleja, como se explica por la gran densidad de fallas con rumbo Noreste – Suroeste. El lugar exacto de naturaleza tectónica de esta cuenca sigue siendo poco claro, pero representan una cuenca de antearco activa (Mann P 1995).

La Cuenca del Canal de Panamá contiene una espesa secuencia de sedimentos y rocas volcánicas (2900 m), de edad Eoceno - Pleistoceno.

Las sedimentarias inferiores corresponden a la Formación Gatuncillo (Tgo) de edad Eoceno, que contiene shales marinos, limolitas y calizas, de contacto inconforme con rocas volcánicas de edad pre-Terciario (Woodring WP 1957–1982). Superpuestos a la Formación Gatuncillo se encuentra la Formación Bohio (Tbo) de edad Oligoceno, que contiene conglomerados marinos y continentales, arenisca tobacea y limolitas (Woodring WP 1957–1982). Estratigráficamente superior y como base de este trabajo son las Formaciones Bas Obispo (Tba) y Las Cascadas (Tlc), que están compuestas por aglomerados y tobas. Superpuestos concordantemente a la Formación Las Cascadas se encuentra la Formación Culebra (Tcb) de edad Mioceno Inferior (este estudio), que contiene shales marinos, arenisca, caliza, conglomerado y lignito (Woodring WP 1957–1982).

Al tope de la Formación Culebra concordantemente se encuentra la Formación Cucaracha (Tca) de edad Mioceno Medio. Consiste en arcillolita, arenisca, conglomerado y lignito, mostrando paleosuelos en desarrollo.

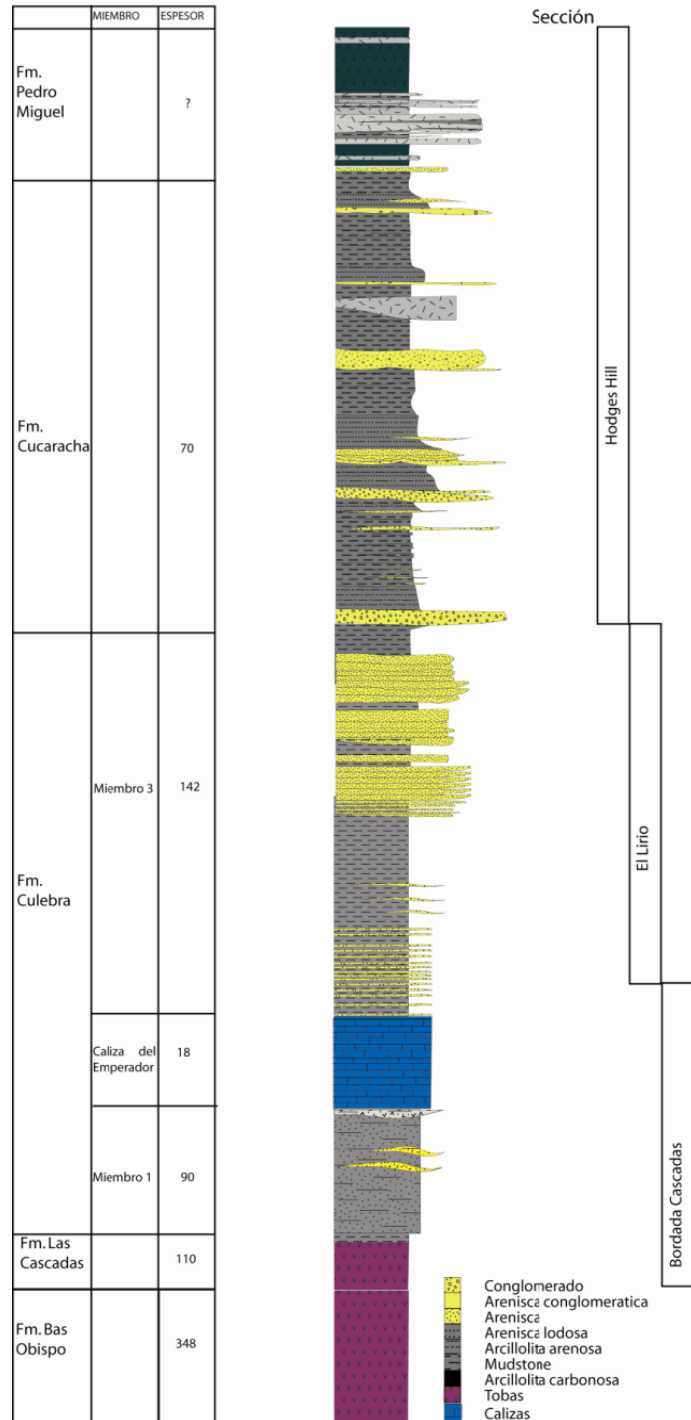


FIGURA 6.1: Columna estratigráfica generalizada del area de estudio, Modificado de Morón y Montes 2008.



También del Mioceno Medio se encuentra la Formación Pedro Miguel (Tpa) concordantemente sobre la Formación Cucaracha. Contiene Basalto y Aglomerado. Estratigráficamente mayor es la Formación Gatún (Tg) de edad Mioceno Superior que contiene shales marinos arenisca y conglomerado.

La Formación Gatún está cubierta discordantemente por la Formación Chagres (Tc) de edad Mioceno Superior. Consta de arenisca conglomeratica y en su base "Coquina" del miembro Toro (Collins LS, Coates AG, Berggren WA, Aubry MP, Zhang J 1996).

Inconformemente por encima de las rocas del Terciario se encuentran formaciones no consolidadas; depósitos del Cuaternario (Qr) y (Qa), informalmente conocidos como el "Pacífico Muck" y "Atlántico Muck" (Woodring WP 1957–1982).

6.1 FORMACIÓN BAS OBISPO (Tba)

La Formación Bas Obispo fue descrita por Howe (1907), quien la designó Formación Obispo o Brechas de Obispo. El incluyó en la Formación los piroclastos pertenecientes a la denominada Formación Las Cascadas (McDonald 1913). Su localidad tipo se encuentra en el sector más norte del antiguo corte Gaillard, hasta donde termina la carretera que bordea el Canal.

En los 6 afloramientos estudiados correspondientes a la formación Bas Obispo, se encontró que están conformados por capas muy gruesas y macizas de tobas de aglomerados de coloraciones negro, gris y ligeras tonalidades verde oscuro. Composicionalmente están compuestas por material máfico con 65% de matriz y 35% de fragmentos líticos, de tamaño superior a los 64mm. Los fragmentos líticos son angulares a subangulares, de composición andesítica y basáltica, embebidos en una matriz tobacea. Se observa que el tamaño de los aglomerados puede varias de fragmentos de unos pocos centímetros, a grandes bloques angulares.



FIGURA 6.2: Afloramientos correspondientes a la Formación Bas-Obispo, Corte Culebra, Canal de Panamá.

Los aglomerados se encuentran intercalados por capas medias de tobas de cenizas volcánicas color negro – grisáceo, de composición máfica, con tamaño de grano de cenizas gruesas. En muestra de mano las tobas de ceniza presentan un armazón compuesto por 70% de granos cementados y 30% de matriz, no se observan vesículas ni amígdulas. No es muy común encontrar estas capas debido a las características masivas y homogéneas del aglomerado, pero son indicadores del sentido y la dirección del plano de estratificación.



FIGURA 6.3 : Afloramiento 3 de la formación Bas Obispo, se señalan los planos de estratificación observados en las tobas.



FIGURA 6.4: Afloramiento 4 de la formación Bas Obispo, se señalan los planos de estratificación observados en las tobas.

6.2 FORMACIÓN LAS CASCADAS (T1c)

Su localidad tipo se encuentra al norte del corte Gaillard, en el sector conocido para la Autoridad del Canal como Sector Cascadas, esta Formación es de edad Oligoceno Tardío (Kirby *et al.*, 2008).

Se presenta suprayaciendo la Formación Bas Obispo, el tipo de contacto inferior permanece aun indeterminado debido a que no se encuentra expuesto y se infirió para este estudio. Hacia el tope la formación Cascadas es suprayacida por la formación Culebra, presentando un contacto fallado en la mayoría del area estudiada.

Es de importancia señalar que en este estudio se encontró por primera vez el contacto neto de la Formación Cascadas con la Formación Culebra.



FIGURA 6.5: Tobas varicoloreadas pertenecientes a la Formación Cascadas

La Formación Las Cascadas consiste en una serie de tobas, en su mayoría vítreo cristalinas, con colores que varían desde blancas, grises, verdes, morados, rojizos y negros.

En general las tobas de coloraciones grises son tobas vítreo lítico cristalinas y presentan fragmentos mayores a 1cm de coloraciones verdes blancas y grises. En algunas ocasiones se presentan embebidos fragmentos de texturas fibrosas mayores a 5cm de longitud.

Las rocas de coloraciones blancas, verdosas, moradas y rojizas son en su mayoría tobas de lapilli vítreo cristalinas con porcentajes de matriz mayores a 70% y cristales de menos de 2mm. Adicionalmente se observan en menor proporción rocas de color negro, con texturas similares a “burbujas” de menos de 1cm y “fractura concoidea” se asemejan a vidrio volcánico.



FIGURA 6.6: Tobas vitreo lítico cristalinas y presentan fragmentos mayores a 1cm



FIGURA 6.7. Fragmentos de texturas fibrosas mayores a 5cm de longitud



Al tope de esta unidad se han encontrado abundantes restos de mamíferos muy bien preservados, esta capa podría representar el desarrollo de paleosuelos derivados de las tobas. Debido a la meteorización dichas tobas pueden ser fácilmente confundidas con las lodolitas varicoloreadas de la Formación Cucaracha, siendo la ausencia de conglomerados y arenitas, además de la presencia de finos cristales de menos de 2mm (feldespato) en las tobas más finas el criterio para confirmar la Formación Las Cascadas.



FIGURA 6.8: Contacto superior de la formación Cascadas con la formación Culebra, en rojo contacto Fallado, en amarillo contacto neto.

6.3 FORMACIÓN CULEBRA (Tcb)

Su localidad tipo se encuentra en el corte Gaillard bordeando el canal, en el sector conocido para la Autoridad del Canal como Lirio hasta Hedges Hill. La Formación Culebra puede ser separada en cuatro miembros informales, siendo



la primera una secuencia de lodolitas a lodolitas arenosas con escasas capas medias lenticulares de arenitas, la segunda la denominada Caliza del Emperador, líticas, con una capa media de cenizas hacia el tope, la tercera consiste en lodolitas negras y la ultima presenta capas gruesas a muy gruesas de arenitas intercaladas con capas delgadas a medias de lodolitas.



FIGURA 6.9 Coral cerebro fósil rodado, perteneciente a la base de la formación Culebra.

El primer miembro consiste de intercalaciones de capas medias de lodolitas con capas gruesas a muy gruesas de biomicritas macizas, algunas capas de lodolitas presentan abundantes fragmentos fósiles (Corales, Pectinidos y erizos de mar). El espesor y porcentaje de clásticos en las biomicritas aumenta al tope, corales cerebro se encuentran presentes hacia la base.

El miembro inferior de la Formación Culebra es sólo expuesto en el sector conocido por la Autoridad del Canal como Lirio. Consiste de capas de lodolitas carbonosas (Líneas Amarillas FIGURA 6.10, intercaladas con capas delgadas



de arenitas líticas fosilíferas. (FIGURA 6.10) La base de este miembro inferior está definida por capas de lodolitas negras con abundante materia orgánica, intercaladas por capas delgadas de calcarenitas y capas muy delgadas de conglomerados calcáreos.



FIGURA 6.10: Formación Culebra, detalle de los miembros más importantes.



FIGURA 6.11. Presencia de Capas de lodolitas carbonaceas en la formacion Culebra.

El tope del miembro inferior, está constituido por una capa de arenitas líticas de grano fino, donde se encontraron pectinidos (*Lepidopecten proterus*) y (*Spondylus scoth*). El miembro inferior de la Formación Culebra representa el inicio de un evento transgresivo con desarrollo de paleosuelos. Por debajo de estos se observa la secuencia volcánico-clástica de la Formación Las Cascadas y por encima los shales someros de la Formación Culebra (Kirby et al. 2008). Se observa alto grado de bioperturbación, reflejada por la presencia de *Thalassinoides sp.*

El segundo miembro es Las calizas de El Emperador. Consta de cinco facies diferentes. La base está compuesta por capas concordantes de calcarenitas de grano fino con presencia de pectens con abundancia de *Acropora saludensis* y *Montastraea canalis*. La segunda consiste de calizas de color blanco. La tercera está compuesta de corales ramificados con predominio de *Acropora saludensis*, *Stylophora granulate* y *Porites douvillei*, los cuales se encuentran



en una matriz lodosa con corales cerebro y presencia de *Montastraea* en posición de vida. La cuarta facies consiste en corales tabulares en bloques “platy coral boundstone” de color blanco; y la última facies son fragmentos de corales en una matriz de calcarenitas con presencia de *Montastrea* y gran cantidad de especies de *Porites* (Kirby *et al.*, 2008). El Emperador Limestone representa una franja de arrecifes protegidos por una laguna vecina, representada por el carbón lodoso.



FIGURA 6.12. Presencia de *Thalassinoides* en la Formación Culebra.

El tercer miembro presenta un cambio abrupto y fácilmente reconocible debido a su coloración negra. Se caracteriza por presentar una secuencia de lodolitas negras laminadas, fragmentos fósiles como hojas, fósiles, semillas, cangrejos y dientes de tiburón.

Ascendiendo estratigráficamente se observan intercalaciones de láminas delgadas de arenitas líticas con estratificación cruzada y laminas carbonosas.



Dos tipos de concreciones pueden ser diferenciadas, unas mayores a 15cm de forma ovalada compuestas por carbonato y las otras de formas redondeadas con abundantes fragmentos vegetales, compuestas por arenitas cementadas con carbonato de calcio, que siguen un mismo nivel estratigráfico.



FIGURA 6.13: Diente de tiburón.

También se pueden encontrar escasas capas delgadas de conglomerados de granulo de similar composición a la de las arenas, hacia el tope las capas de arena aumentan en espesor y grado de bioperturbación.

El miembro más superior esta marcado por la aparición de una capa media de arenitas líticas con estratificación cruzada. Esta unidad se caracteriza por presentar secuencias de capas medias de lodolitas negras laminadas, con alguna bioperturbación que posteriormente se intercalan con juegos de capas medias a gruesas subtabulares de arenitas con cuarzo, líticas y abundantes fragmentos fósiles retrabajados (ostreidos), algunas de estas presentan



estratificación cruzada, también se pueden encontrar escasas capas delgadas de conglomerado de gránulo de similar composición a la de las arenitas, hacia el tope las capas de arenitas aumentan en espesor y en grado de bioperturbación .



FIGURA 6.14: Concreciones encontradas en la Formación Culebra.



FIGURA 6.15: estratificación cruzada observada en la formación Culebra



FIGURA: 6.16: Capas de arenas (Encerradas en líneas rojas) intercaladas con capas de lodolitas. Formación Culebra.



7. GEOLOGIA ESTRUCTURAL

7.1 FORMACIÓN BAS OBISPO (Tba)

La formación se encuentra altamente fallada, con cristalización de venas de calcita asociadas a los planos de falla, con escalonamiento y estrías de falla, como resultado de movimientos en diferentes direcciones. Debido que se encuentran predominio de fallas normales que tienden a ser paralelas, se resalta la mineralización de calcita en la misma dirección de deformación. La calcita en muestra de mano aparece masiva, de color blanco lechoso, y en ocasiones teñido de verde claro por la alteración meteórica del aglomerado. En ocasiones presenta pequeñas geodas de calcitas un poco más más transparentes, cristalizadas y de tamaño milimétrico. La meteorización esferoidal es muy común en esta unidad, alcanzando diámetros hasta de 2m.



FIGURA 7.1: Vena de Calcita relleno una falla perteneciente a la Formacion Bas-Obispo, Afloramiento 5



Este trabajo propone por primera vez un espesor para esta unidad, utilizando la metodología de cortes estructurales, debido a que no fue posible levantar una sección estratigráfica detallada dada la alta complejidad estructural y la ausencia de una capa guía. El espesor calculado en este trabajo es de 345m. Su contacto a la base con la formación Bohío es de tipo concordante neto (Woodring & Thompson 1949), y al tope con la formación Las Cascadas; el cual es inferido.



FIGURA 7.2 Afloramiento 2 de la Formación Bas Obispo.

DATOS	FORMACION BASOBISPO		
	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	235	121	58
ESTRATIFICACION	71	134	35
ZONAS DE CIZALLA	100	168	55

Tabla 7.1: Datos estructurales planares de la formación Bas Obispo.



Estructuras planares:

Planos de falla: Estos planos se evidenciaron por la existencia de estrías de falla en el plano o por desplazamiento de bloques evidente en el afloramiento. En total se midieron 234 planos de fallas, los cuales son bien evidentes en las rocas que presentan mayor compactación y menor alteración.

Para el análisis de estos datos se realizó un análisis estadístico y su comportamiento en redes estereográficas, con el fin de ser plasmados en el corte estructural, donde se evidenció el predominio de esfuerzos de tipo extensivo, con tendencias de fallas de tipo normal, con dirección Sureste del bloque colgante, en sistemas de fallas conjugadas, con fallas inversas en dirección Suroeste del bloque cabalgante. También se evidenciaron fallas de rumbo tanto dextrales como sinestrales, las cuales siguen tendencias paralelas, en proporciones mayores para las fallas normales y en menor cantidad para las fallas inversas.

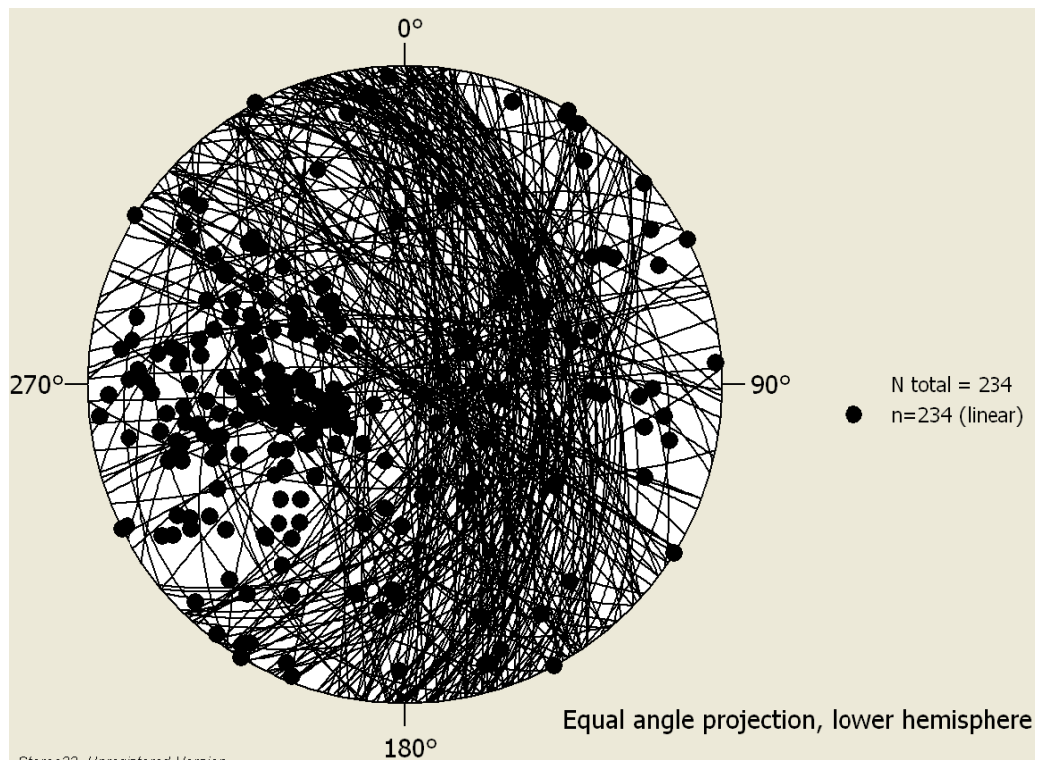


FIGURA 7.3: Diagrama de polos de datos de fallas para la formación Bas Obispo



Planos de estratificación (Normal Bedding): En la Formación Bas Obispo se tomaron algunos datos, observados en los contrastes entre las tobas de aglomerados y las tobas de cenizas volcánicas, generando replegamiento interno y a su vez una estructura sinclinal. Presentan dirección preferencial de buzamiento Nor-Este, presentándose muy poca variación de algunos datos alejados del promedio.

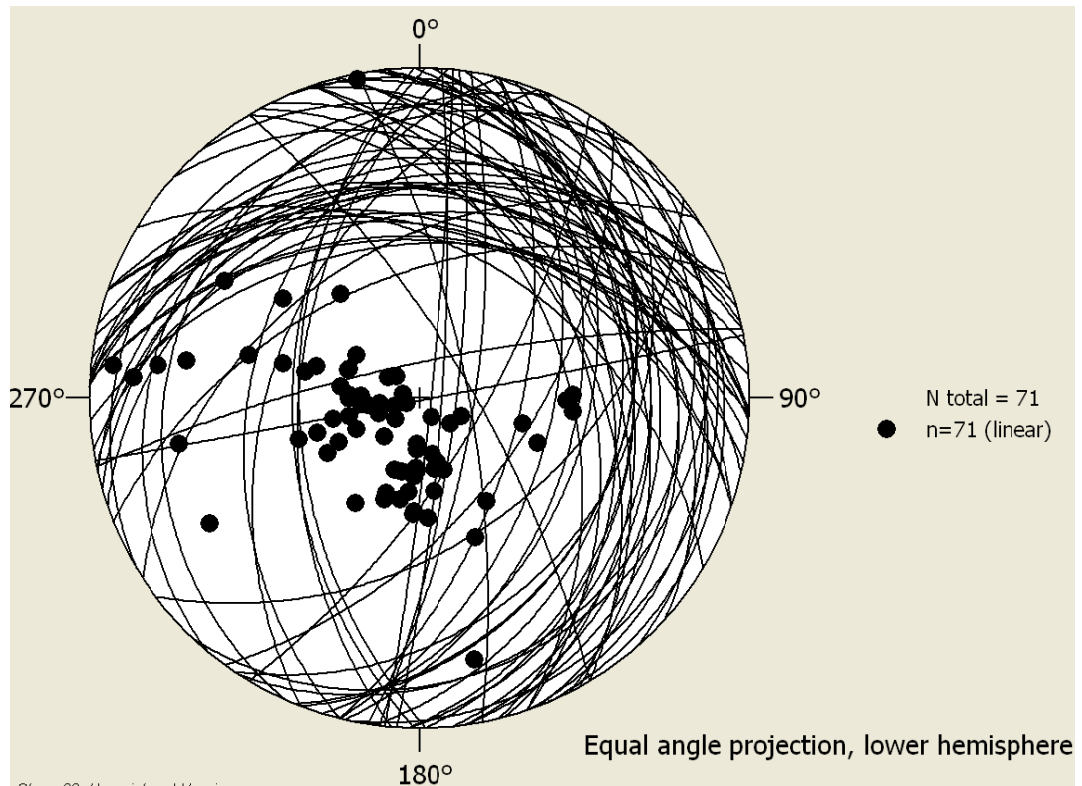


FIGURA 7.4: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación Bas Obispo

Zonas de Cizalla: Se establecieron por la observación en campo de grandes fracturas, con una dirección e inclinación preferencial, las cuales presentan determinada continuidad y sin evidencia de estrías de falla en el plano de fractura.

Se observa que se presentan paralelas a los planos de las fallas normales. Sin embargo, en algunos casos se observó cizallas que se encuentran con dirección de buzamiento diferente a NE.

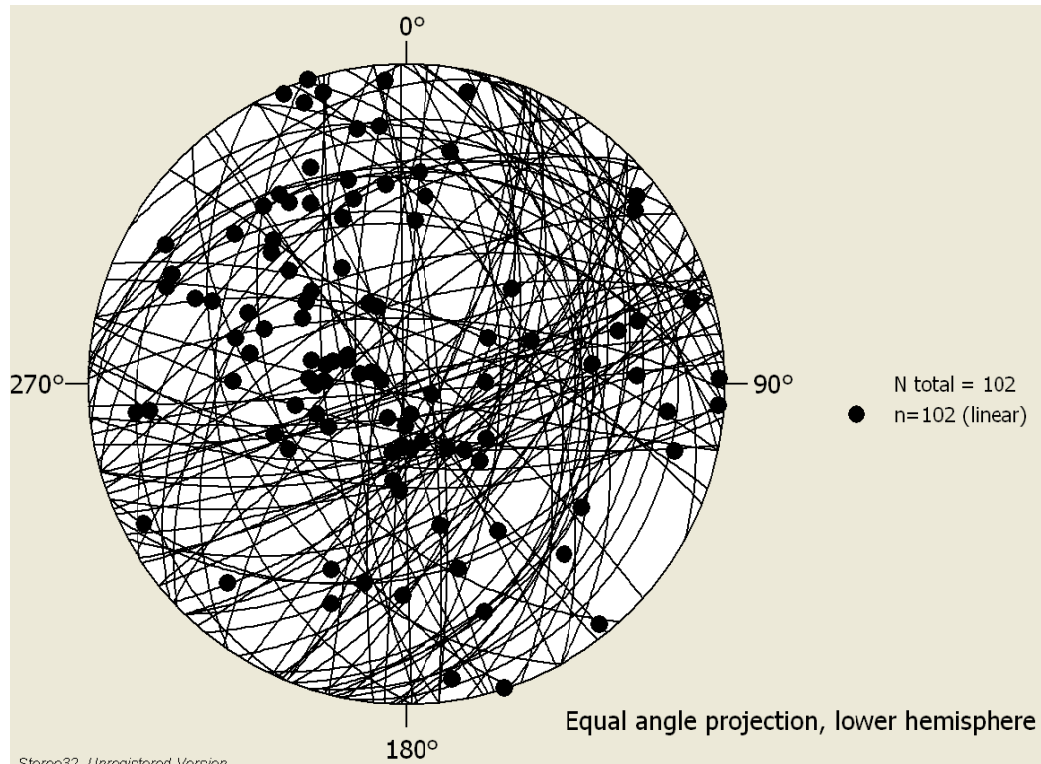


FIGURA 7.5: Diagrama de polos de datos de cizallas para la formación Bas Obispo

Estructuras lineales: Estrías de falla: para que ocurra la formación de estrías de falla es necesario la existencia de un plano de falla, desplazamiento de la falla y simultáneamente crecimiento de cristales en la dirección de movimiento y por último, la exposición de la superficie de la estría por erosión o alteración Davis *et al.*, (1996).

TIPO DE FALLAS	FORMACION BAS OBISPO		
	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
NORMALES	83	92	49
INVERSAS	49	149	65
DESTRALES	17	164	30
SINISTRALES	16	120	24

Tabla 7.2: Datos lineales de la Formación Bas Obispo.

Estas estrías son bien evidentes en las rocas de la Formación Bas Obispo, las cuales presentan mineralización y escalonamiento, observándose buenos ejemplos de este tipo de estructuras. Los datos medidos de estrías de falla, en



su mayoría correspondiente a fallas normales con tendencia de buzamiento NE, seguidos de fallas inversas con direcciones opuestas.

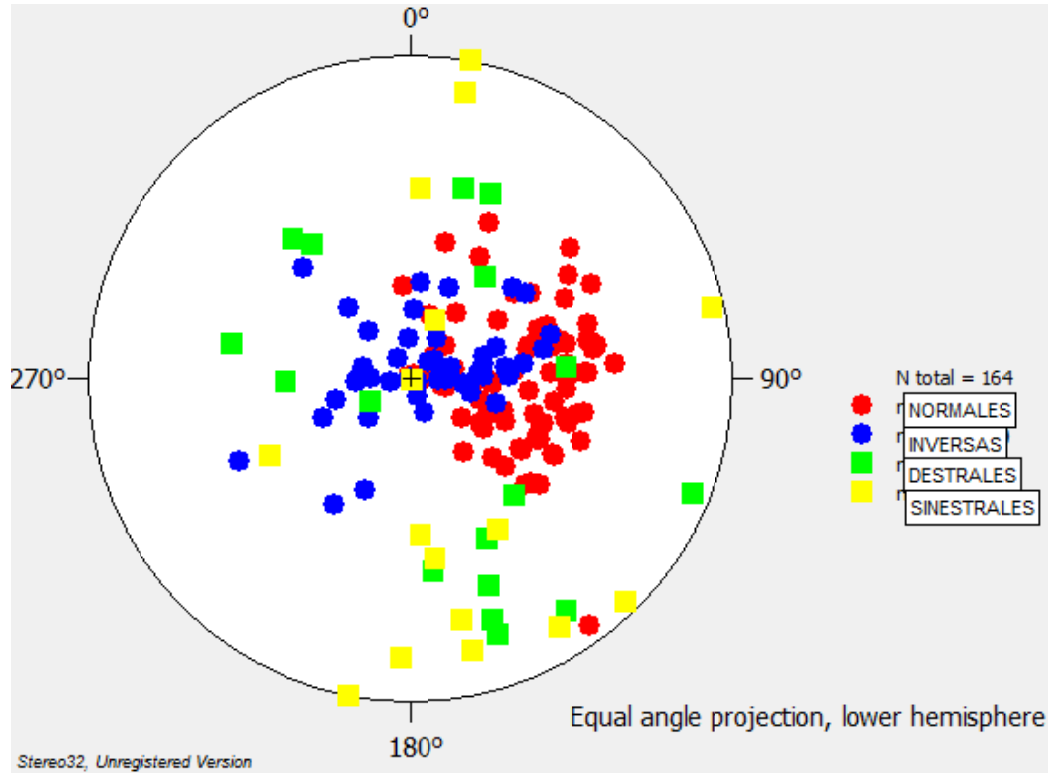


FIGURA 7.6: Diagrama de polos de datos de estrias para la formación Bas Obispo

7.2 FORMACION CASCADAS

FORMACION CASCADAS			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	229	159	55
ESTRATIFICACION	28	163	24
ZONAS DE CIZALLA	31	128	41

Tabla 7.3: Datos estructurales planares medidos en la Formacion Las Cascadas.

Planos de falla: Para la formación Las Cascadas se encontró una dirección de buzamiento dominante Este-Sureste, presentándose una tendencia en la magnitud y dirección de buzamiento de las fallas normales.

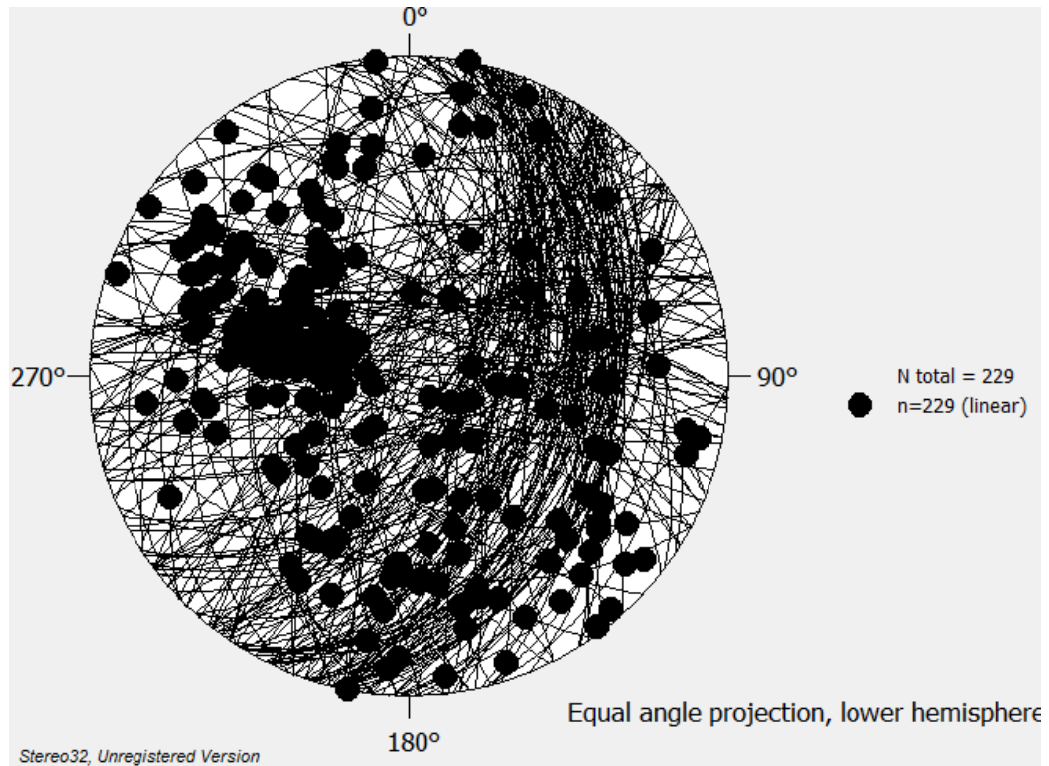


FIGURA 7.7: Representación estereográfica de las fallas presentes en la Formación Las Cascadas. se observa la tendencia de la orientación sur-este de los planos de Falla

Planos estructurales: En la Formación Las Cascadas, se tomaron mayor cantidad de datos, debido a que se evidenciaban diferentes cambios litológicos, donde fue posible obtener medidas de planos estructurales, en los cuales se observa replegamiento interno, debido a la competencia del material, con buzamientos de bajo ángulo, pero consolidando una estructura de tipo sinclinal.

Cizallas: Se presentan en menor cantidad que en formaciones de material más compacto, presentan una dirección de buzamiento Nor-Oeste, son difíciles de observar debido a que la meteorización borra las marcas que dejan.

Estructuras lineales: En esta formación se observa que se mantiene la tendencia en cuanto a la orientación de las fallas normales y de las fallas inversas, presentada en la formación Bas Obispo, se observan a lo largo de la formación, e indican el fracturamiento que presenta la formación.

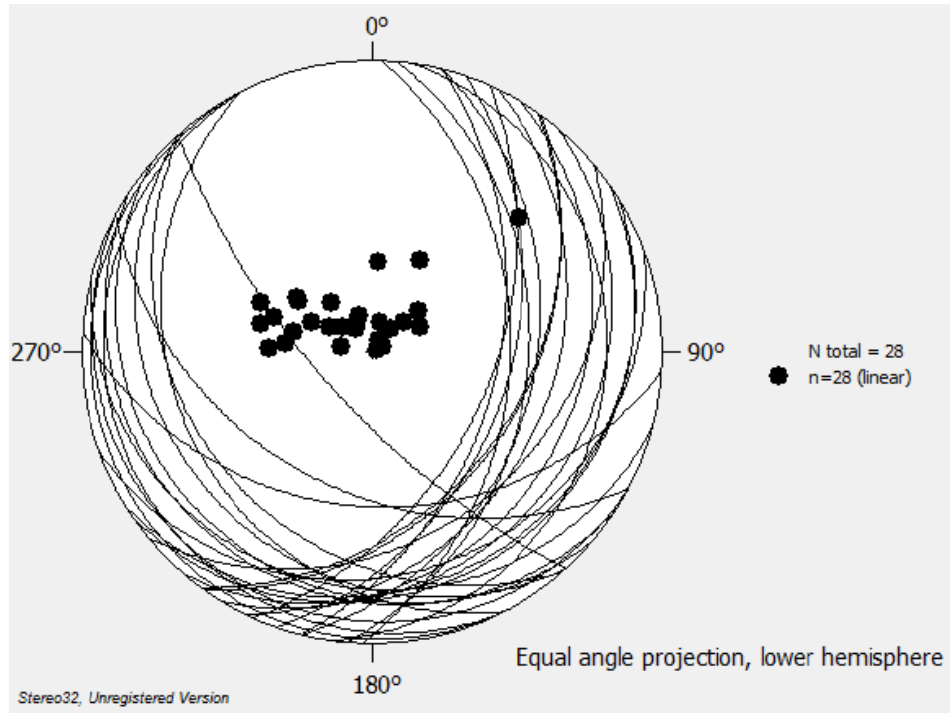


FIGURA 7.8: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación Las Cascadas.

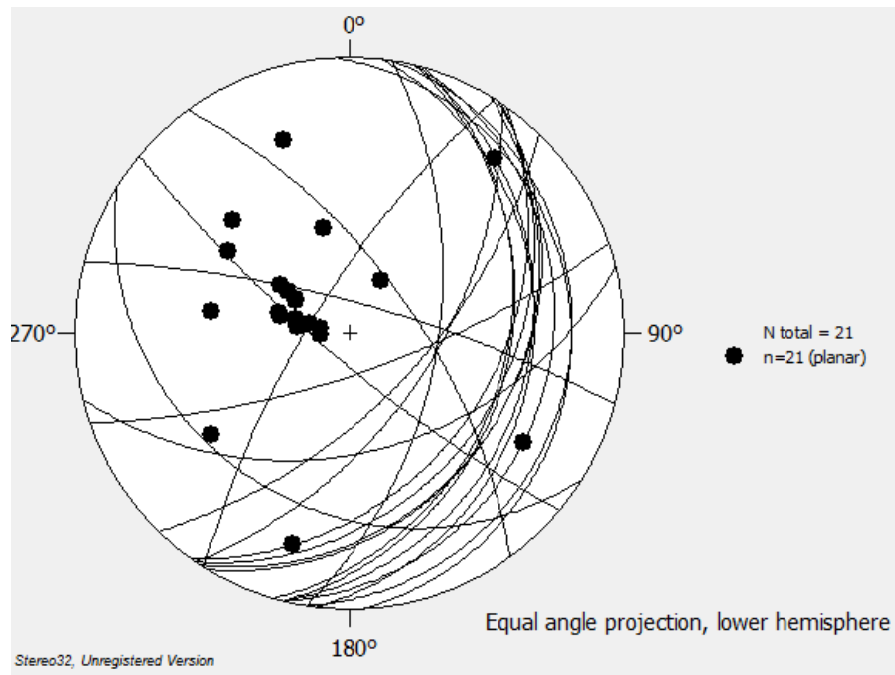


FIGURA 7.9: Diagrama de polos de datos de cizallas para la formación Las Cascadas.



FORMACION CASCADAS			
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
NORMALES	88	118	43
INVERSAS	45	206	65
DESTRALES	53	161	23
SINISTRALES	28	115	29

Tabla 7.4: Datos estructurales lineales medidos en la Formación Las Cascadas.

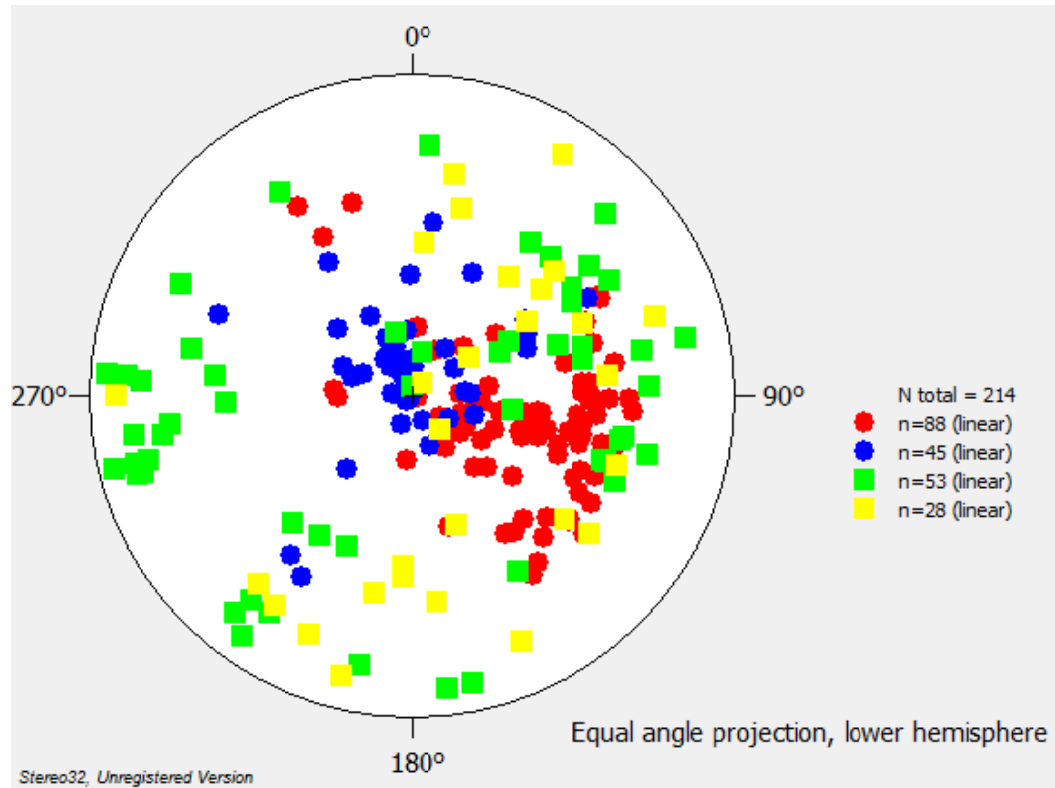


FIGURA 7.10: Proyección estereográfica de los datos lineales recolectados en campo (Formación Las Cascadas)

7.3. FORMACION CULEBRA

7.1.2 Geología estructural de la formación Culebra.

FORMACION CULEBRA			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	139	192	56
ESTRATIFICACION	43	253	26
ZONAS DE CIZALLA	6	201	58

Tabla 7.5: Datos estructurales planares medidos en la Formación Culebra



Planos de falla: se observaron planos de fallas normales principalmente, con dirección de buzamiento Sur-Este en su mayoría, la cual presenta una secuencia de fallas normales, con la ocurrencia de fallas inversas intercaladas, las cuales producen grandes desplazamientos verticales, que pueden ser observados al observar directamente en campo al Miembro calizas emperador.

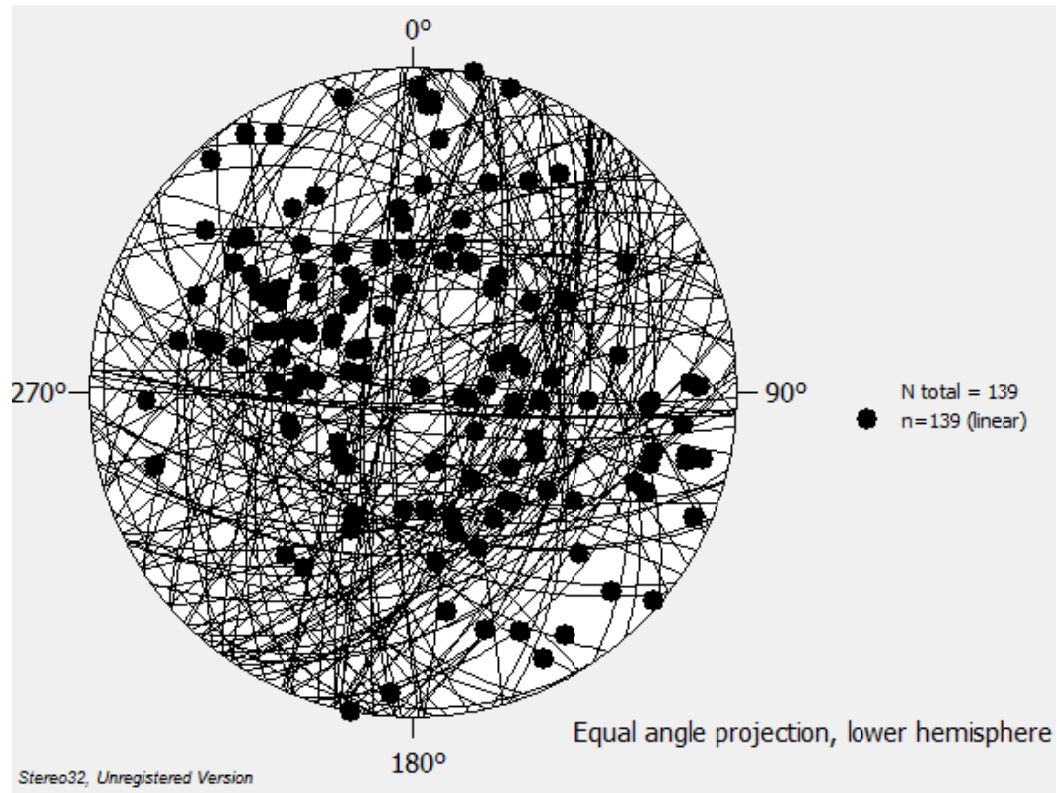


FIGURA 7.11: representación estereográfica de las fallas presentes en la Formación Culebra.

Planos estructurales: Se observaron estructuras sedimentarias y mayor cambio litológico entre miembros, observados por la aparición de el miembro Calizas emperador, lo que hizo que se obtuvieran mayor cantidad de datos de planos estructurales. Presentan una dirección promedio de buzamiento Oeste

Zonas de Cizalla: se observaron pocas zonas de cizalla, las cuales se encuentran relacionadas con fallas normales.

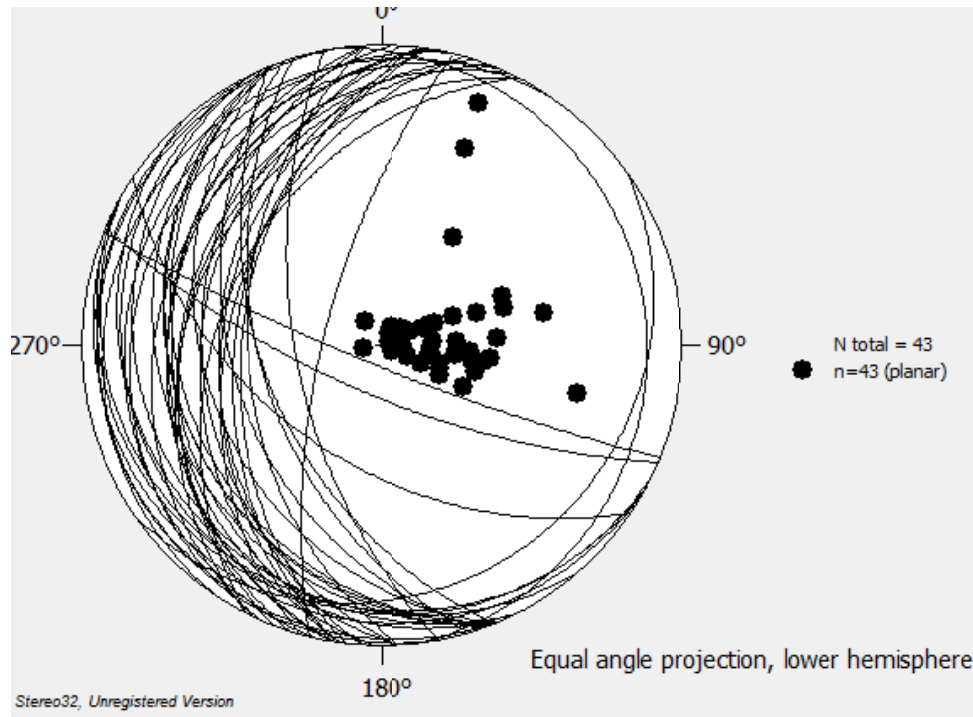


FIGURA 7.12: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación Culebra

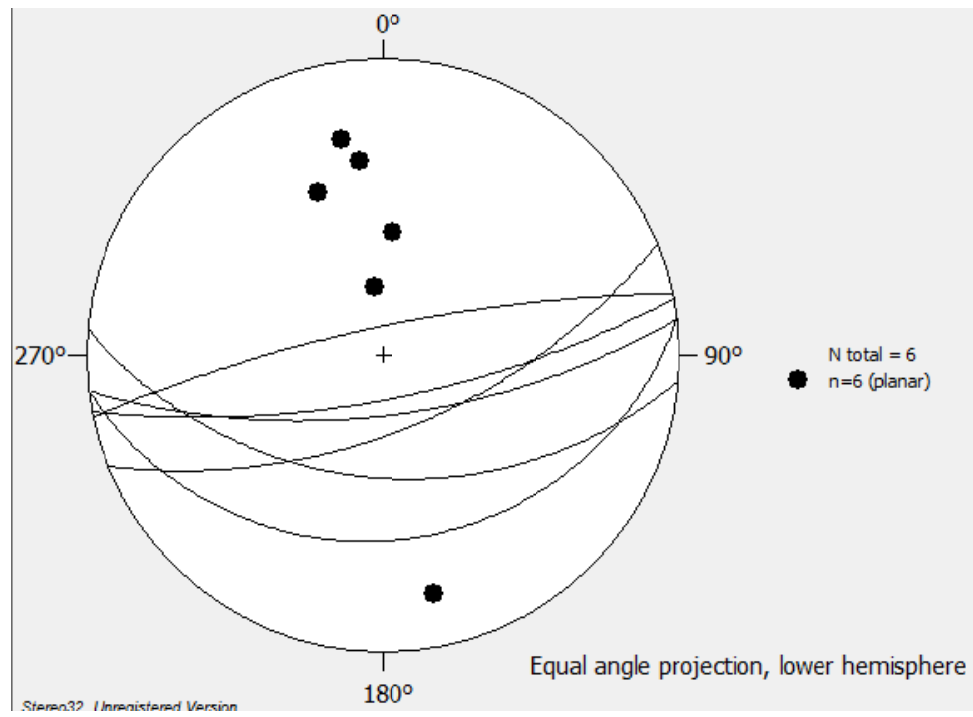


FIGURA 7.13: Diagrama de polos de datos de planos estructurales para la formación Culebra



Estructuras lineales: se observan tendencia de estrías de fallas normales e inversas en direcciones opuestas, manteniéndose la tendencia de las anteriores formaciones en cuanto a promedio de dirección y magnitud.

TIPO DE FALLAS	FORMACION CULEBRA		
	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	DE BUZAMIENTO
NORMALES	44	132	48
INVERSAS	42	237	59
DESTRALES	17	184	16
SINISTRALES	22	173	25

Tabla 7.6: Datos estructurales lineales medidos en la Formación Culebra.

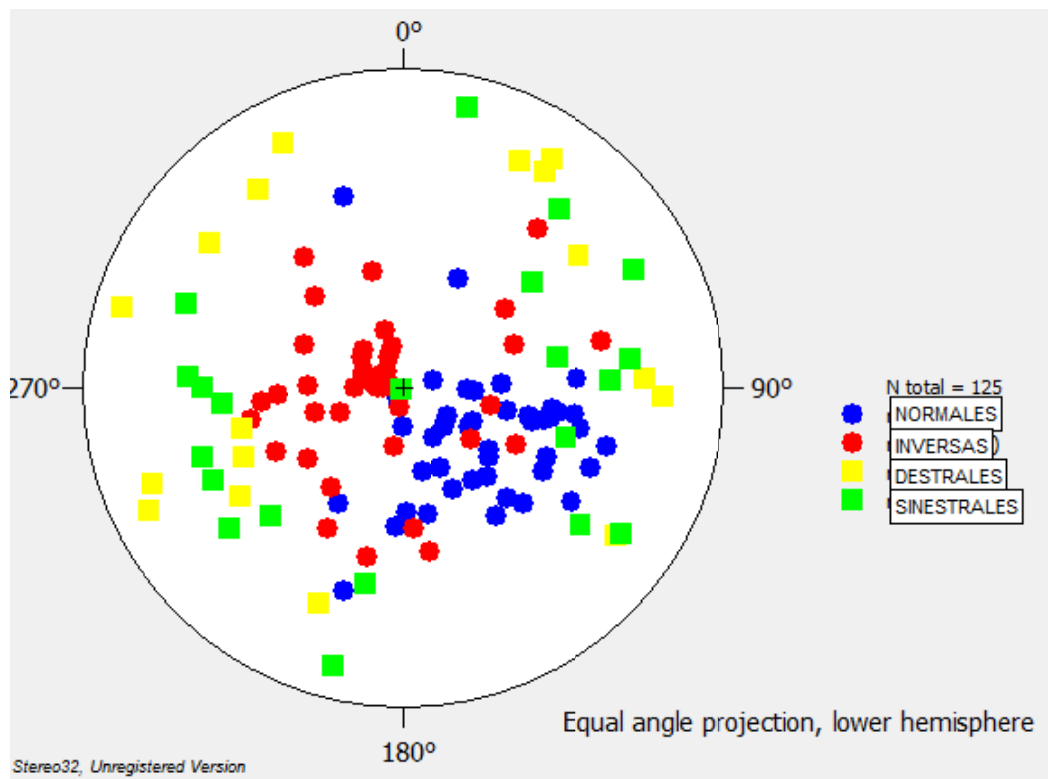


FIGURA 7.14: Proyección estereográfica de los datos lineales recolectados en campo (Formación Culebra).



7.4 SECCIONES ESTRUCTURALES DE LAS FORMACIONES EN ESTUDIO

Con los datos elaborados en campo, se elaboraron tres secciones estructurales de las formaciones en estudio, las cuales se aplicaran a los estudios de ampliación del canal de Panamá.

Se observa en las tres secciones una tendencia de fallamiento normal, con tendencia sur-este.



FIGURA 7.15: Fotografía aérea del area de estudio con la ubicación de las secciones elaboradas



7.4.1 Sección estructural formación Bas Obispo.

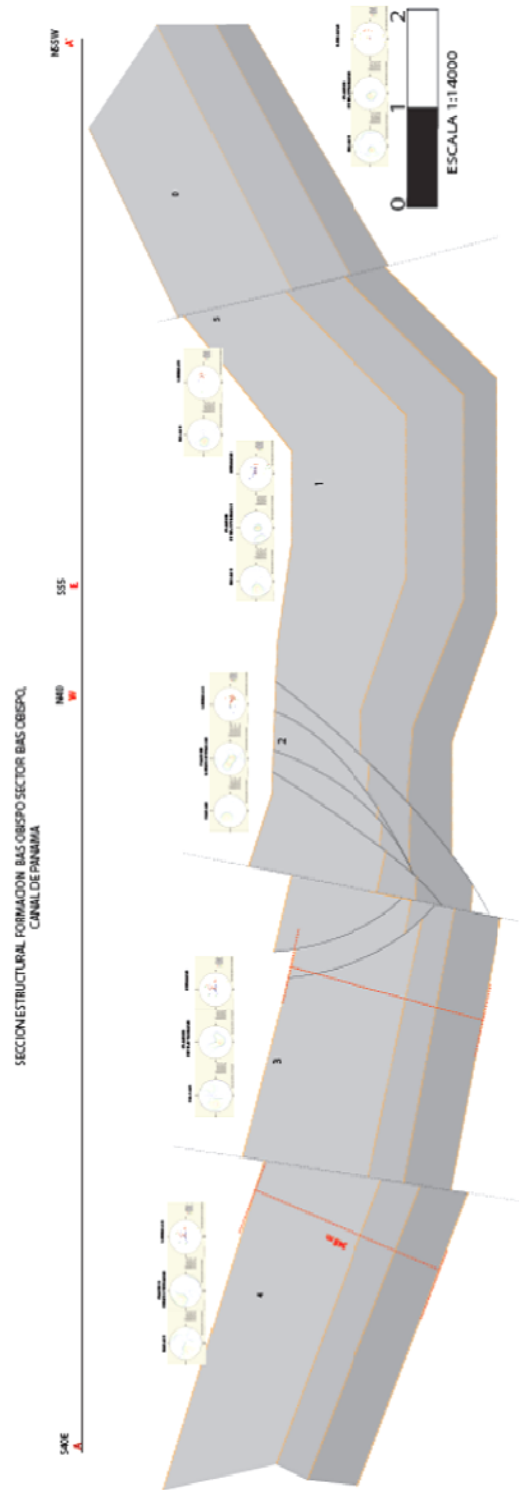


FIGURA 7.16: Sección estructural de la Formación Bas Obispo, correspondiente a 6 afloramientos. (Ver Anexo 3).



La sección medida para la Formación Bas Obispo, tiene una longitud aproximada de 1.9 Km, y para su estudio, se integraron los datos recolectados en 6 afloramientos.

Presenta de dirección de buzamiento de las falla una tendencia sur-este, al igual que los planos de estratificación y las cizallas.

En la sección se puede observar que presenta una gran estructura sinclinal hacia la parte norte, la cual se ve afectada a partir del centro de la sección estructural, donde se puede observar una estructura de tipo extensional llamada flor negativa, Woodcock y Fischer (1986), lo que sumado a las direcciones de fallas de rumbo en este afloramiento nos podría indicar que se esta presentando una gran zona de cizalla, que puede estar relacionada con la rotación de las formaciones.

Hacia la parte sur se observa que el fallamiento normal ha producido el desplazamiento de grandes bloques, siendo una zona que también cuenta con la mayor cantidad de zonas de cizalla de toda la sección.



7.4.1 Sección Estructural Formación Las Cascadas

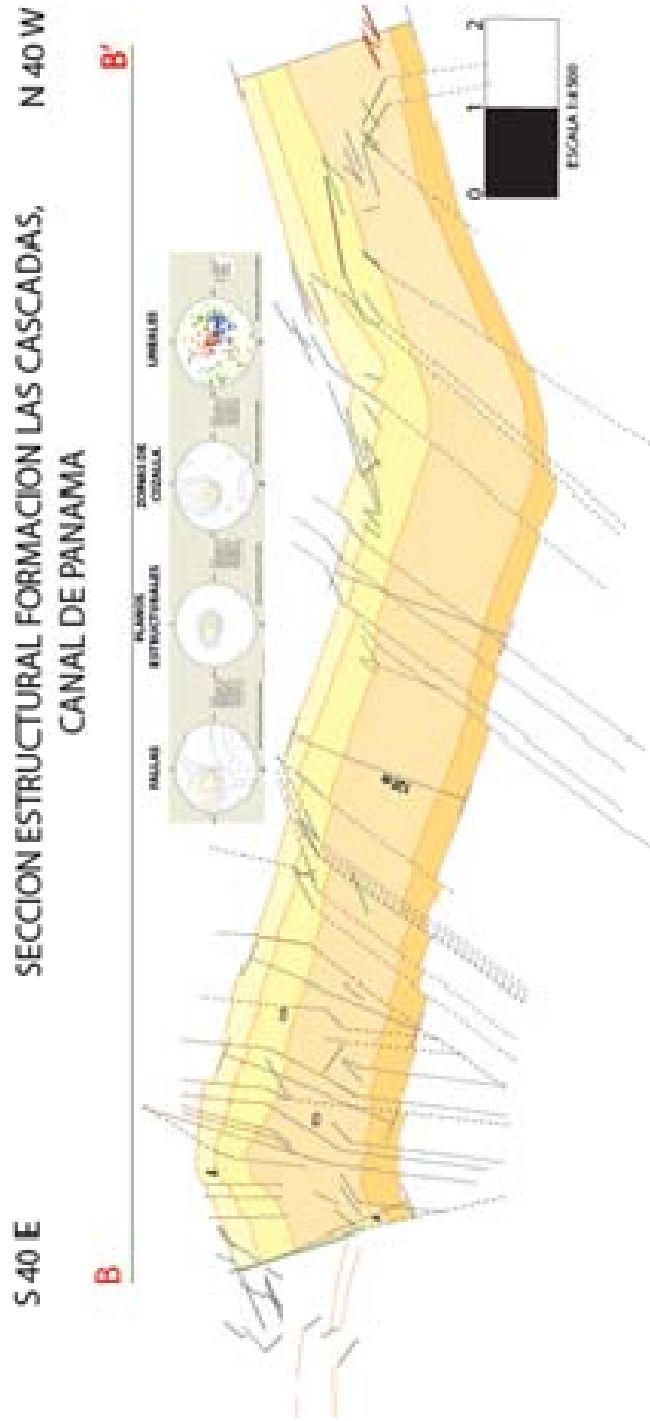


FIGURA 7.17: Sección estructural de la Formación Las Cascadas, (Ver anexo 4).



La sección medida en la Formación las Cascadas, presenta en la parte norte una estructura sinclinal, con bajo buzamiento en los flancos.

Se observa la tendencia de fallamiento normal con tendencia sureste en toda la sección, siendo bajo el buzamiento y también se continua observan la serie de fallas inversas de buzamiento de alto ángulo. Posteriormente empieza a aparecer hacia la parte sur, el contacto con la Formación Culebra, que en su mayoría es fallado, y se observa la existencia de un anticlinal fallado, zona donde se presenta la mayor cantidad de fósiles encontrados en la sección.

Este anticlinal es originado por los esfuerzos que afectaron la región.



FIGURA 7.18: Anticlinal observado cerca de el contacto fallado entre la Formación Cascadas y la Formación Bas Obispo.



7.4.3 Sección Estructural Formación Culebra

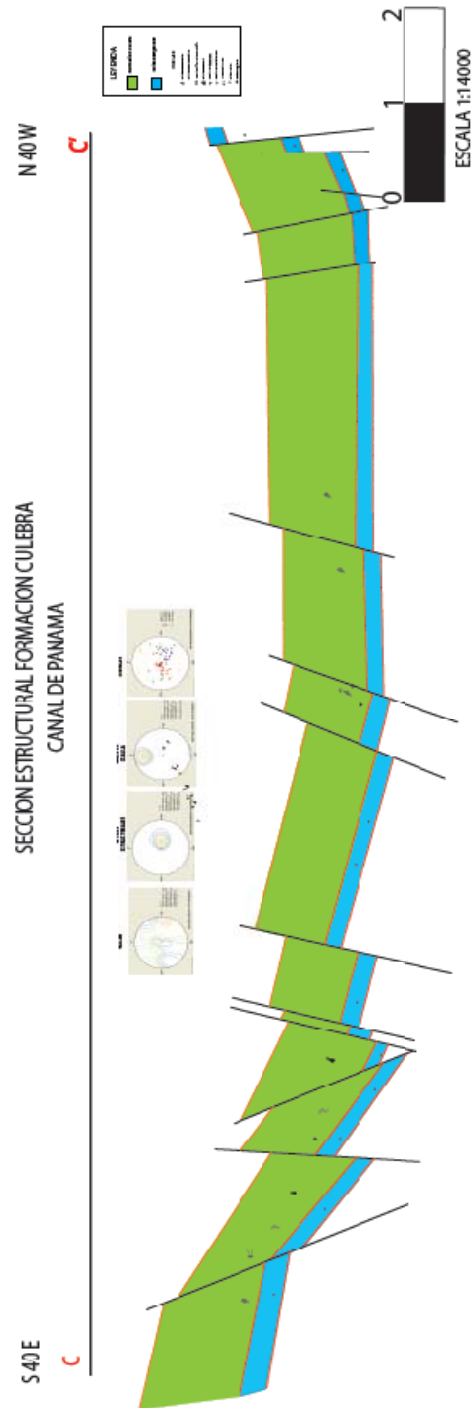


FIGURA 7.19: Sección estructural de la Formación Culebra, (Ver anexo 4).



La sección elaborada de la formación Culebra, muestra que se continua presentando el sistema de fallas conjugadas, con las normales buzando hacia el sureste, con la intercalación de fallas inversas dentro de ellas. El desplazamiento de los bloques ocasionado por el movimiento de las fallas normales, es alto y se puede observar perfectamente en campo. Los planos de estratificación no son muy inclinados, en zonas donde hay poco fallamiento. Los desplazamientos se observan al seguir el miembro Calizas Emperador, que sirvió para referenciar la formación y elaborar la correspondiente sección.

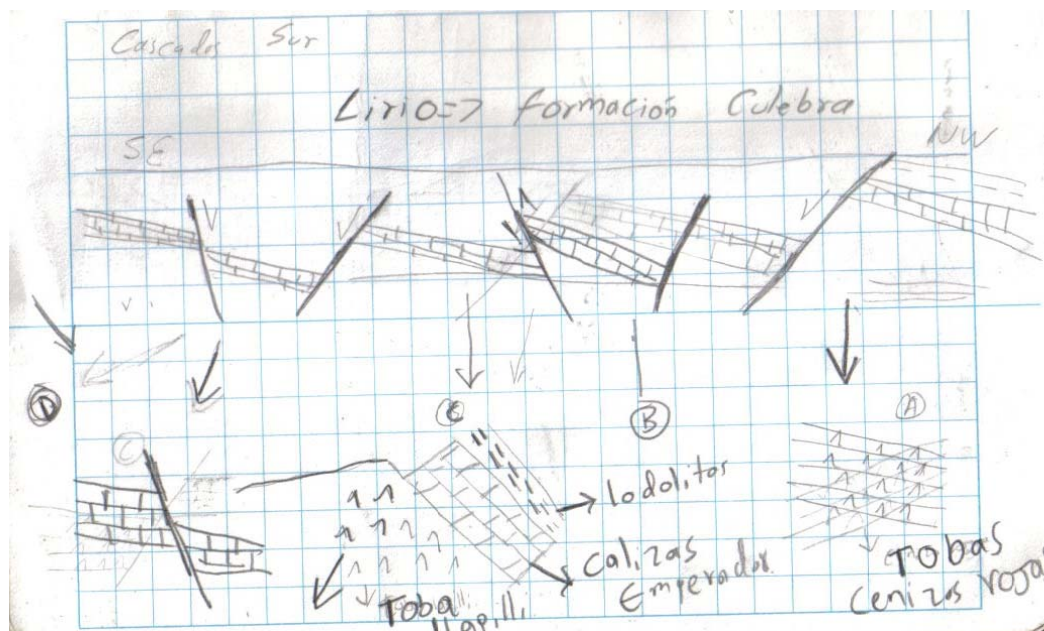


FIGURA 7.20: Dibujos de campo de la formación Culebra en el sector conocido como lirio.

8. ANALISIS CINEMATICO

Para elaborar el análisis cinemático se trabajó la metodología propuesta y se utilizaron los datos de geología estructural, los cuales se tienen en el capítulo 7 de este libro.

8.1 ANALISIS CINEMATICO FORMACION BAS OBISPO

Se tomaron datos en la formación Bas Obispo, de tipo planar y lineal, los cuales se muestran a continuación en las siguientes tablas.

FORMACION BASOBISPO			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	235	121	58
ESTRATIFICACION	71	134	35
ZONAS DE CIZALLA	100	168	55

Tabla 8.1: Datos estructurales generales de la Formación Bas Obispo

En general la Formación Bas Obispo presenta un grupo de fallas conjugadas, con tendencia de dirección de buzamiento Sur-este y con buzamientos que en promedio van de los 50 a 60 grados.

Se observan fallas inversas de alto Angulo y fallas normales de bajo ángulo

FORMACION BAS OBISPO			
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	DE BUZAMIENTO
NORMALES	83	92	49
INVERSAS	49	149	65
DESTRALES	17	164	30
SINISTRALES	16	120	24

Tabla 8.2: Datos lineales generales de la Formación Bas Obispo

Debido a la extensión del área de estudio, y a que la misma posee 6 afloramientos, se realizó el estudio de las características cinemáticas de la Formación por cada afloramiento, debido a que cada afloramiento tiene rasgos



importantes a analizar, los cuales son tenidos en cuenta en la determinación del estilo estructural de la Formación Bas Obispo.

Para realizar el análisis cinemático, se relacionaron los diagramas de orientación y buzamiento de las fallas, densidad de junto con el diagrama de polos de estrías.

De esta forma se conoce cuál es la tendencia de la dirección de fallas para cada afloramiento.

AFLORAMIENTO 0

FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 0			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	24	105	64
ESTRATIFICACION	26	99	27
ZONAS DE CIZALLA	30	208	53

Tabla 8.3: Datos estructurales del afloramiento 0

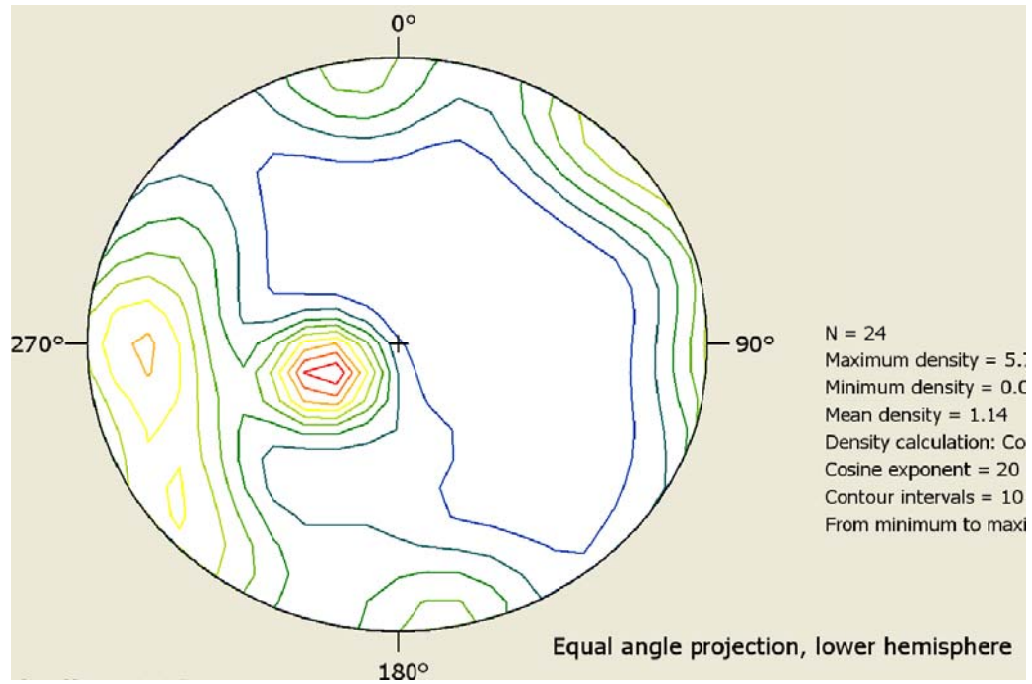


FIGURA 8.1: Diagrama de densidad de fallas la Formacion Bas Obispo para el Afloramiento 0

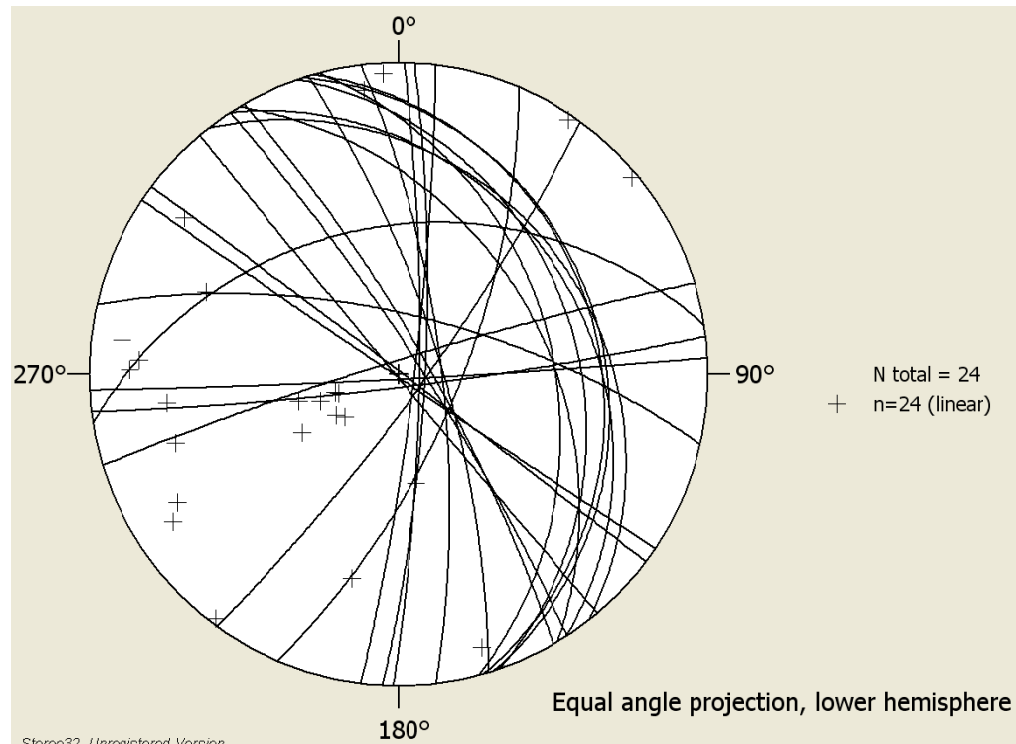


FIGURA 8.2: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 0



FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 0			
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	DE BUZAMIENTO
NORMALES	8	69	44
INVERSAS	1	95	80
DESTRALES	1	24	26
SINISTRALES	6	48	18

Tabla 8.4: Datos lineales del afloramiento 0

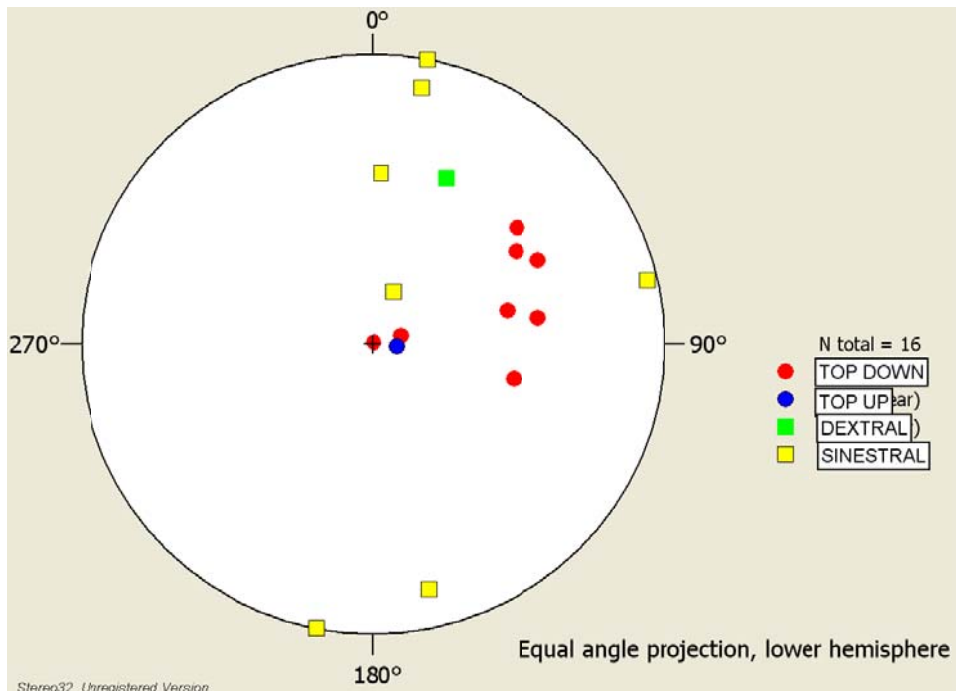


FIGURA 8.3: Representación estereográfica de las estrías de falla en el afloramiento 0

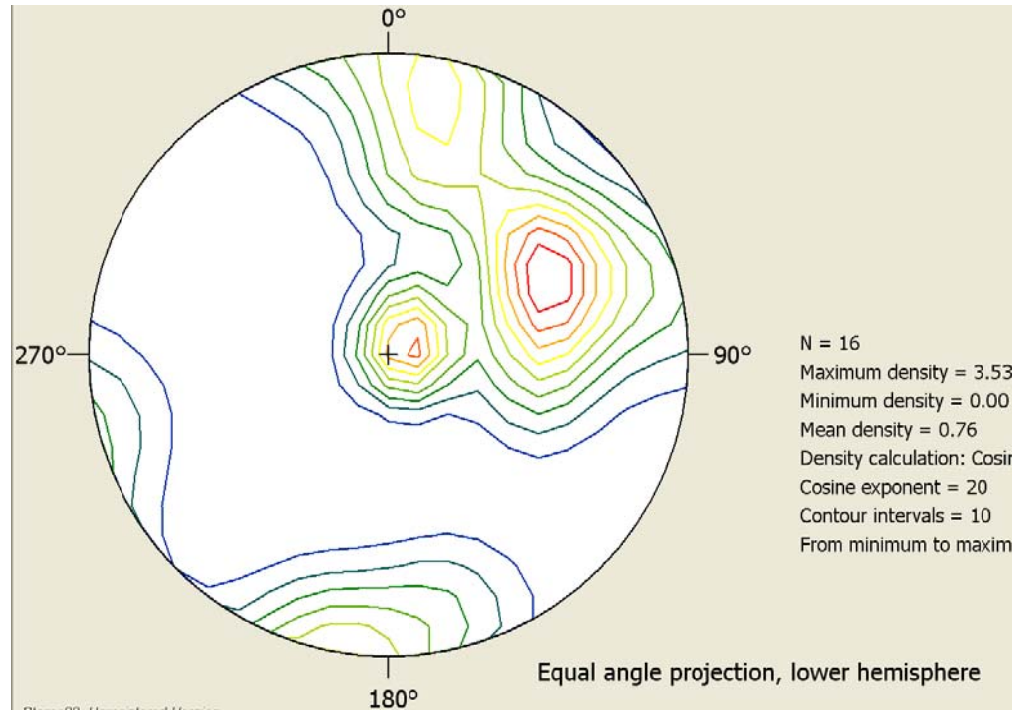
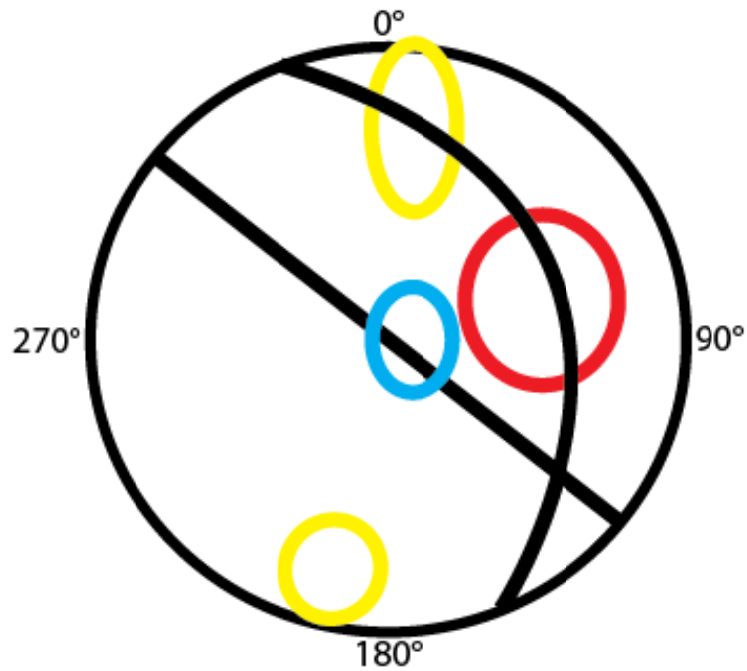
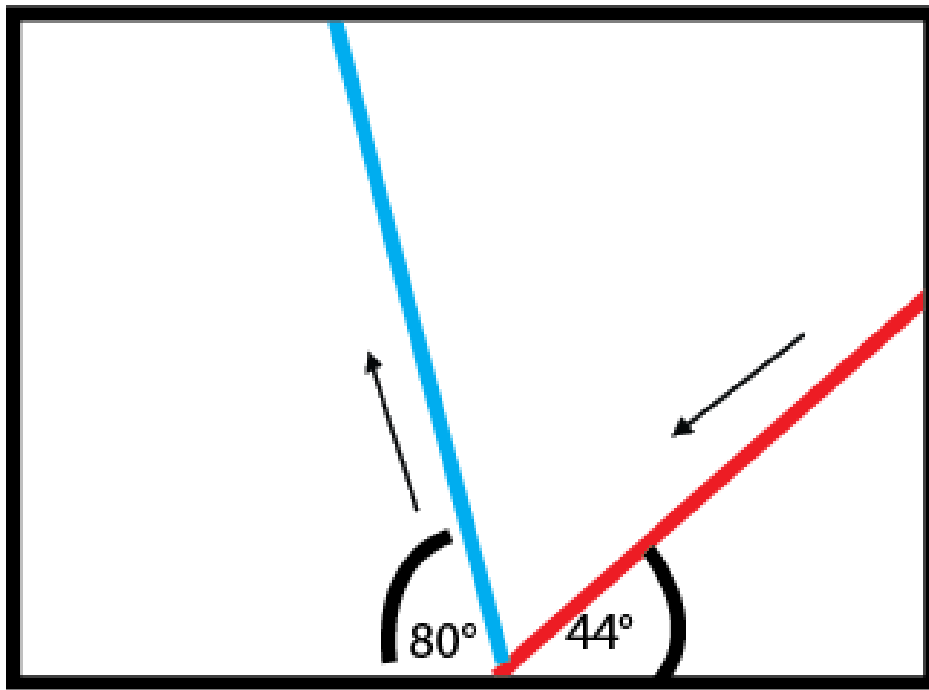


FIGURA 8.4: diagrama de densidad de polos de estrias de las fallas presentes en el afloramiento 0



FIGURAURA 8.5: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 0

Representación de la relación entre fallas normales (Círculo Azul) y fallas inversas (Círculo Rojo) para el afloramiento 0, observados en la proyección estereográfica de los datos recolectados en campo (Formación Bas Obispo). (Círculos amarillos destrales y círculos verdes falas sinestrales) **(FIGURA 8.5)**



FIGURAURA 8.6: Diagrama de relación de fallas normales e inversas,

Se puede notar que las fallas inversas tienen un buzamiento alto, mayor a 60° , contradiciendo la ley de fallamiento de Anderson, al relacionarlos con las fallas normales de ángulo medio a bajo, podemos concluir que por tectonismos se puede estar presentando una rotación de las formaciones.

AFLORAMIENTO 1

FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 1			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	38	107	58
ESTRATIFICACION	5	49	37
ZONAS DE CIZALLA	19	114	45

Tabla 8.5: Datos estructurales del afloramiento 1

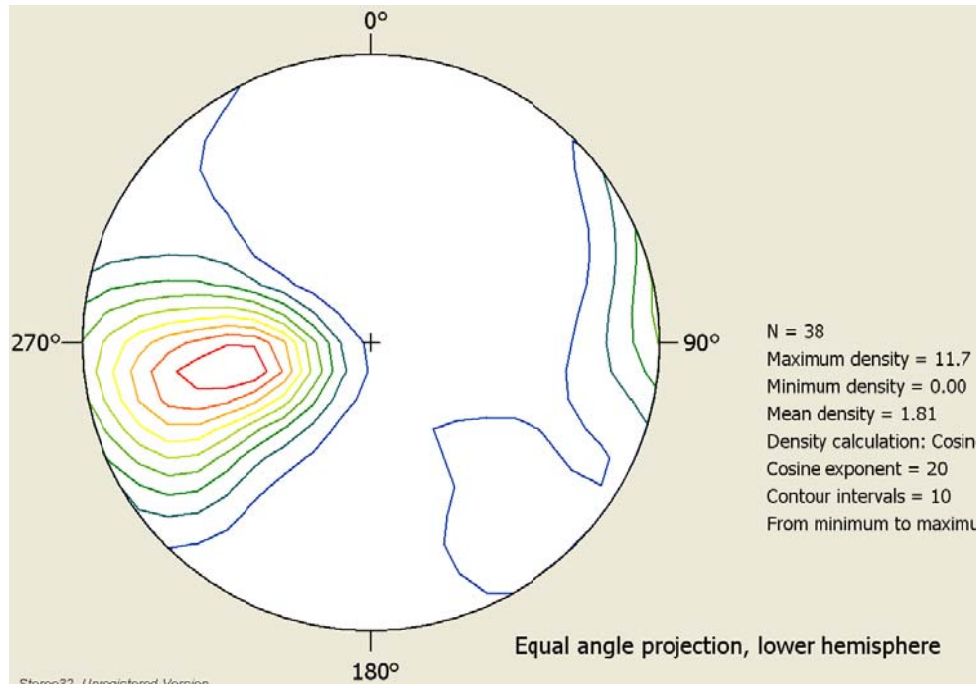


FIGURA 8.7: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 1

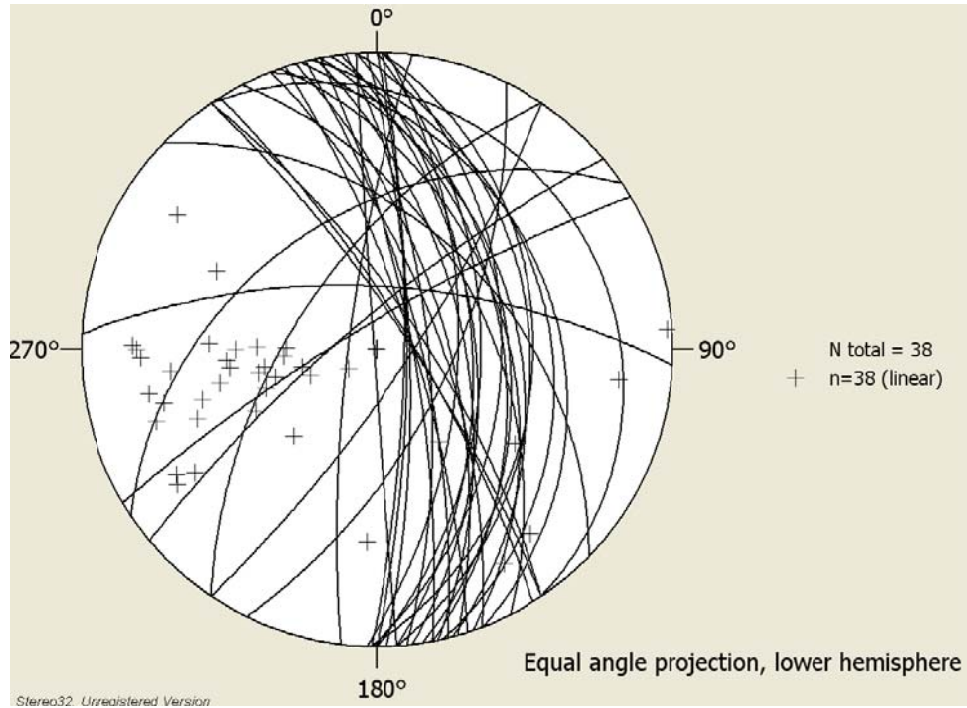


FIGURA 8.8 Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 1



FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 1				
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	DE	BUZAMIENTO
NORMALES	10	90		52
INVERSAS	18	124		62
DESTRALES	4	126		21
SINISTRALES	1	176		38

Tabla 8.6: Datos lineales generales del afloramiento 1

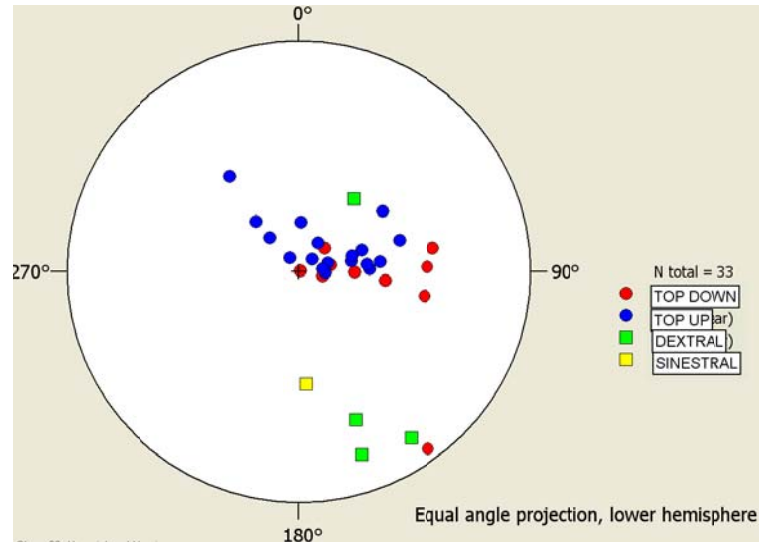


FIGURA 8.9: Diagrama de polos de estrias de las fallas presentes en el afloramiento 1

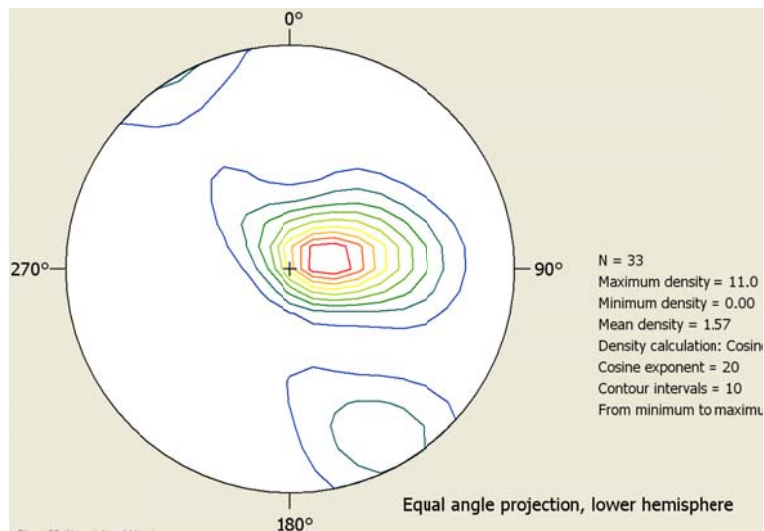


FIGURA 8.10: Diagrama de densidad de polos de estrias de las fallas presentes en el afloramiento 1

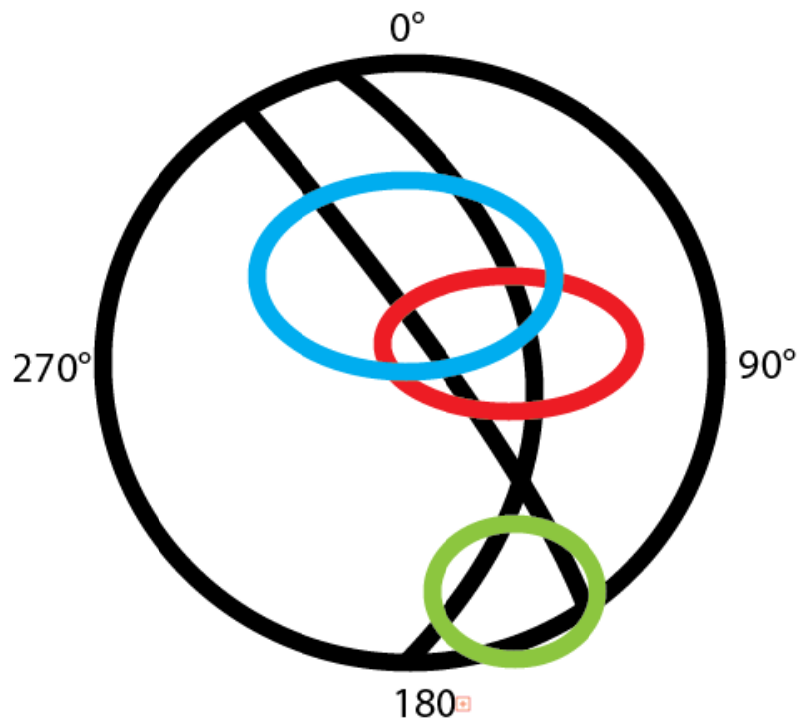


FIGURA 8.11: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 1

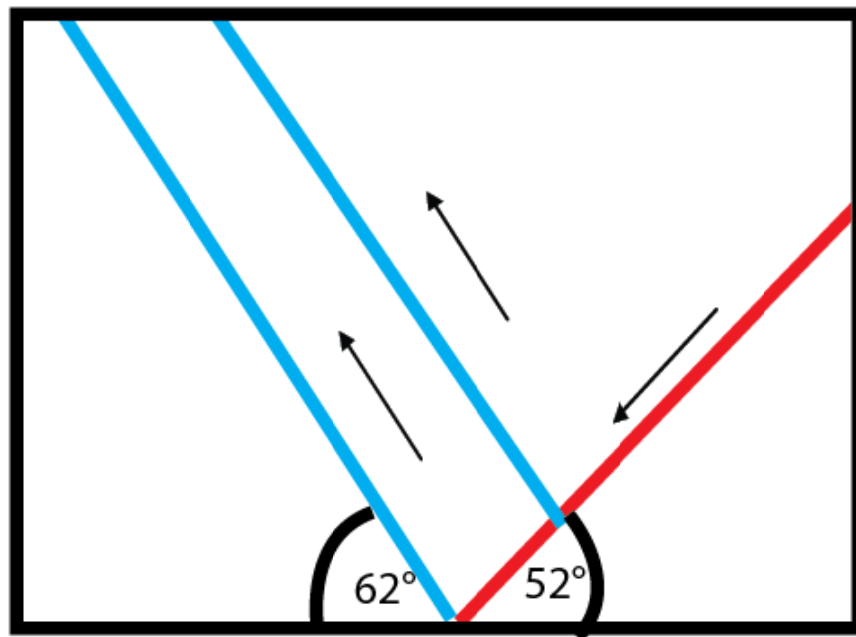


FIGURA 8.12: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 1



AFLORAMIENTO 2

FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 2			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	58	138	59
ESTRATIFICACION	15	187	38
ZONAS DE CIZALLA	16	150	32

Tabla 8.7: Datos estructurales del afloramiento 0

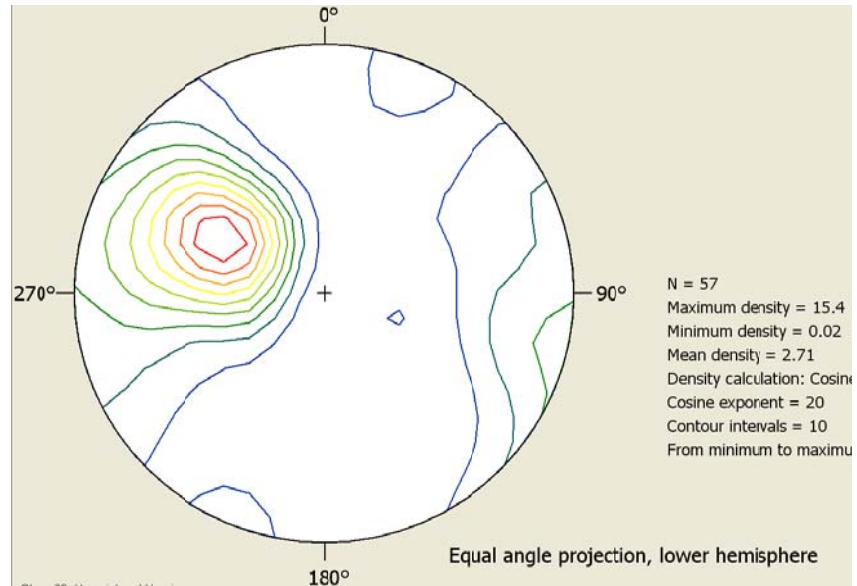


FIGURA 8.13: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 2

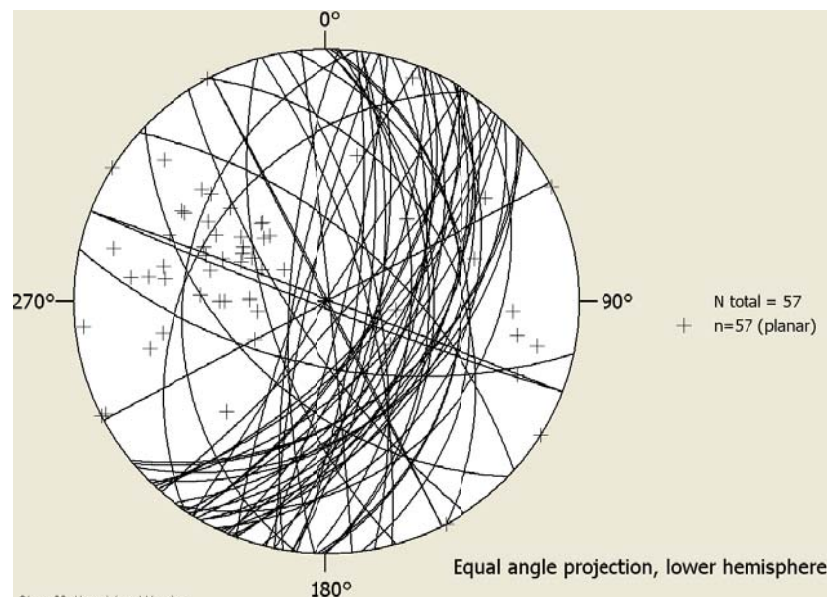


FIGURA 8.14: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 2



FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 2			
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
NORMALES	25	114	52
INVERSAS	8	194	65
DESTRALES	4	154	45
SINISTRALES	1	146	89

Tabla 8.8: Datos lineales generales del afloramiento 2

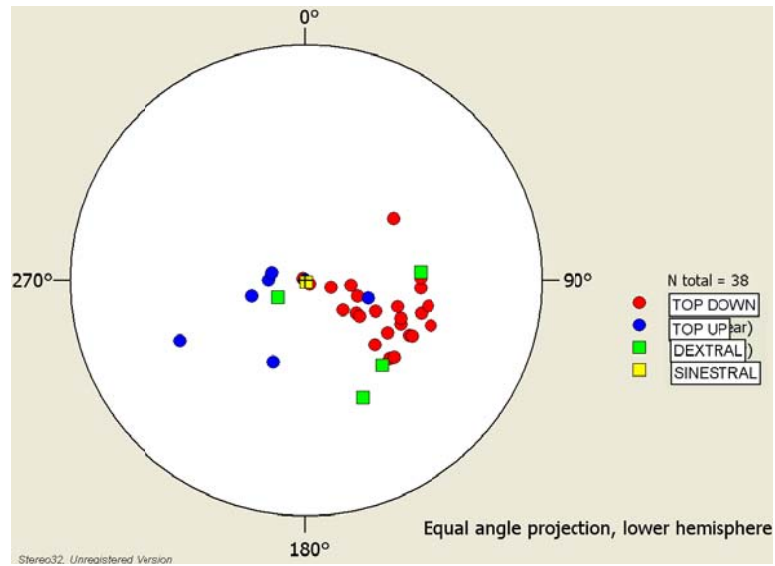


FIGURA 8.15: Diagrama de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 2

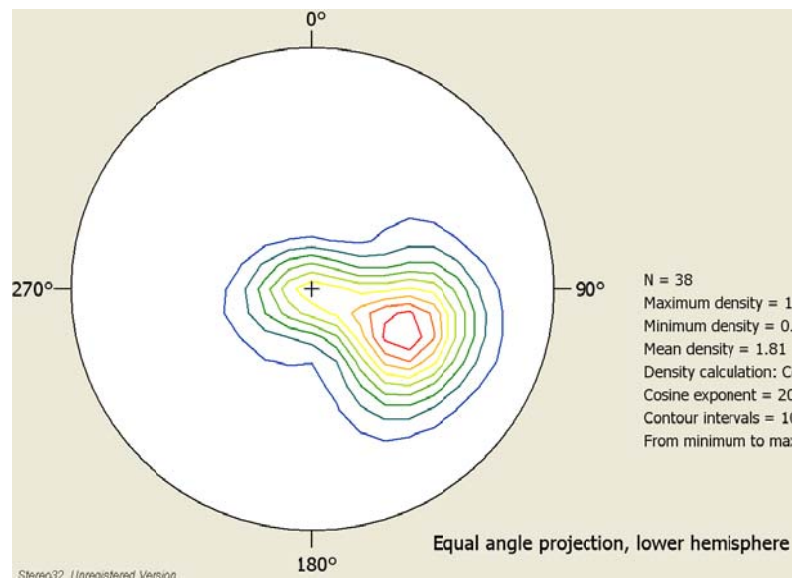


FIGURA 8.16: Diagrama de densidad de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 2

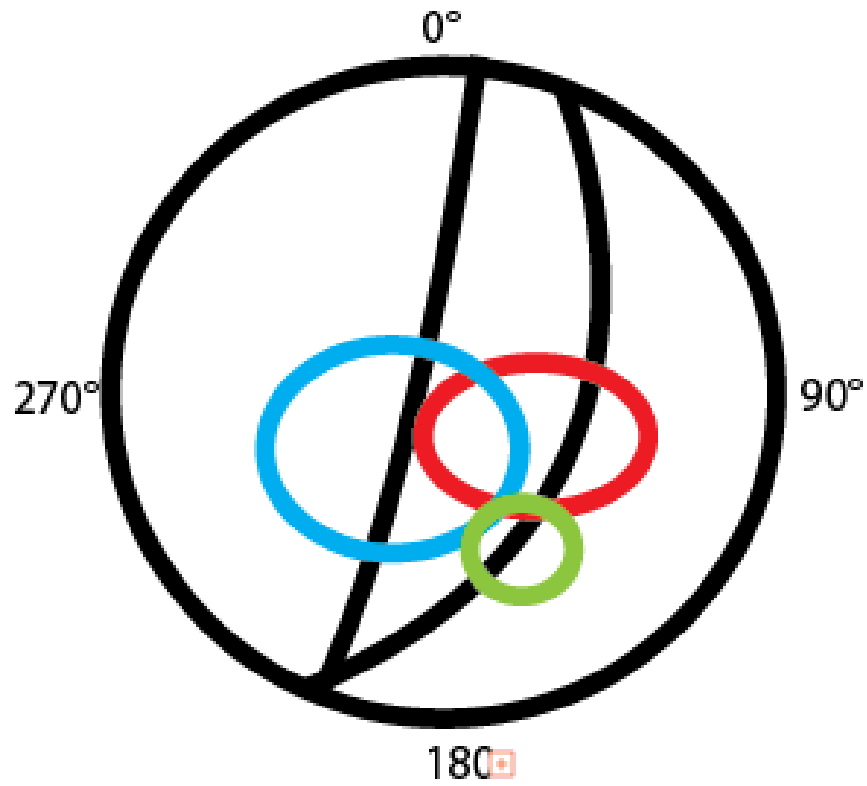


FIGURA 8.17: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 2

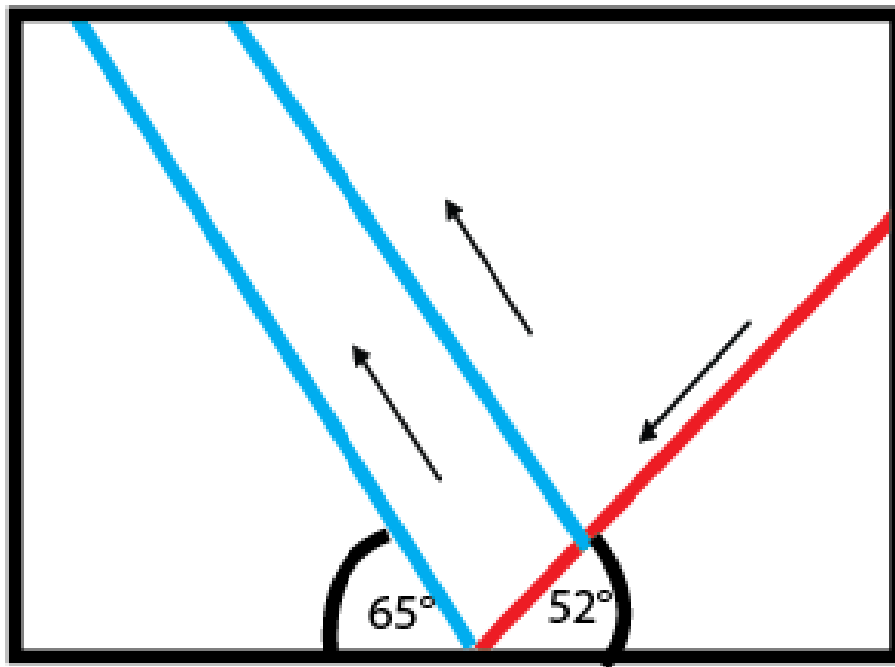


FIGURA 8.18: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 2



AFLORAMIENTO 3

FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 3			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	49	132	58
ESTRATIFICACION	15	167	36
ZONAS DE CIZALLA	23	187	54

Tabla 8.9: Datos estructurales del afloramiento 3

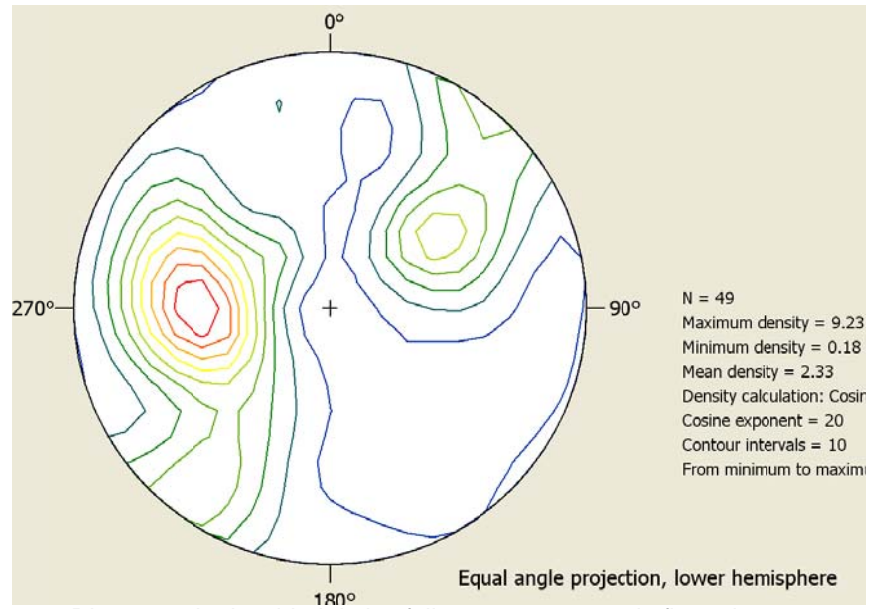


FIGURA 8.19: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 3

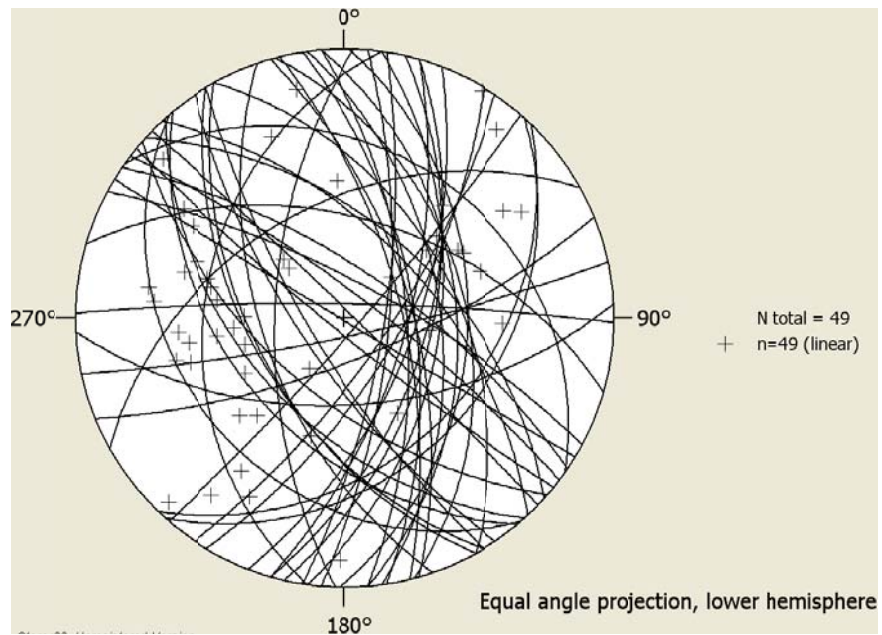


Fig 8.20: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 3



FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 3			
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
NORMALES	12	107	47
INVERSAS	6	175	72
DESTRALES	4	192	20
SINISTRALES	6	175	21

Tabla 8.10: Datos lineales generales del afloramiento 3

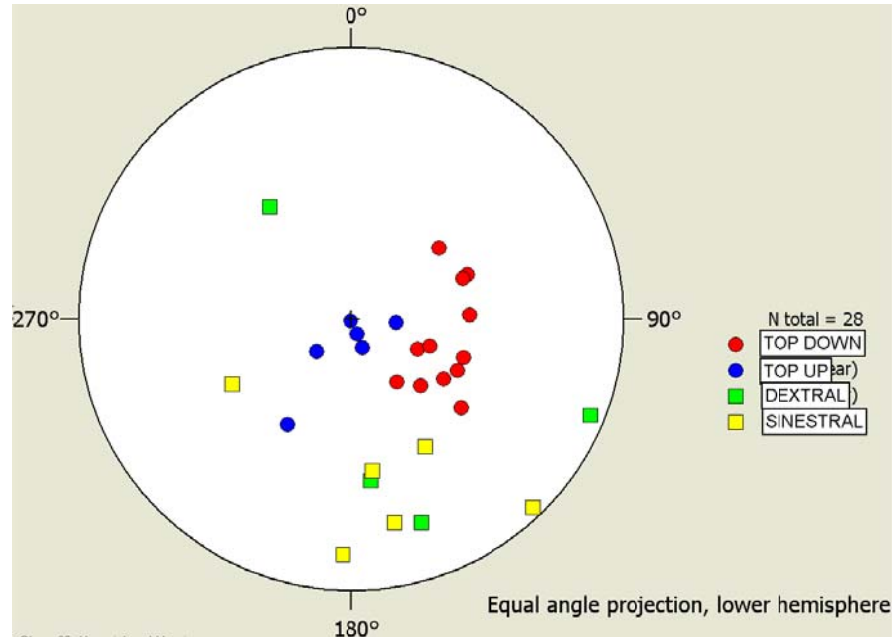


FIGURA 8.21: Diagrama de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 3

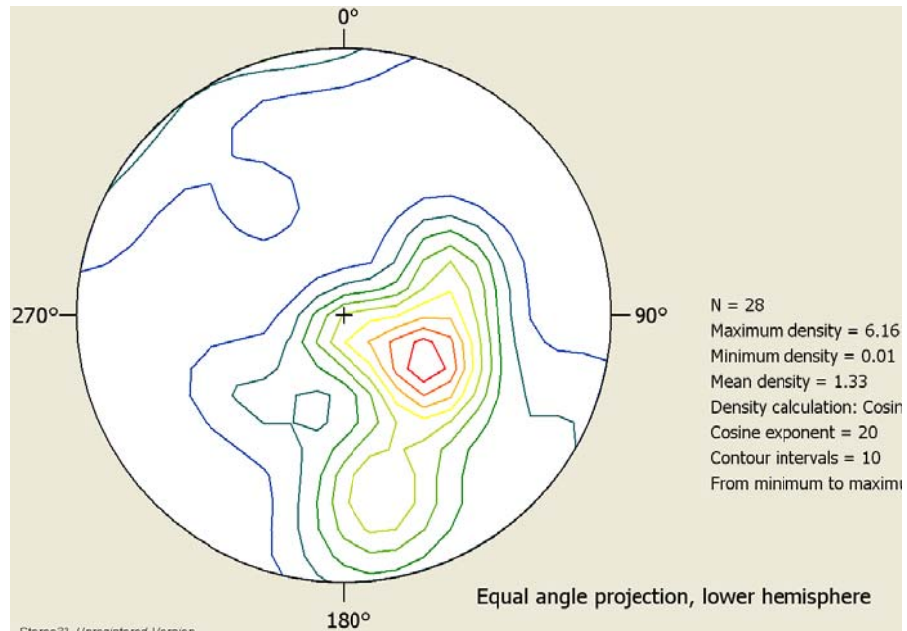


FIGURA 8.22: Diagrama de densidad de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 3

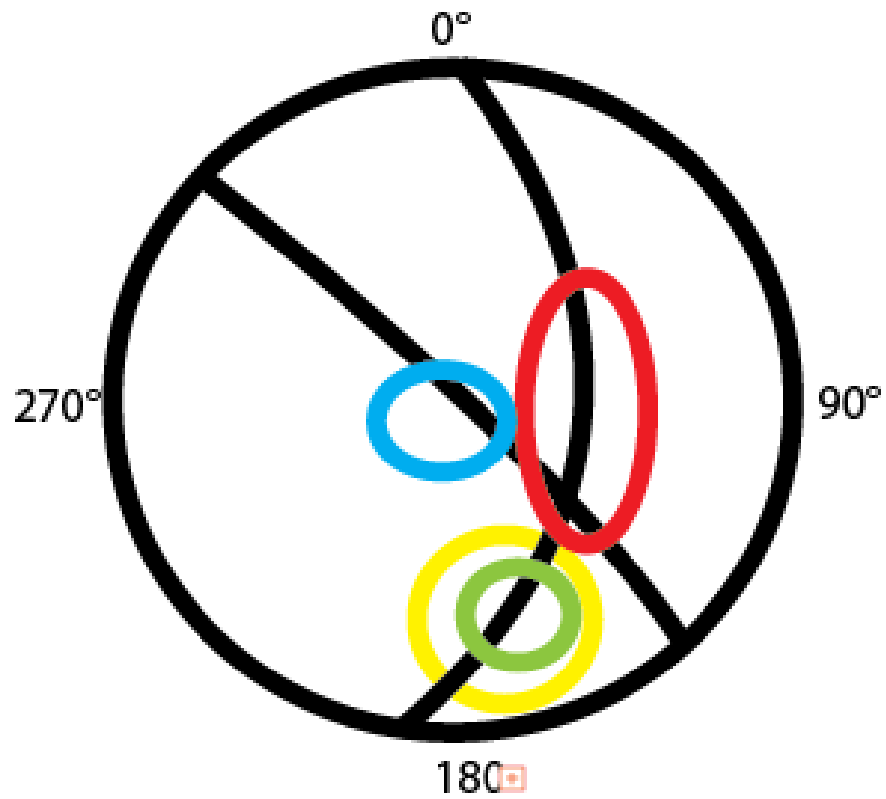


FIGURA 8.23: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 3

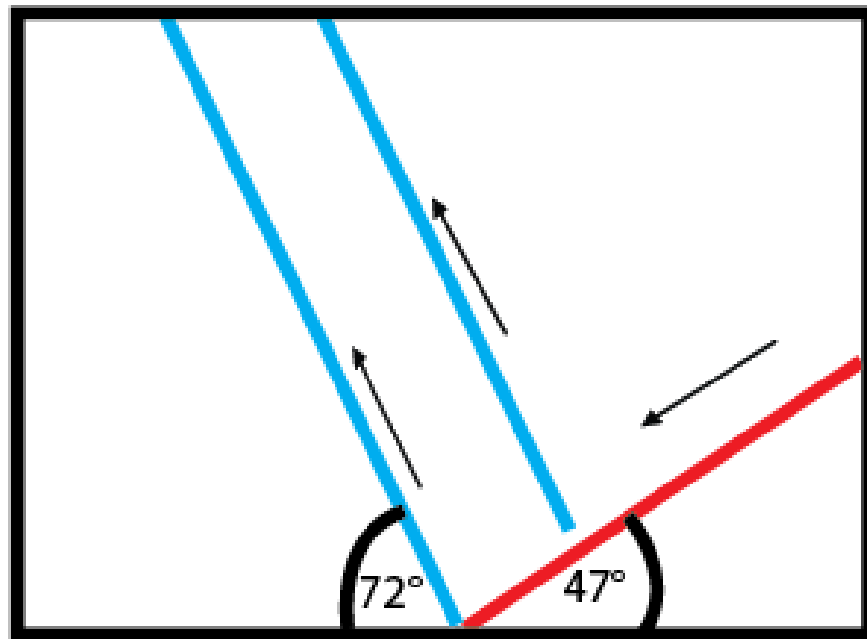


FIGURA 8.24: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 3



AFLORAMIENTO 4

FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 4			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	45	109	58
ESTRATIFICACION	10	136	44
ZONAS DE CIZALLA	12	106	62

Tabla 8.11: Datos estructurales del afloramiento 4

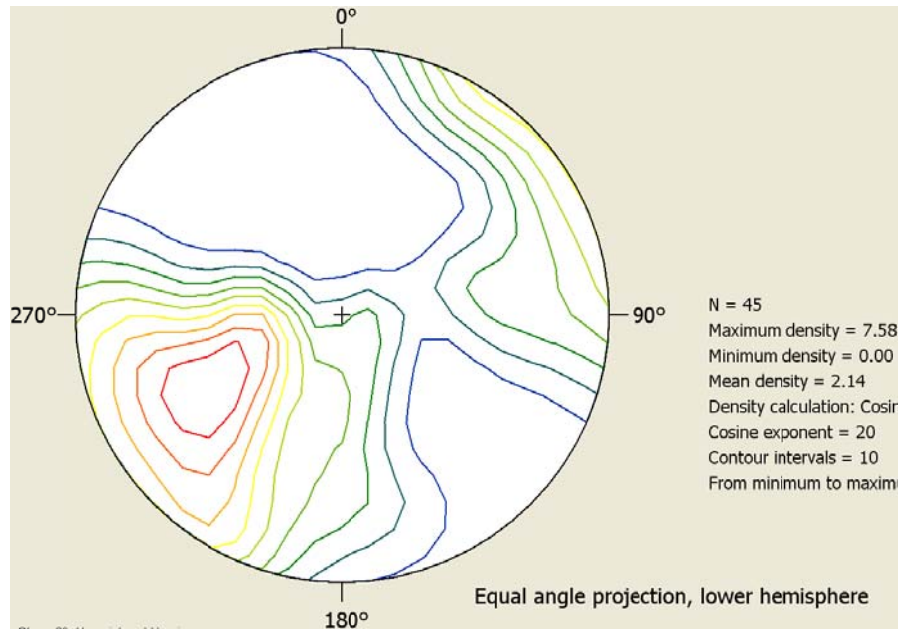


FIGURA 8.25: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 4

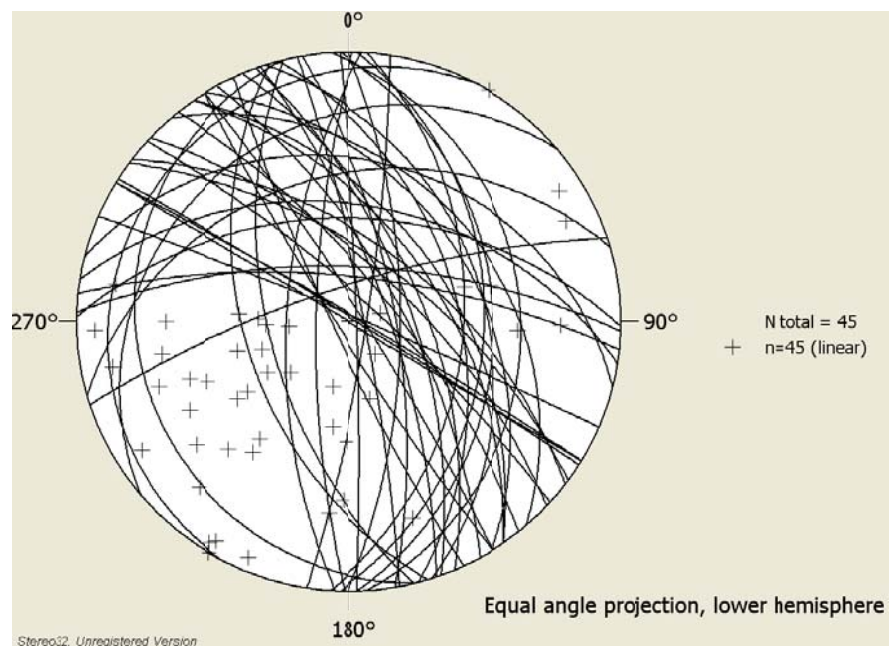


FIGURA 8.26: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 4



FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 4			
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
NORMALES	16	76	55
INVERSAS	14	165	65
DESTRALES	3	201	35
SINISTRALES	1	149	6

Tabla 8.12: Datos lineales generales del afloramiento 4

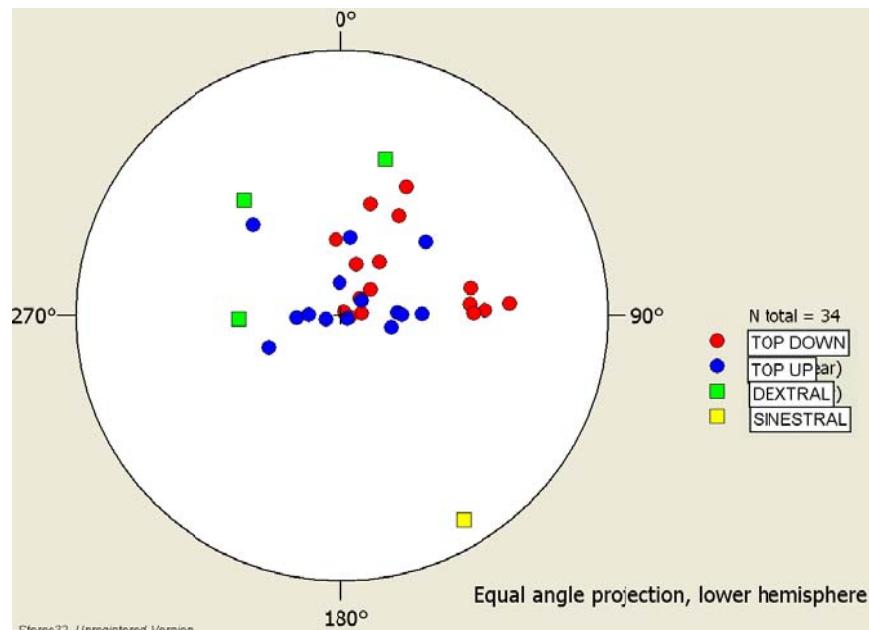


FIGURA 8.27: Diagrama de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 4

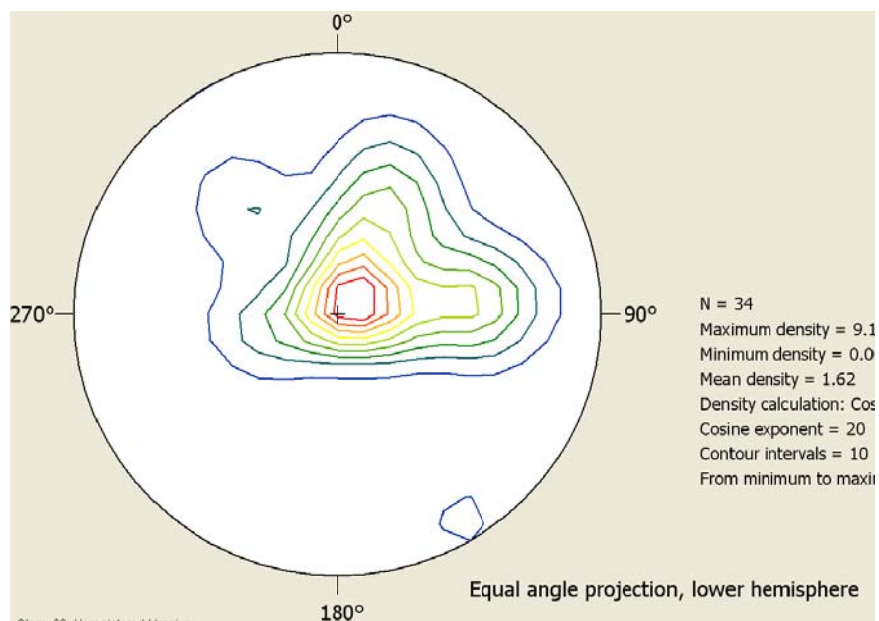


FIGURA 8.28: Diagrama de densidad de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 4

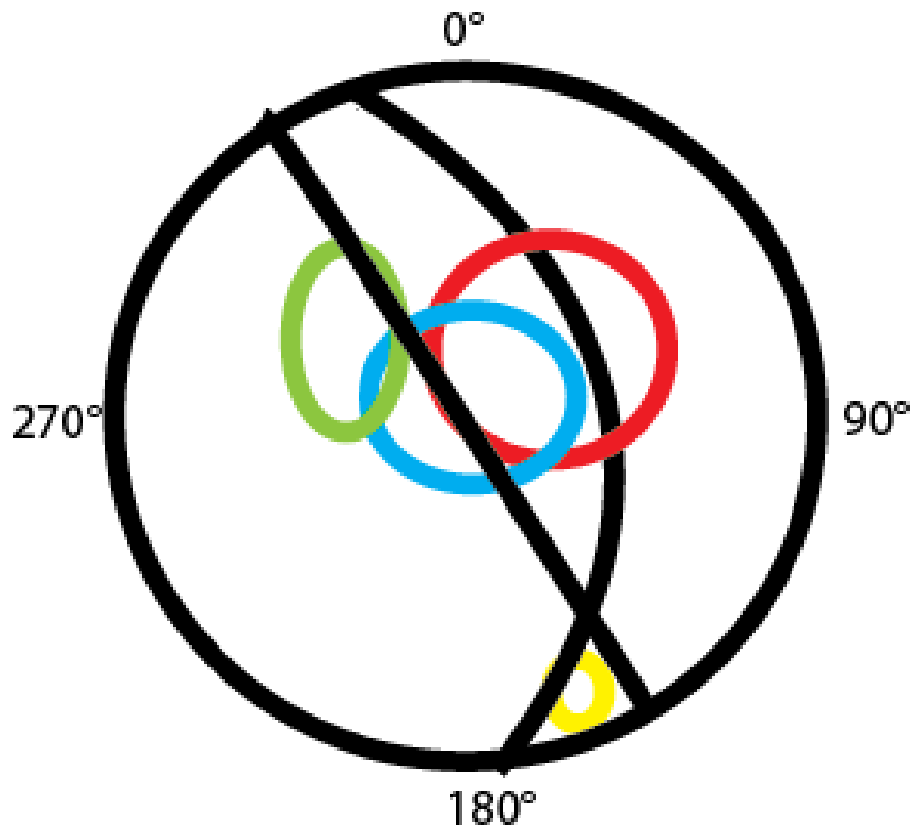


FIGURA 8.29: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 4

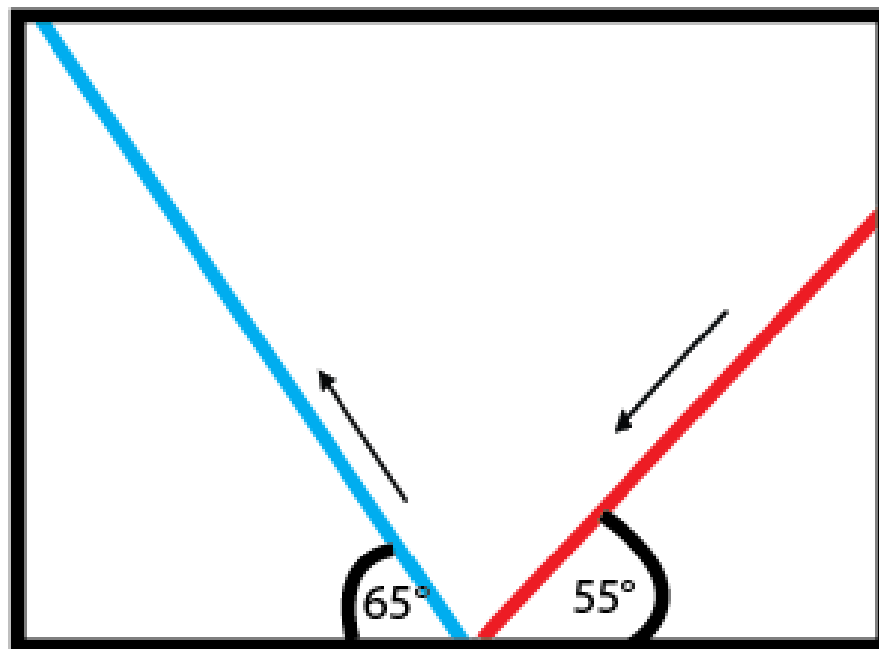


FIGURA 8.30: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 4

AFLORAMIENTO 5

FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 5			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	21	123	47
ESTRATIFICACION	2	346	88
ZONAS DE CIZALLA	NO	NO	NO

Tabla 8.13: Datos estructurales del afloramiento 5

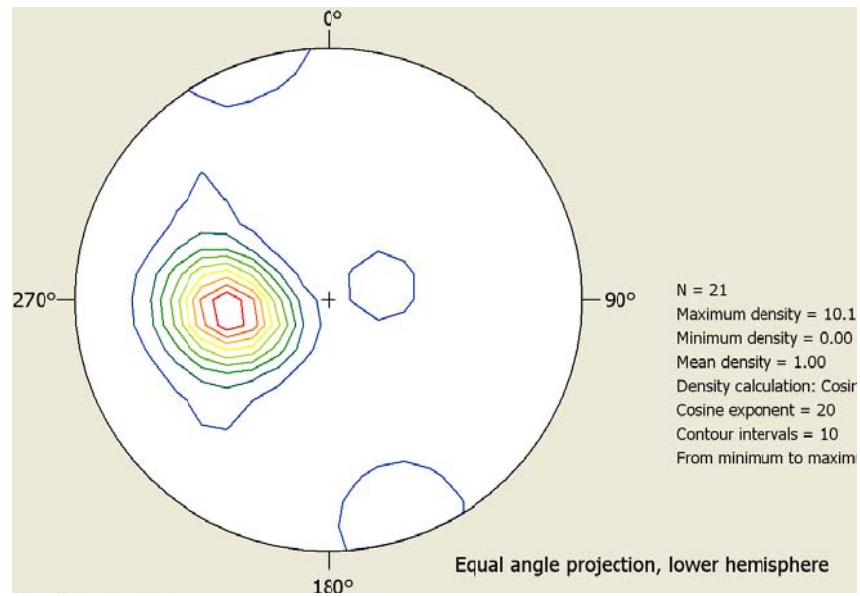


FIGURA 8.31: Diagrama de densidad de las fallas presentes en el afloramiento 5

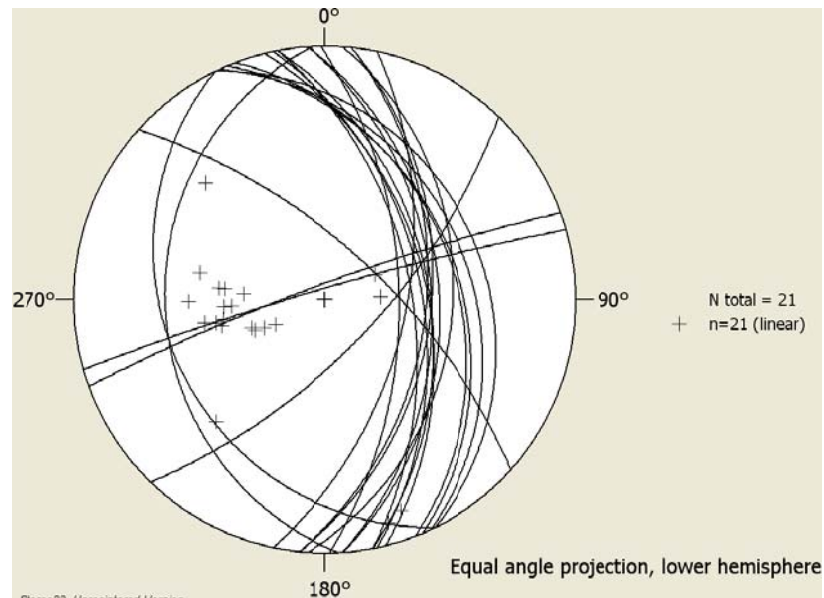


FIGURA 8.32: Representación estereográfica de las fallas presentes en el afloramiento 5



FORMACION BAS OBISPO AFLORAMIENTO 5			
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
NORMALES	12	77	43
INVERSAS	2	51	50
DESTRALES	1	281	31
SINISTRALES			

Tabla 8.14: Datos lineales generales del afloramiento 5

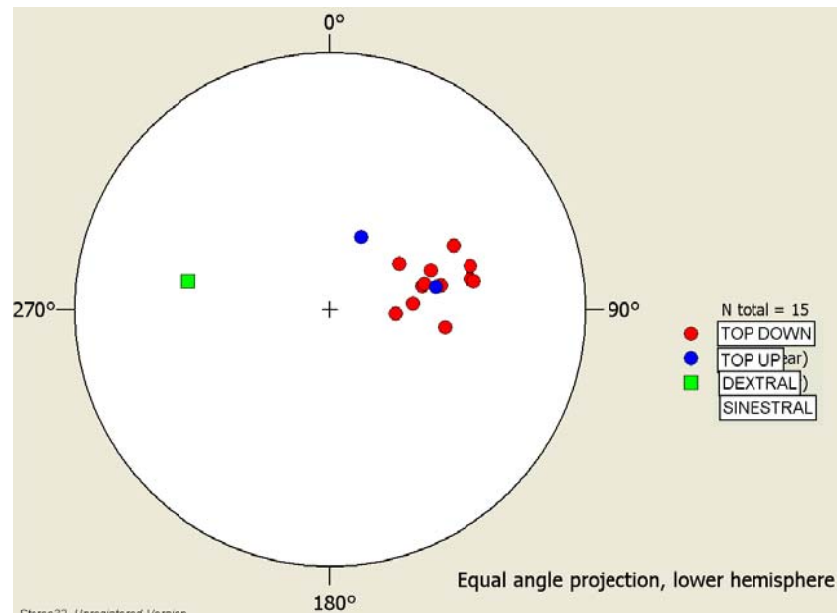


FIGURA 8.33: Diagrama de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 5

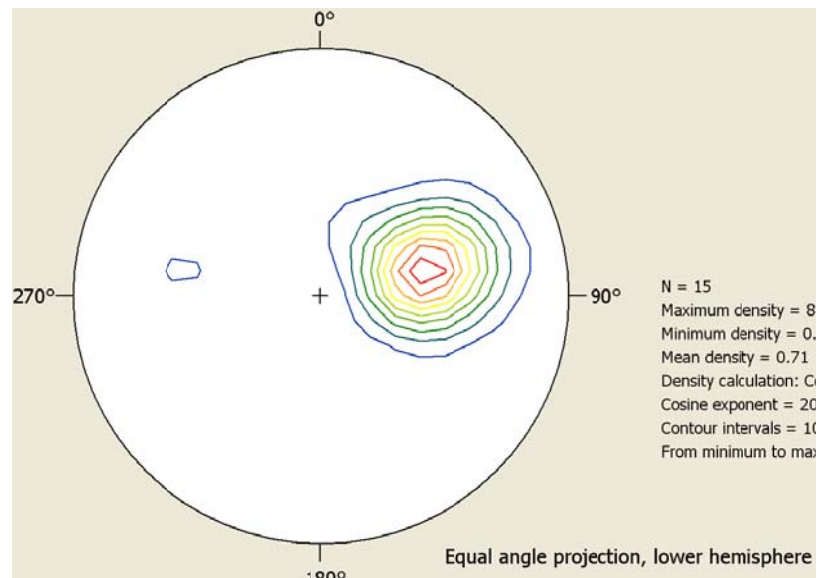


FIGURA 8.34: Diagrama de densidad de polos de estrías de las fallas presentes en el afloramiento 5.

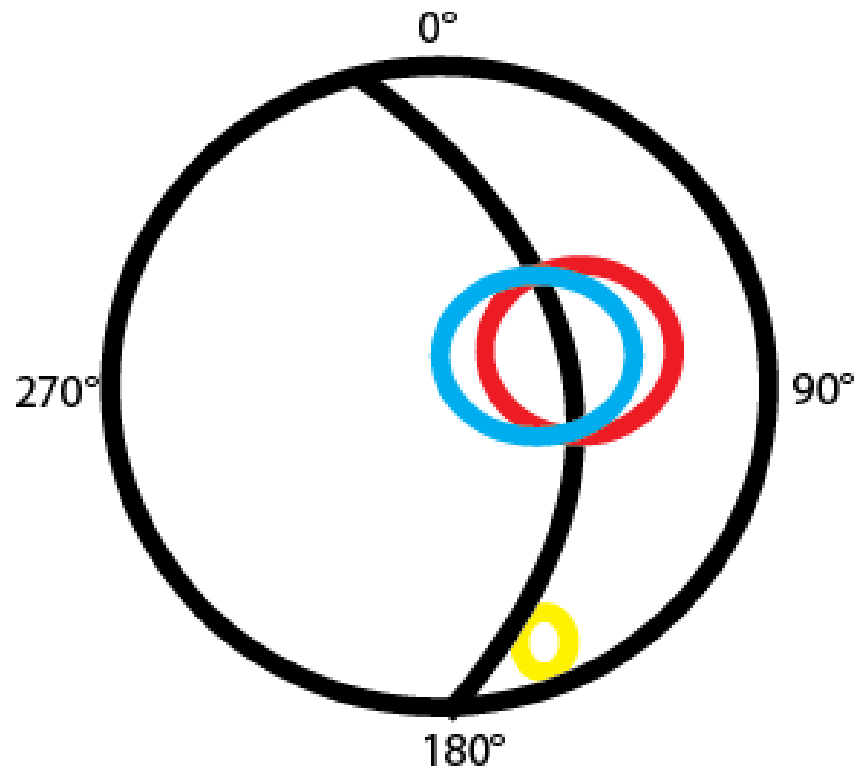


FIGURA 8.35: Diagrama de relación de fallas normales e inversas, Afloramiento 5

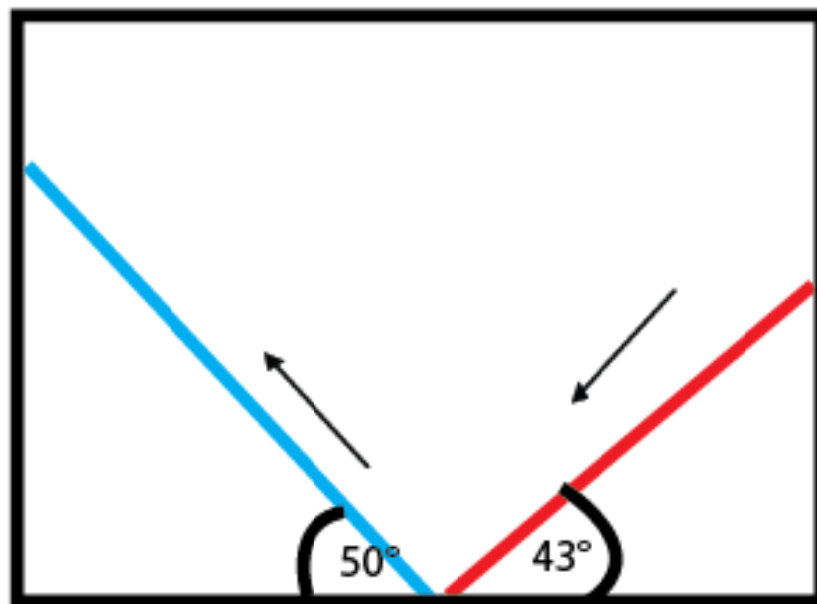


FIGURA 8.36: Relación entre fallas normales e inversas para el afloramiento 5



8.2 ANALISIS CINEMATICO FORMACION LAS CASCADAS

DATOS	FORMACION CASCADAS		
	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	229	159	55
ESTRATIFICACION	28	163	24
ZONAS DE CIZALLA	31	128	41

Tabla 8.15: Datos estructurales planares medidos en la Formación Las Cascadas.

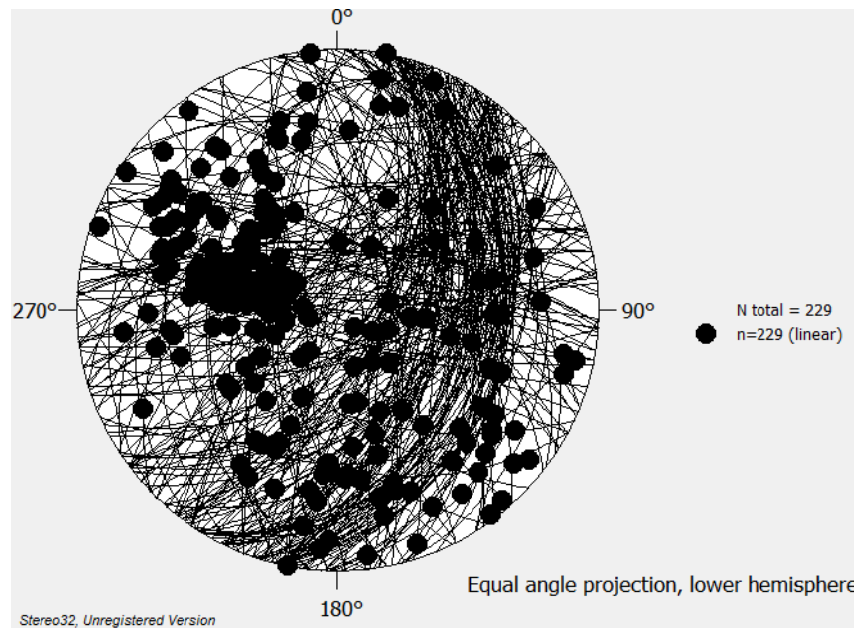


FIGURA 8.37: Representación estereográfica de las fallas presentes en la Formación Las Cascadas. se observa la tendencia de la orientación sur-este de los planos de Falla

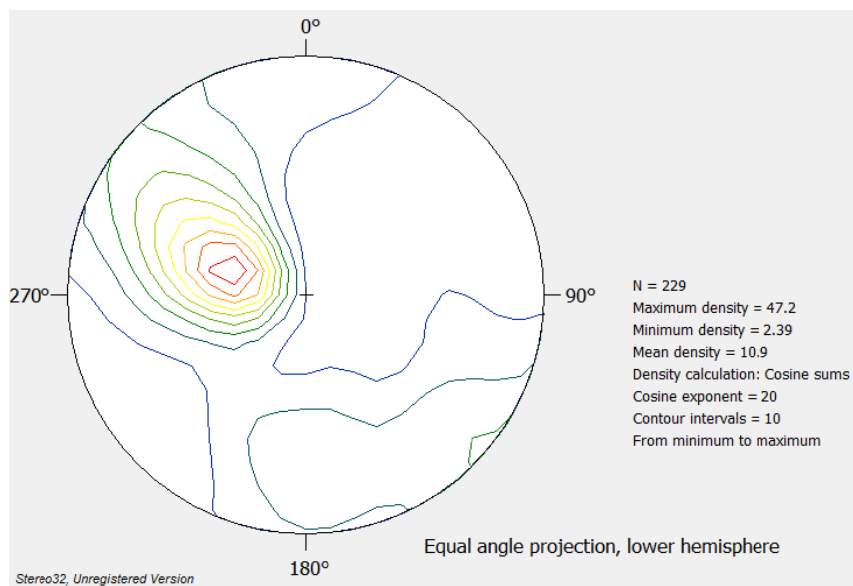


FIGURA 8.38: diagrama de densidad las fallas presentes en la Formación Las Cascadas

DATOS LINEALES

FORMACION CASCADAS			
TIPO DE FALLAS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
NORMALES	88	118	43
INVERSAS	45	206	65
DESTRALES	53	161	23
SINISTRALES	28	115	29

Tabla 8.16: Datos estructurales lineales medidos en la Formación Las Cascadas.

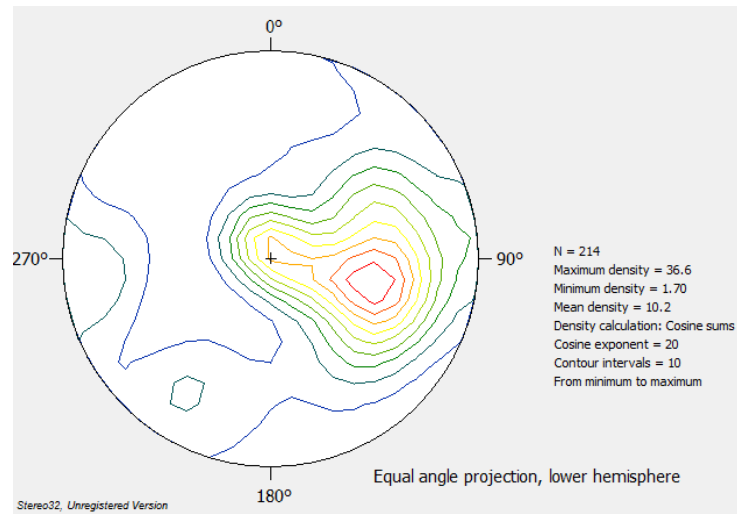


FIGURA 8.39: diagrama de densidad de las estrias de falla Formación Las Cascadas

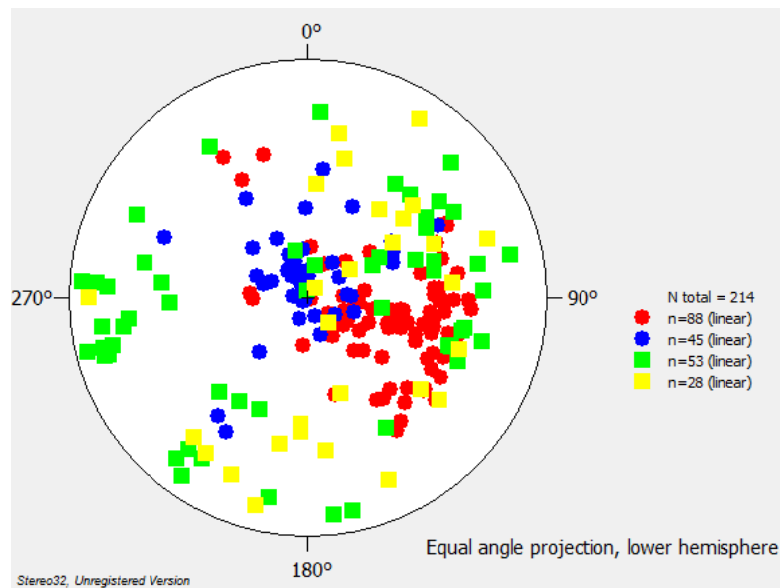


FIGURA 8.40: Proyección estereográfica de los datos lineales recolectados en campo (Formación Las Cascadas)

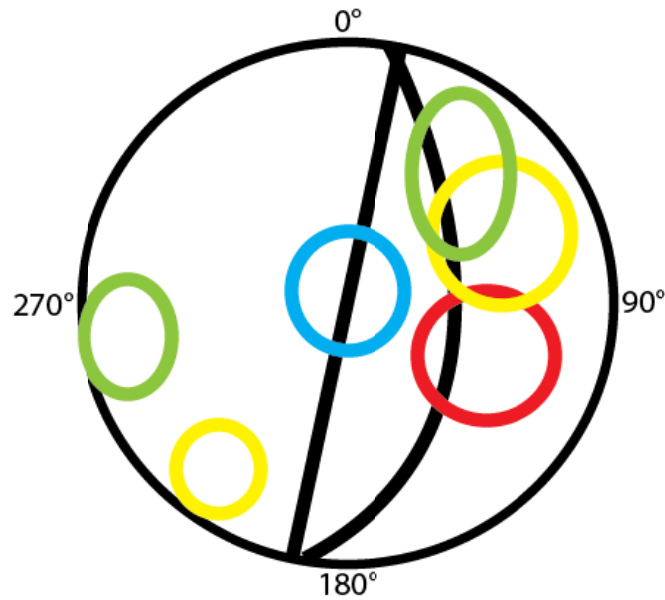


FIGURA 8.41: Representación de la relación entre fallas normales (Círculo Azul) y fallas inversas (Círculo Rojo), Formación Las Cascadas.

La relación de los planos (Líneas Negras) y las estrías de fallas (círculos rojos fallas normales, círculos azules fallas inversas, Círculos amarillos dextrales y círculos verdes fallas sinestrales). Formación Las Cascadas

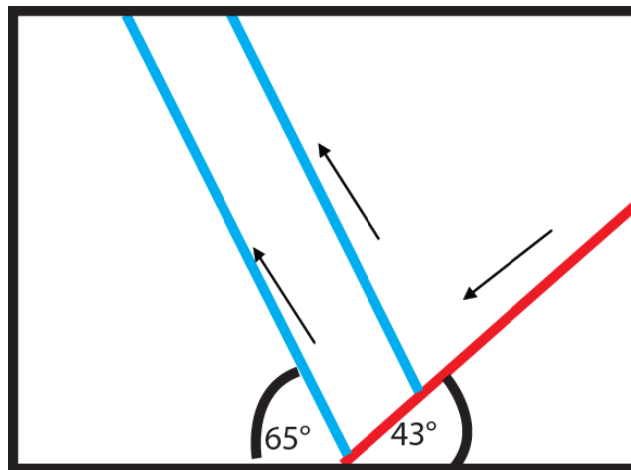


FIGURA 8.42: Relación de fallas normales e inversas, Formación Las Cascadas.

Se puede notar que las fallas inversas tienen un buzamiento alto, mayor a 60° , contradiciendo la ley de fallamiento de Anderson, al relacionarlos con las fallas



normales de ángulo medio a bajo, podemos concluir que por tectonismos se puede estar presentando una rotación de las formaciones

8.3 ANALISIS CINEMATICO FORMACION CULEBRA

Para la formación Culebra, se tomaron los siguientes datos planares.

FORMACION CULEBRA			
DATOS	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
FALLAS	139	192	56
ESTRATIFICACION	43	253	26
ZONAS DE CIZALLA	6	201	58

Tabla 8.17: Datos estructurales planares medidos en la Formación Culebra.

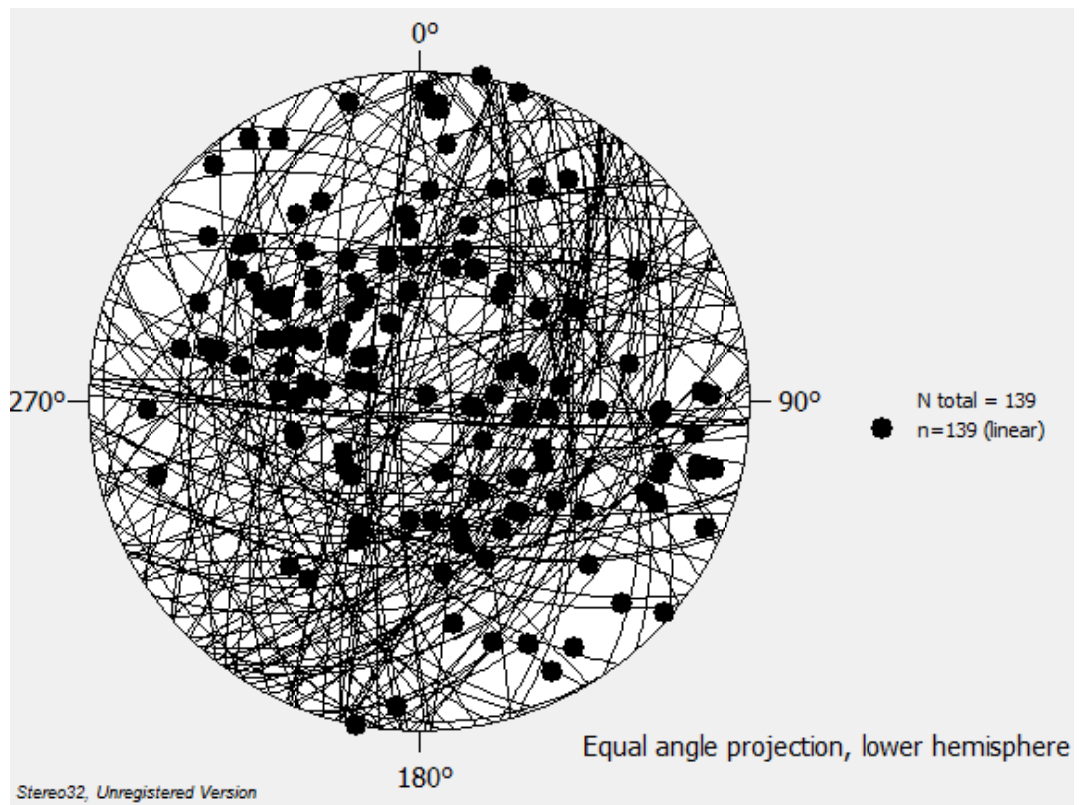


FIGURA 8.43: representación estereográfica de las fallas presentes en la Formación Culebra. se observa la tendencia de la orientación sur-este de los planos de Falla.

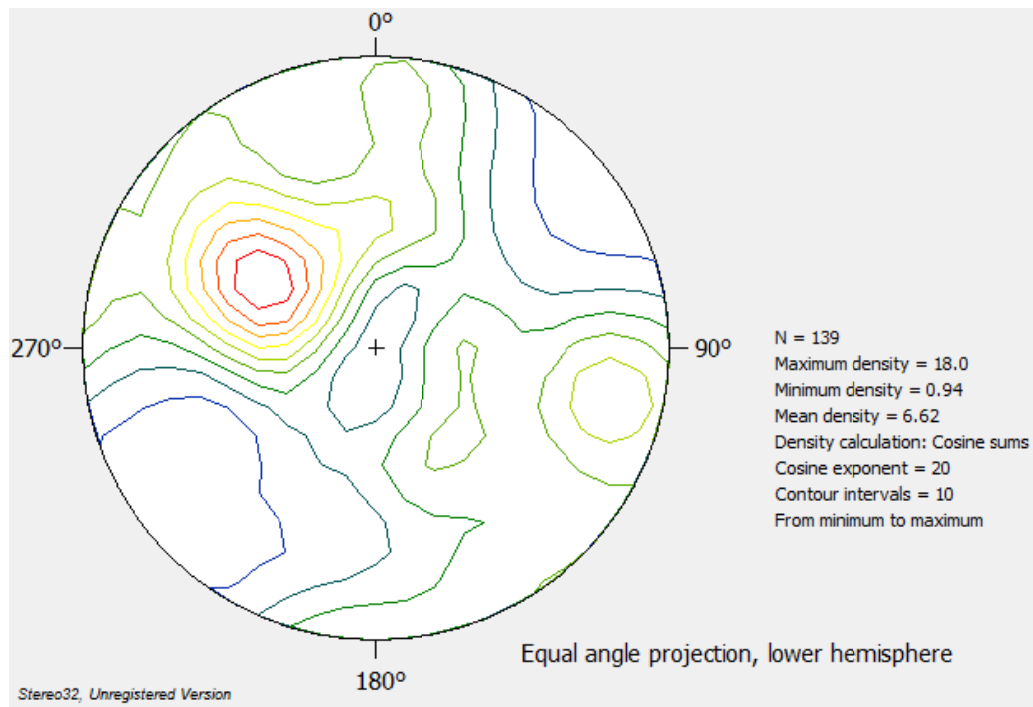


FIGURA 8.44: diagrama de densidad las fallas presentes en la Formación Culebra.

DATOS LINEALES

TIPO DE FALLAS	FORMACION CULEBRA		
	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
NORMALES	44	132	48
INVERSAS	42	237	59
DESTRALES	17	184	16
SINISTRALES	22	173	25

Tabla 8.18: Datos estructurales lineales medidos en la Formación Culebra.

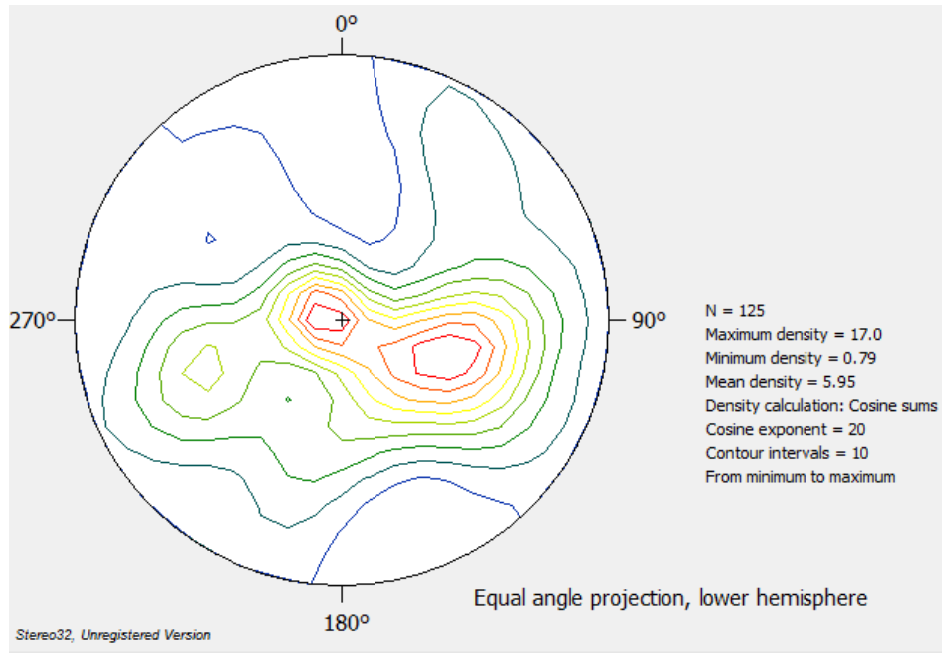


FIGURA 8.45: diagrama de densidad de las estrías de falla medidas en campo, presentes en la Formación Culebra. se observa mayor densidad de estrías de falla pertenecientes a fallas normales con promedio de buzamiento 48° .

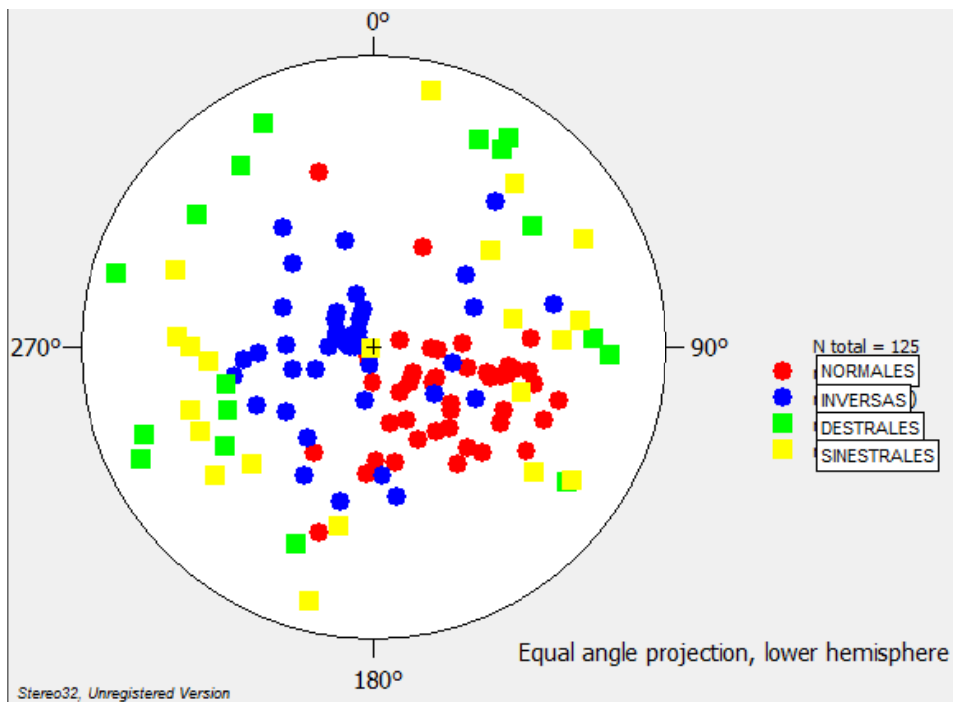


FIGURA 8.46 Proyección estereográfica de los datos lineales recolectados en campo (Formación Culebra), se continua observando la tendencia de verticalizacion de fallas inversas y la tendencia de ángulo medio a bajo para las fallas normales.

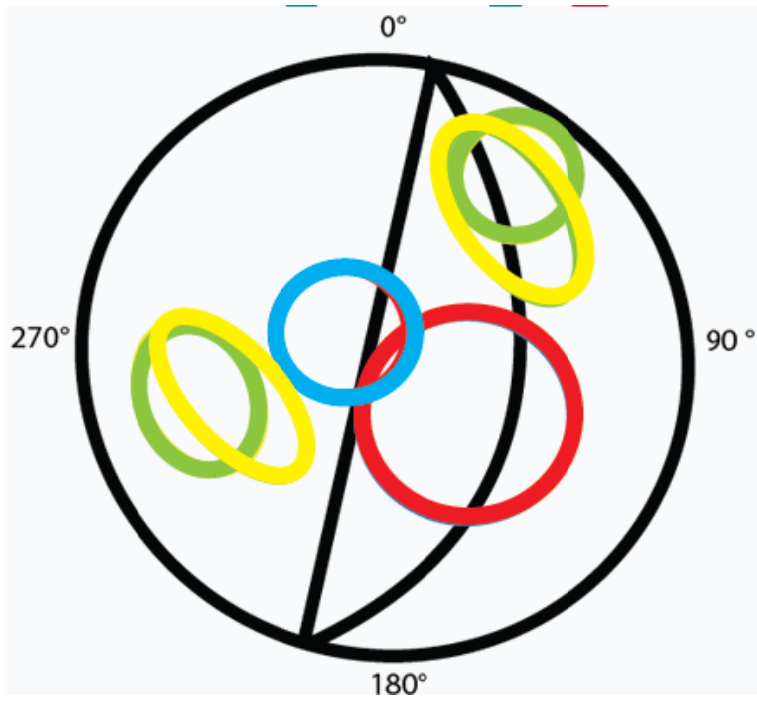


FIGURA 8.47: Representación de la relación entre fallas normales (Círculo Azul) y fallas inversas (Círculo Rojo), Formación Culebra.

Representación de la relación entre fallas normales (Círculo Azul) y fallas inversas (Círculo Rojo), observados en la proyección estereográfica de los datos recolectados en campo (Formación Culebra). (Fallas dextrales en amarillo y Fallas sinestrales en verde).

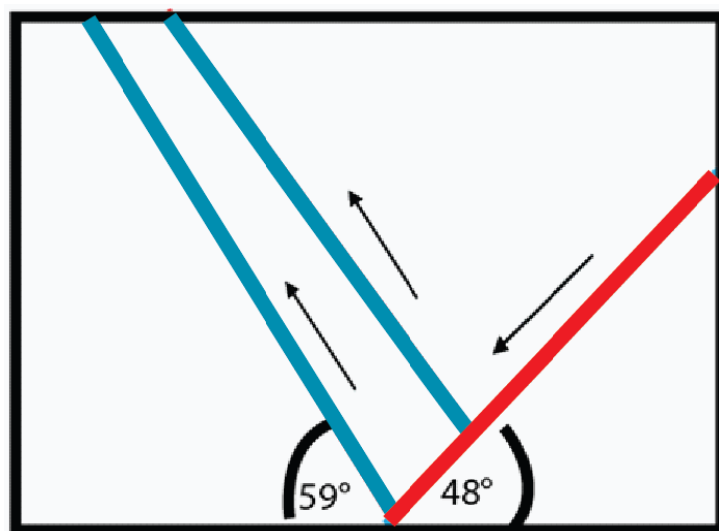


FIGURA 8.48: Relación de fallas normales e inversas, Formación Culebra.



En la Formación Culebra se puede notar que las fallas inversas tienen un buzamiento de 59° , contradiciendo la ley de fallamiento de Anderson, al relacionarlos con las fallas normales de ángulo medio a bajo, podemos concluir que por tectonismos se puede estar presentando una rotación de las formaciones.

8.4 CONCLUSIONES DEL ANALISIS CINEMATICO

- ❖ Analizando las tres formaciones, se observa la predominancia de el estilo de deformación de tipo normal, en un sistema conjugado con fallas inversas en dirección contraria y fallas de rumbo en diferentes direcciones, lo cual permite observar la complejidad de la estructura en pliegues sinclinales amplios, pero con una tendencia constante a lo largo de cada uno de los tres cortes, donde se observa un paralelismo de las fallas normales predominantes.
- ❖ Como resultado de los análisis, se deduce un comportamiento de la cuenca de tipo extensivo con rumbo Noreste – Suroeste, buzando hacia el Sureste. Las direcciones preferenciales son:

FORMACION	DIRECCION DE BUZAMIENTO DE FALLAS		
	CANTIDAD	DIRECCION DE BUZAMIENTO	BUZAMIENTO
BAS OBISPO	235	121	58
CASCADAS	229	159	55
CULEBRA	139	192	56

Tabla 8.19: Direcciones preferenciales de las fallas para las formaciones en estudio.

- ❖ En las tres formaciones, Se puede notar que las fallas inversas tienen un buzamiento mayor a 35° , en algunos casos mayores a 60° , y que las fallas



normales tienden a poseer buzamientos menores a 55° contradiciendo la ley de fallamiento de Anderson.

❖ Al analizar la tendencia de las fallas podemos concluir que se está presentando una rotación de las formaciones. Esta situación se presenta debido a la fuertes actividad tectónica que ha sufrido la región.

❖ Cinematicamente, se puede inferir que las formaciones en estudio, presentan un movimiento de cuerpo rígido, de tipo rotacional, lo que ha llevado a que las fallas normales se encuentren con un buzamiento alto y las fallas normales con buzamiento bajo. Como no se conoce el ángulo del estado inicial, en este caso se infiere que la rotación ha sido de aproximadamente 30°

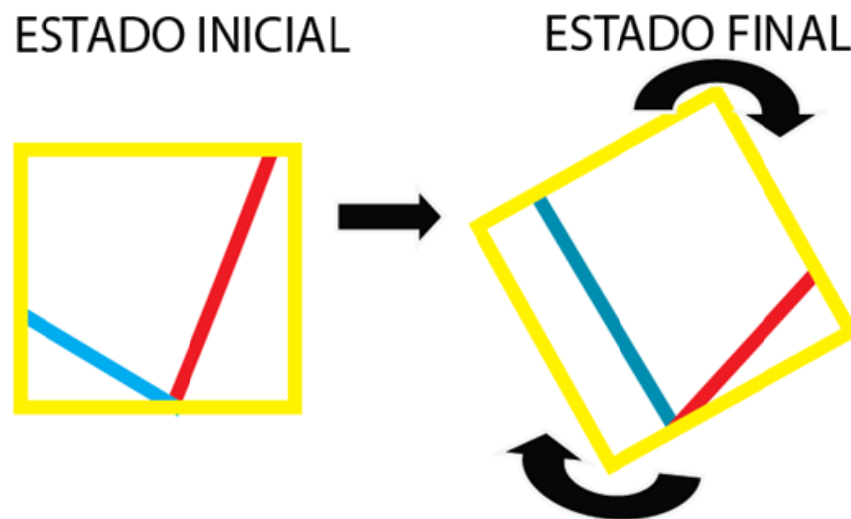


FIGURA 8.49: Representación grafica del comportamiento cinemático presentado en las formaciones de estudio, las líneas rojas representan fallas normales, las líneas azules fallas inversas. **Rotación de cuerpo rígido.**



9. ASPECTOS PALEONTOLOGICOS DEL AREA DE ESTUDIO

El proyecto de expansión del canal de Panamá, y las excavaciones realizadas llevan a descubrir nuevos afloramientos, donde es posible encontrar fósiles de edad Oligoceno, principalmente.

En la zona, se está llevando a cabo un estudio paleontológico para determinar si se ha presentado intercambio de especies entre los continentes suramericano y centroamericano, producto de el enlace producido por la formación del istmo de Panamá.

Es por esto, que con la colaboración de personal capacitado en temas paleontológicos, pertenecientes al Instituto Smithsonian, se llevo a cabo una breve descripción de los fósiles encontrados, con el fin de contribuir a este proyecto.

A continuación se describen las principales características paleontológicas de el área de estudio:

De la formación Bas Obispo no se encontraron fósiles, por lo tanto se pasa directamente a la descripción de los rasgos paleontológicos de la Formación Las Cascadas.

9.1 FOSILES DE LA FORMACIÓN LAS CASCADAS:

Esta Formación es de edad Oligoceno Tardío (Kirby *et al.*, 2008). Los fósiles encontrados en esta unidad fueron: Dientes de Cocodrilo y Artiodactilos (Oreodontidae, Protoceratidae), los cuales se encuentran en proceso de limpieza y clasificación, para ser aplicados al proyecto del rescate paleontológico.

Los fósiles encontrados no presentan deformación en si.

Se describen a continuación:



Fósil N°1:



FIGURA 9.1. Fotografía de un diente de Cocodrilo, encontrado en el tope de la formación Las Cascadas

Clase Reptilia, Linnaeus, 1758

Subclase Archosauria

Orden Crocodylia

Familia Crocodyliae

Nombre común: Cocodrilo

Fósil N°2:



FIGURA 9.2: Fotografía de una mandíbula de *Areodontidae* encontrada en el tope de la formación Las Cascadas,



FIGURA 9.3. Fotografía de una mandíbula de *Areodontidae* encontrada en el tope de la formación Las Cascadas.

Fósil N°3:

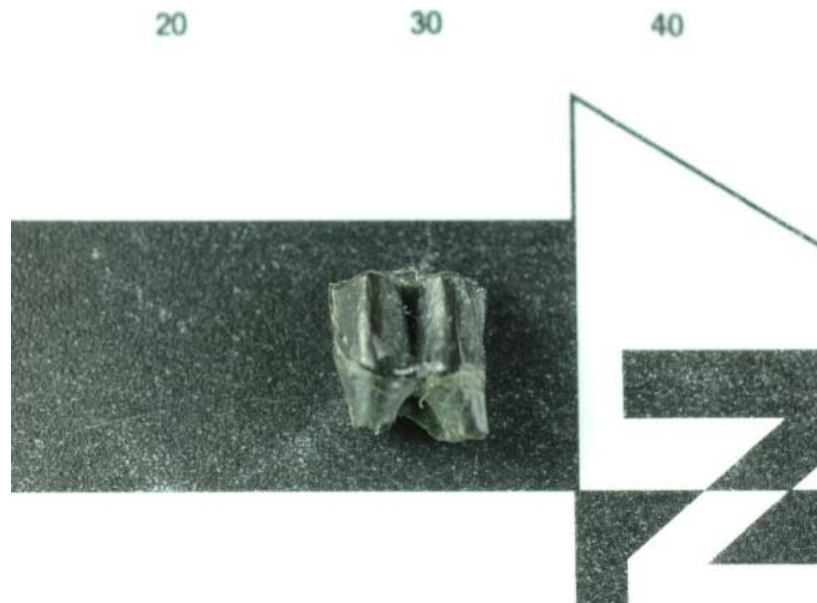


FIGURA 9.4: Fotografías correspondientes a un molar de *Protoceratidae*, encontrado al tope de la Formación Las Cascadas.

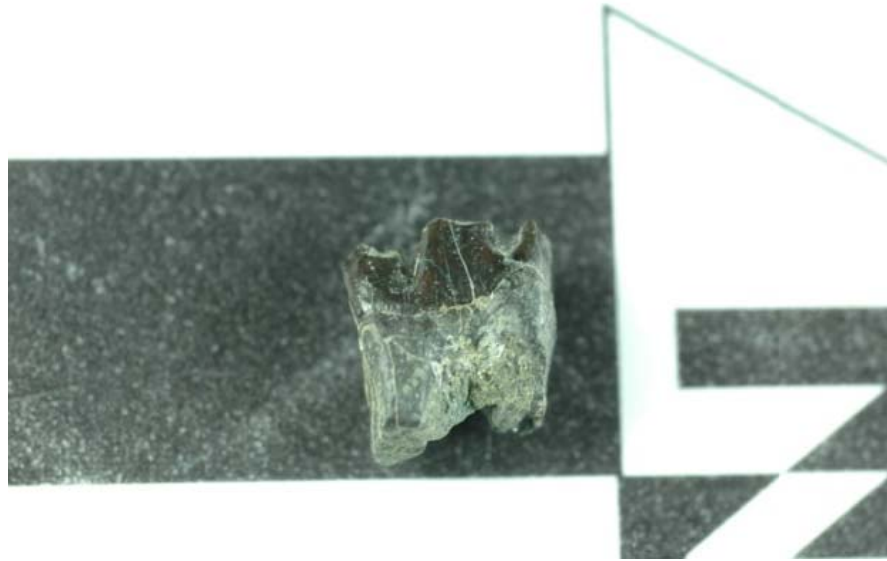


FIGURA 9.5: Fotografías correspondientes a un molar de *Protoceratidae*, encontrado al tope de la Formación Las Cascadas.

Clase Mammalia, Linnaeus, 1758
Orden Artiodactyla, Owen, 1848
Familia Oreodontidae, Leidy, 1869

9.2 FOSILES DE LA FORMACIÓN CULEBRA:

En tope del miembro inferior de la Formación Culebra está constituido por una capa de arenitas líticas de grano fino, donde se encontraron pectinidos (*Lepidopecten proterus*) y (*Spondylus scoth*). El miembro inferior de la Formación Culebra representa el inicio de un evento transgresivo con desarrollo de paleosuelos. Por debajo de estos se observa la secuencia volcánicoclástica de la Formación Las Cascadas y por encima los shales someros de la Formación Culebra (Kirby et al. 2008). Se observa alto grado de bioperturbación, reflejada por la presencia de *Thalassinoides sp.*

Los fósiles encontrados no presentan deformación en si.

Se describen a continuación:



FIGURA 9.6: Presencia de *Thalassinoides* en La Formación Culebra.

En las calizas Emperador, miembro medio de la Formación Culebra, La base está compuesta por capas concordantes de calcarenitas de grano fino con presencia de pectens con abundancia de *Acropora saludensis* y *Montastraea canalis*. La segunda consiste de calizas de color blanco. La tercera está compuesta de corales ramificados con predominio de *Acropora saludensis*, *Stylophora granulate* y *Porites douvillei*, los cuales se encuentran en una matriz lodosa con corales cerebro y presencia de *Montastraea* en posición de vida. La cuarta facies consiste en corales tabulares en bloques “platy coral boundstone” de color blanco; y la ultima facies son fragmentos de corales en una matriz de calcarenitas con presencia de *Montastrea* y gran cantidad de especies de *Porites* (Kirby *et al.*, 2008). El Emperador Limestone representa una franja de arrecifes protegidos por una laguna vecina, representada por el carbón lodoso en el miembro inferior subyacente (Johnson & Kirby 2006).



FIGURA 9.7 Coral cerebro fósil rodado, perteneciente a la base de la formación Culebra.

Dos especies de *Pectens* correspondientes a la primera facies fueron datadas con el método $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ con una edad de 20.62 ± 0.58 y 20.99 ± 0.46 ; Mioceno temprano (Kirby *et al.*, 2008).

El tercer miembro presenta un cambio abrupto y fácilmente reconocible debido a su coloración negra. Se caracteriza por presentar una secuencia de lodolitas negras laminadas, fragmentos fósiles como hojas, fósiles, semillas, cangrejos y dientes de tiburón.



FIGURA 9.8: Miembro Calizas emperador, se observa gran cantidad de corales y pectens.

FOSIL N° 4:

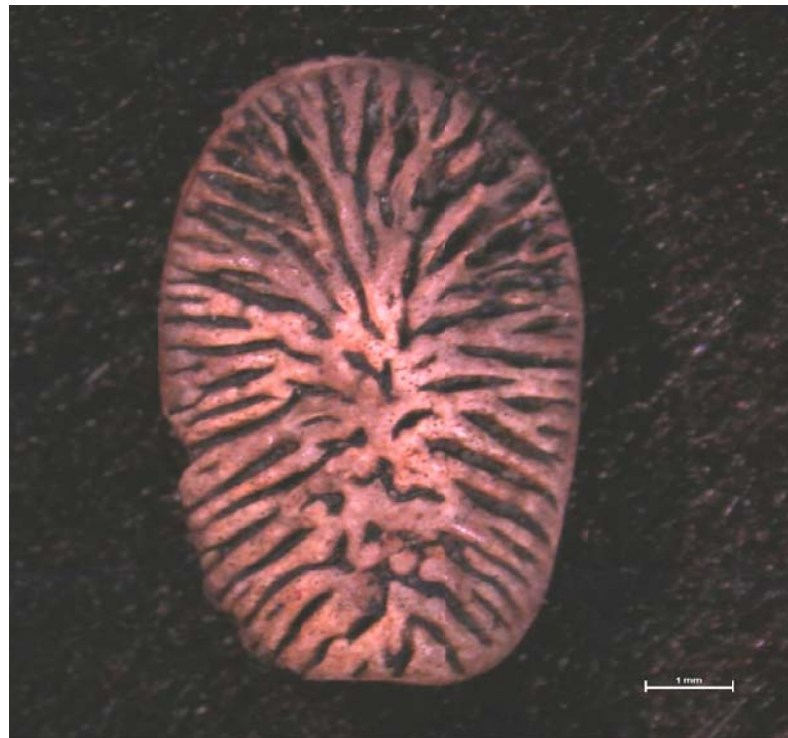


FIGURA 9.9: Fotografía tomada en microscopio de una semilla de Annonacea.

FOSIL N° 5:



FIGURA 9.10. Fotografía tomada en microscopio de una semilla de Myristicaceae.

FOSIL N° 6:



FIGURA 9.11. Fotografía de una mandíbula de PECCARY



FOSIL N° 7:



FIGURA 9.12 Diente de tiburón



10. VALIDACION DE LA METODOLOGIA

La medición en campo de fallas inversas de alto ángulo y de fallas normales de bajo ángulo, son situaciones que se pueden presentar por diferentes mecanismos. Las tres formaciones analizadas presentan este caso, lo que nos puede indicar que es un fenómeno que abarca en general la zona de estudio y que se puede estar presentando por una rotación de las formaciones. Anderson (1957).

Para un elaborar un análisis cinemático de la zona en estudio y apreciar mejor la situación que se esta presentando, es fundamental la observacon de las estructuras en campo, el análisis de trabajos anteriores tanto sedimentologicos como paleontológicos y la integración de los mismos.

La metodología utilizada permito:

- Tener una idea de las principales características sedimentologicas de las formaciones en estudio.
- Determinar el estilo estructural presente en las formaciones en estudio, mediante la elaboración de secciones estructurales.
- Elaborar un análisis cinemático de las formaciones en estudio, determinando en tipo de movimiento que presenta la región.
- Aportar nueva información a los proyectos elaborados actualmente en la zona de estudio.



10.1 RESULTADOS

- ❖ Se elaboro la cartografía geológica de las formaciones en estudio.(Ver anexo 1)

- ❖ Se elaboraron tres secciones estructurales, una por cada Formación en estudio, en las cuales se plasmaron los estilos estructurales observados. (Capitulo 7). (Ver Anexos 2,3,4,)

- ❖ Se elaboro el análisis cinemático para las formaciones en estudio, obteniendo como resultado que se presenta una rotación en las formaciones en estudio. (Capitulo 8).

- ❖ Se apporto nueva información de geología estructural para las formaciones en estudio.



11. CONCLUSIONES

- ❖ Las características sedimentológicas y estructurales de la zona en estudio, nos indican que se ha presentado gran actividad tectónica en la región, producto de la localización del Bloque de Panamá.

- ❖ En la zona de estudio se presentan formaciones de origen volcanosedimentario, cuyas edades varían del Eoceno al Pleistoceno, conformados en su mayoría por Aglomerados y Tobas de Lapilli, Cenizas piroclásticas, lodolitas, areniscas y calizas de ambientes marinos que varían de arrecifal a somero.

- ❖ Se observan fósiles que van desde corales, pectens y semillas fosilizadas en la formación culebra, ya que su litología de lodolitas y calizas permitió la preservación de los mismos, la Formación Cascadas presenta dientes y mandíbulas fósiles, esta Formación por ser litológicamente mas volcánica, al presenta menor cantidad de fósiles.

- ❖ Estructuralmente, se observa la predominancia de el estilo de deformación de tipo normal, en un sistema conjugado con fallas inversas en dirección contraria y fallas de rumbo en diferentes direcciones, lo cual permite observar la complejidad de la estructura en pliegues sinclinales amplios, pero con una tendencia constante a lo largo de cada uno de los tres cortes, donde se observa un paralelismo de las fallas normales predominantes.



- ❖ Se deduce un comportamiento de la cuenca de tipo extensivo con dirección de buzamiento predominante hacia el Sureste.

- ❖ En las tres formaciones, Se puede notar que las fallas inversas tienen un buzamiento mayor a 35° , en algunos casos mayores a 60° , y que las fallas normales tienden a poseer buzamientos menores a 55° contradiciendo la ley de fallamiento de Anderson

- ❖ Cinematicamente, se puede concluir que las formaciones en estudio, presentan un movimiento de cuerpo rígido, de tipo rotacional, lo que ha llevado a que las fallas normales se encuentren con un buzamiento alto y las fallas normales con buzamiento bajo. Como no se conoce el ángulo del estado inicial, en este caso se infiere que la rotación ha sido de aproximadamente 30° .



12. RECOMENDACIONES

- Continuar elaborando secciones estructurales hacia el sur, para de esta forma entender como se sigue presentando el estilo estructural en el canal de Panamá.

- Se recomienda combinar los métodos y la observación de campo, con el análisis de la información en oficina, para mejorar el análisis final.

- Buscar el contacto neto entre las Formaciones Bas Obispo y las cascadas, para poder mejorar la calidad de la información relacionada con el estilo estructural de las formaciones.

- Se recomienda aplicar esta metodología en áreas a explorar por parte de la autoridad del canal de Panamá.



13. BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, E. M., 1957. The dynamics of faulting and dyke formation. 2nd. Ed. Oliver and Boyd.

COLLINS, T.M., Frazer, K., Palmer, A. R., Vermeij, G.J. & Brown, W.M., 1996. Evolutionary history of northern hemisphere *Nucella* (Gastropoda, Muricidae); molecular, morphological, ecological, and paleontological evidence. *Evolution* **50**. 2287 – 2304.

COATES A.G., JACKSON Jeremy B.C., Collins L.S., U.S. Geological Survey, Jung P., Obando J., 1991. Closure of the Isthmus of Panama, The near – shore marine record of Costa Rica and western Panama.

DAVIS, George H., STEPHEN J. Reynolds, 1996, Stuctural geology of rocks and regions. -2nd ed./ George H., p. 660 – 667.

FISHER, Richard Virgil. SCHMINCKE, Hans Verich., 1984, Pyroclastic rocks. Springer. New York. US. xiv, 472 p.

HILL, R.T., 1898, The Geological history of the Isthmus of Panama and portions of Costa Rica, *Bull. Museum comp. Zool. Harvard college*, Vol. 28, pp. 151 – 285.

HOWE, E., 1907, Report on the geology of the Canal Zone: Isthmian Canal Comm., Annual Report, 1907, p. 108-138.

JOHNSON, K. G., Kirby, 2006. The Emperador limestone rediscovered: early Miocene corals from the Culebra Formation, Panama. *Journal of Paleontology* **80**(2): 283-293.

KELLOGG, J. N. y V. Vega, (1995): Tectonic development of Panamá, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity, *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, in press.

KIRBY MX, JONES DS, MACFADDEN BJ (2008) Lower Miocene Stratigraphy along the Panama Canal and It's Bearing on the Central American Peninsula. *PLoS ONE* **3**(7): e 2791. doi: 10.1371/journal.pone.0002791.

MACDONALD, D.F. 1913. Isthmian Geology, *Ann. Rept. Isthmian Canal Comm. 1913*, App. S, pp. 565 – 82. Geological section of the Panama Canal Zone, *Bull. Geol. Soc. America*, Vol. 24, pp. 707-10.

MANN, P, KOLARSKY, R, 1995, East Panama Deformed Belt: Structure, Age and Neotectonic Significance, *Geological Society of America, Special Paper* 295.



MARTINEZ, JOSE, Geología estructural y dinámica global, Curso 2003, departamento de geología, Universidad de Salamanca.

MORON & MONTES, 2008. Reporte estratigráfico interno. Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá.

ROSELLO, E, 2005, Sistemas Tectonicos Transcurrentes, Una síntesis de las condiciones mecánicas y aplicaciones geológicas, publicación seire N° 5 Asociación Geológica Argentina.

STEWART, R.H., STEWART, J.L., WOODRING, W.P., 1980, Geologic map of the Panama Canal and vicinity, Republic of Panama: United States Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map I-1232, scale 1:100,000.

WOODRING, W.P., 1957-1982, Geology and paleontology of Canal Zone and adjoining parts of Panama: United States Geological Survey Professional Paper 306, 759 p.

WOODRING, W.P., THOMPSON, T.F., 1949, Tertiary formations of Panama Canal Zone and adjoining parts of Panama: Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, v. 33, p. 223-247.

R.W. LE MAITRE (Ed.) (1989). "A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms". Blackwell Sc. Publ., Oxford, 193 pag. (Rocas piroclásticas y tefra, 7-9).

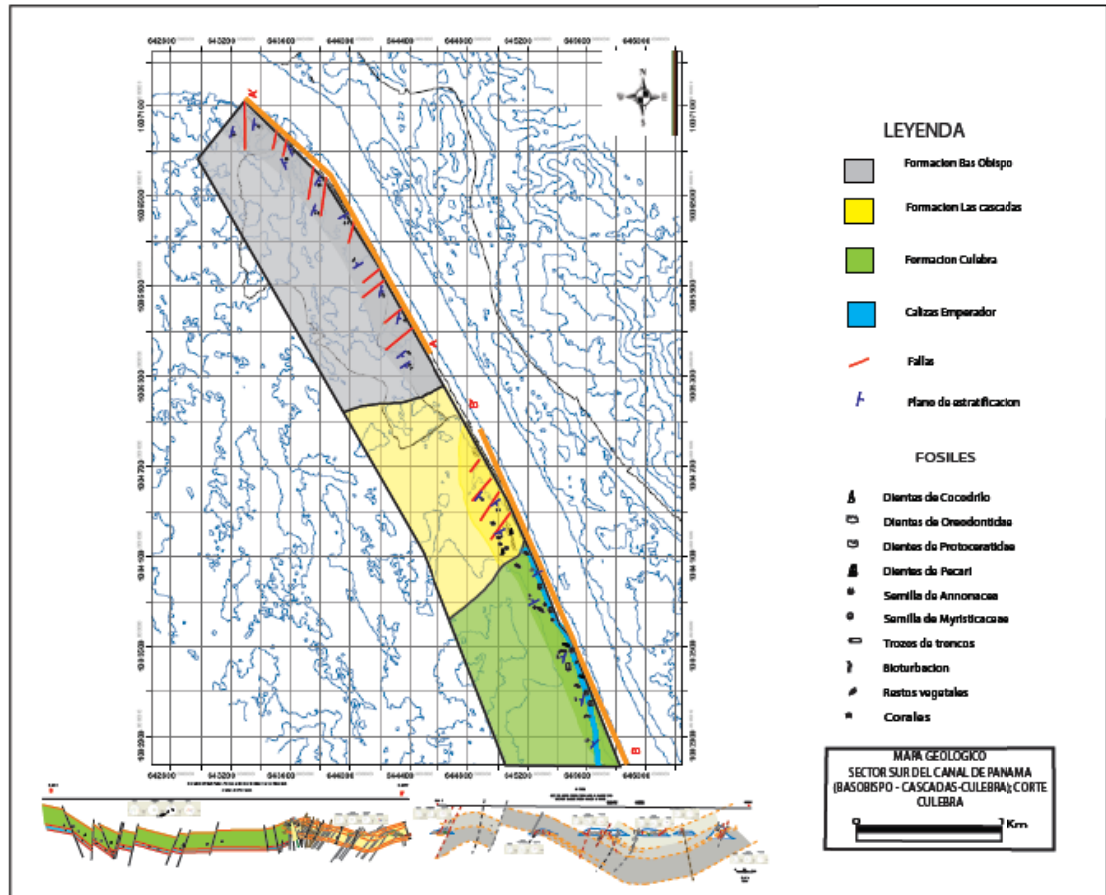


14. ANEXOS

1. **Anexo 1: Mapa geológico del área de estudio.**
2. **Anexo 2: Sección estructural Formación Bas Obispo.**
3. **Anexo 3: Sección estructural Formación Las Cascadas.**
4. **Anexo 4: Sección estructural Formación Culebra.**
5. **Anexo 5: Mapa geológico estructural del área de estudio.**
6. **Anexo 6: Columna estratigráfica generalizada del area de estudio.**

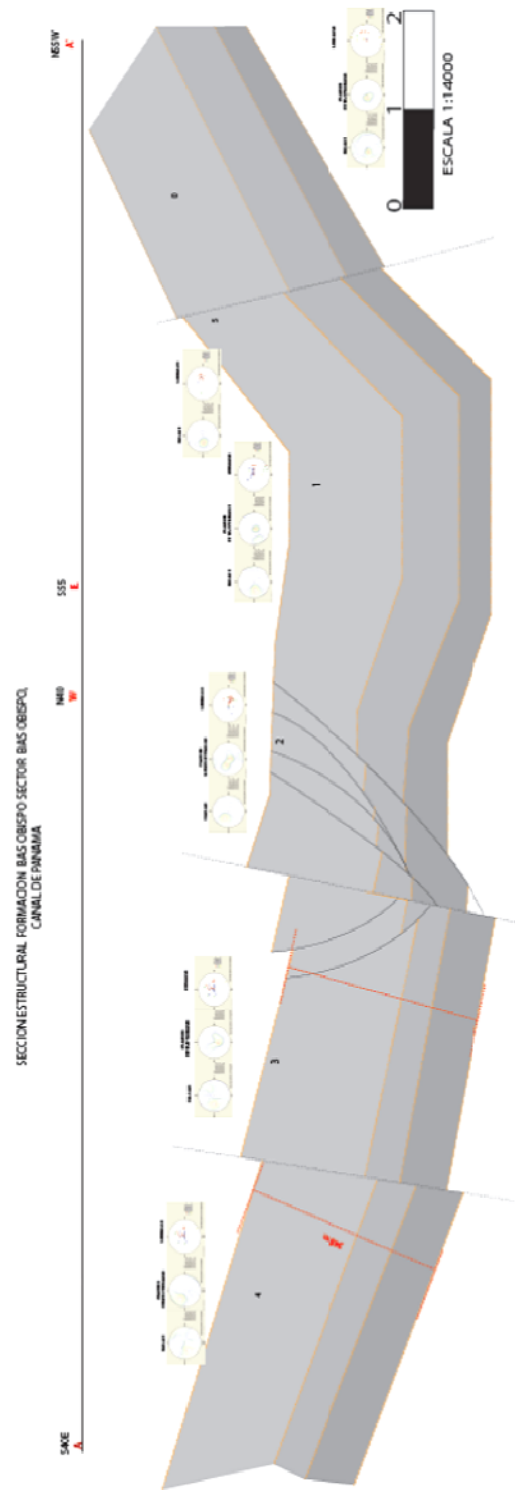


ANEXO 1



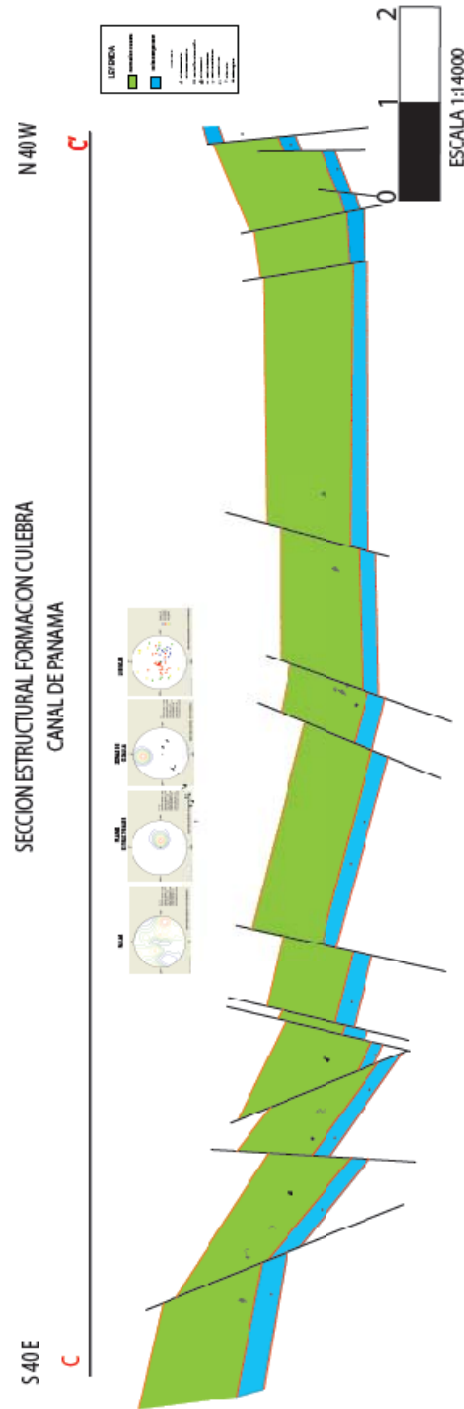


ANEXO 2



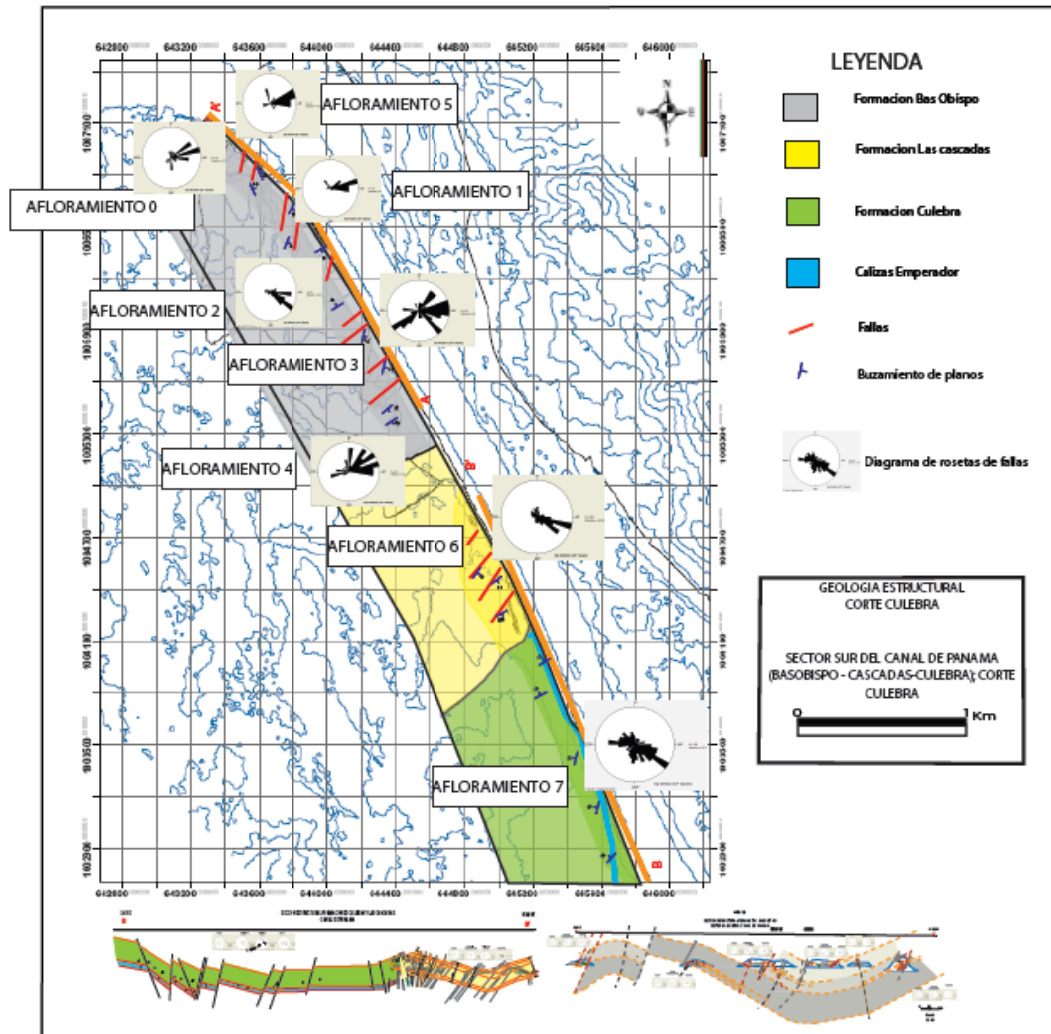


ANEXO 4



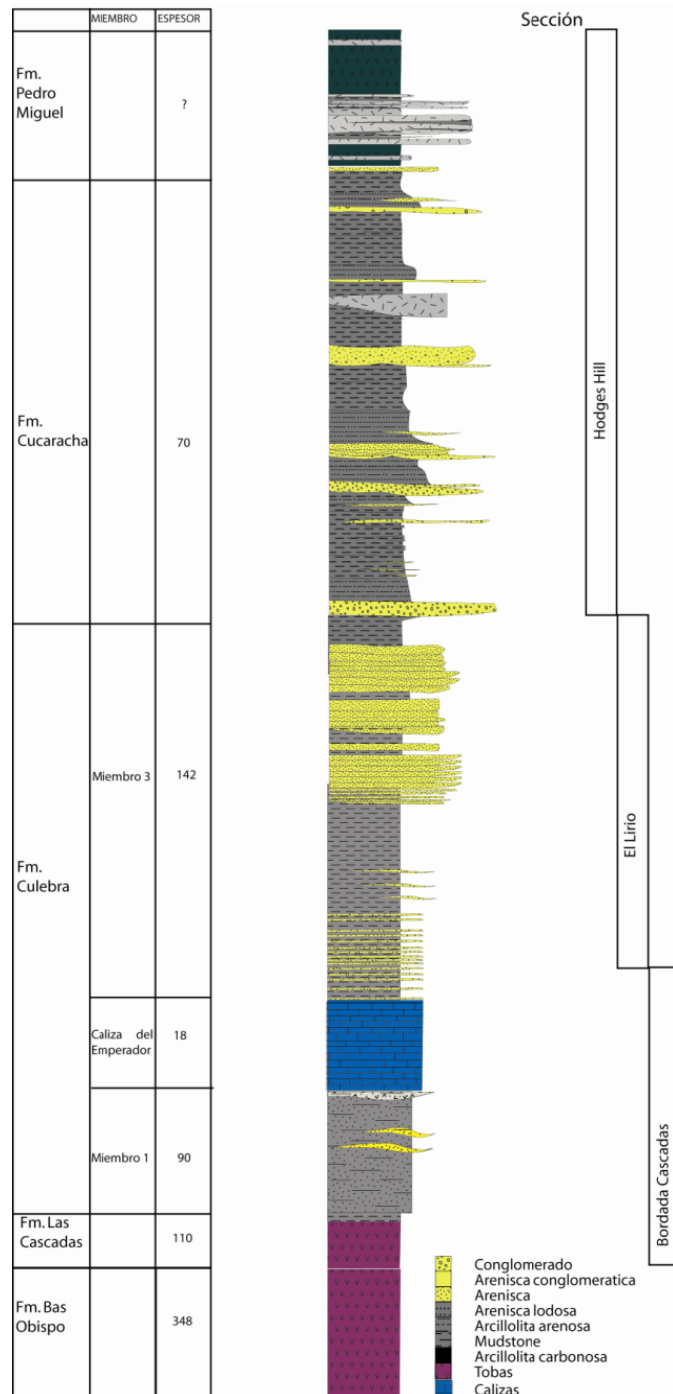


ANEXO 5





ANEXO 6



: Columna estratigráfica generalizada del area de estudio, Modificado de Morón y Montes 2008.