

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA EN
NEOTECTÓNICA: CASO DE ESTUDIO VALLE DE ABURRÁ Y ALREDEDORES**

**DUVAN ALEJANDRO JARABA FERNANDEZ
MARIA PAULA RUIZ SUTA**

**TRABAJO DE GRADO
PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**DIRECTOR:
María Isabel Marín Cerón, PhD**

**ASESOR:
Santiago Noriega Londoño, MSc**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2020**

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	3
Abstract	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	8
1. INTRODUCCIÓN	10
2. MARCO GEODINÁMICO Y GEOLOGÍA REGIONAL	12
3. MODELOS DE FORMACIÓN DEL VALLE DE ABURRÁ	18
4. APLICACIONES DE FÁBRICA MAGNÉTICA EN NEOTECTÓNICA	23
5. DESARROLLO METODOLÓGICO	27
5.1 Conformación de geodatabase	28
5.2 Análisis de ASM en depósitos recientes del Este y Oeste del Valle de Aburrá y sus alrededores	29
5.3 Integración de datos	32
6. RESULTADOS	33
6.1 Inventario de puntos de Interés	33
6.2 Neotectónica al Este del Valle de Aburrá	36
6.2.1 Sector La Brizuela	38
6.2.2 Análisis de ASM en La Brizuela	42
6.3 NEOTECTÓNICA AL OESTE DEL VALLE DE ABURRÁ Y ALREDEDORES	52
6.3.1 Sector Yarumalito	52
6.3.2 Sector La Estrella (La Tablaza):	60
6.3.3 Sector La Caimana	66
7. DISCUSIÓN	72
9. REFERENCIAS	87

Resumen

La anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) es un método que permite caracterizar la fábrica magnética de rocas y sedimentos, y ésta a su vez sirve para estimar el tipo de deformación tectónica generada por un campo de esfuerzos. En la zona de influencia de una falla activa, la fábrica magnética permite medir la deformación tectónica asociada al desplazamiento de dicha estructura, además, si esta deformación se encuentra impresa en depósitos cuaternarios, es posible estimar la geometría y la cinemática de estas fallas y contribuir al conocimiento neotectónico de una región.

Este trabajo explora la aplicación de las técnicas de ASM sobre depósitos cuaternarios deformados que cubren fallas activas con el objetivo de brindar información acerca de la geometría y cinemática de fallas con desplazamientos recientes en el borde oriental y occidental del Valle de Aburrá, donde se han reportado sitios de interés neotectónico.

Los resultados obtenidos sugieren que existe una relación en la deformación para ambos lados del Valle de Aburrá debido a las similitudes en los esfuerzos máximos y mínimos y a la anisotropía presente en cada punto de interés.

Finalmente, se concluye que la aplicación de ASM en sedimentos deformados por fallas activas suministra información fundamental para la calibración de los modelos de evolución tectónica y la evaluación de la amenaza sísmica en el Área metropolitana del Valle de Aburrá y de los sectores aledaños a este.

Palabras claves: Fábrica magnética, depósitos deformados, actividad neotectónica reciente, fallas activas.

Abstract

Magnetic susceptibility anisotropy (ASM) is a method that allows characterizing the magnetic factory of rocks and sediments, and this in turn serves to estimate the type of tectonic deformation generated by a stress field. In the zone of influence of an active fault, the magnetic factory allows to measure the tectonic deformation associated with the displacement of said structure, in addition, if this deformation is printed in quaternary deposits, it is possible to estimate the geometry and kinematics of these faults and contribute to the neotectonic knowledge of a region.

This work explores the application of ASM techniques on deformed quaternary deposits that cover active faults with the aim of providing information about the geometry and kinematics of faults with recent displacements in the eastern and western edge of the Aburrá Valley, where they have been reported neotectonic sites of interest.

The results obtained suggest that there is a relationship in deformation for both sides of the Aburrá Valley due to the similarities in the maximum and minimum stresses and the anisotropy present at each point of interest.

Finally, it is concluded that the application of ASM in sediments deformed by active faults provides fundamental information for the calibration of the models of tectonic evolution and the evaluation of the seismic threat in the metropolitan area of the Valle de Aburrá and its neighboring sectors

Palabras claves: Fábrica magnética, depósitos deformados, actividad neotectónica reciente, fallas activas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del contexto geodinámico de los Andes Colombianos (Tomada de Noriega,S. Documento en preparación).....	14
Figura 2. Localización regional del Valle de Aburrá, indicando las fallas regionales (Línea rojas) y la distribución espacial del Batolito Antioqueño (Línea punteada amarilla), (Tomada de Noriega, S. Documento en preparación)	14
Figura 3. Mapa geológico estructural del área de estudio (Elaboración propia basado en información de CartoAntioquia, Rendón, 2003. Terreno acrecionado del océano Caribe (ACOT), Basamento metamórfico Devonico/carbonífero (D/Cmb), Rocas sedimentarias Oligoceno (Eo/Oi-sr), Rocas basálticas (Kbr), Rocas ultramáficas (Kii)Rocas metamórficas(Kmr), Rocas intrusivas (KvSr), Rocas magmáticas Plioceno (M/Pi-mag), Rocas sedimentarias Neogeno (NSr); Baasamento metamórfico(Pmb),Depositos cuaternarios (Q), Rocas Triasico intrusivas (Tii), Basamento metamórfico Paleozoico(Tmr); Rocas ultramáficas Triasico (Tur).....	15
Figura 4. Localización del Valle de Aburrá asociado a las cuencas presentes en la zona.	16
Figura 5. Perfil de las cuencas asociadas al Valle de Aburrá (Noriega, S. Artículo en publicación).	17
Figura 6. Mapa geomorfológico regional del Valle de Aburrá (Elaboración propia información geomorfológica suministrada por Corantioquia).	20
Figura 7. Clasificación de fábricas magnéticas (a) Fábrica uniaxial plana, (b) Fábrica uniaxial lineal, (c) Fabrica triaxial, (d) Secuencia de fábricas magnéticas y (e) Gráfico de rocas deformadas T Vs Pj. Tomado de Robion et al, 2007	25
Figura 8. Tipos de fábricas magnéticas asociadas a la distribución de los ejes K1, K2 y K3. Tomado de Burgin et al, 2019	26
Figura 9. Flujograma metodológico a partir de los objetivos propuestos. Elaboración propia	27
Figura 10. Flujograma de los insumos bases requeridos para la realización de la geodatabase (Elaboración propia).....	28

Figura 11. Flujograma de los recursos y herramientas utilizadas en la fase de muestreo y caracterización de elipsoides de deformación usando datos de ASM (Elaboración propia).....	30
Figura 12. Fases del muestreo de campo para el área Oriental y Occidental. (A, B). Identificación y Limpieza del afloramiento. (C). Ubicación de las cajas de acrílico (D). Marcación de las cajas (E, F). Orientación de las muestras y toma de datos estructurales (G). Retiro de las muestras y (H). Medidas del laboratorio	31
Figura 13. Puntos de interés neotectónico asociados al Valle de Aburrá (Referencias citadas en la tabla 1).....	33
Figura 14. Mapa de interés para el sector La Brizuela (Elaboración propia).....	37
Figura 15. Mapa morfotectónico asociado al punto de La Brizuela (Elaboración propia, a partir de información obtenida por Gallego, 2013 para la identificación de las terrazas).....	38
Figura 16. Corte esquemático de las terrazas asociadas al sector La Brizuela (Elaboración propia)	39
Figura 17. Esquema de estructuras y materiales de La Brizuela (Elaboración propia).	41
Figura 18. Columna estratigráfica sector La Brizuela	42
Figura 19. Distribución de las muestras para el análisis de ASM. (A). La Brizuela sectores BZ1 y BZ2. (B) Distribución para BZ3 y (C). Muestreo general para toma de muestras ASM (Fotos tomadas en campo).....	44
Figura 20. Representación de los valores de susceptibilidad y parámetros de forma. (A) Bloque techo BZ1, (B) Bloque piso BZ2 y (C) Sedimentos horizontales BZ3. (T) parámetro de forma para las áreas de estudio (Datos obtenidos por anisoft 5.0).	46
Figura 21. Diagramas de Flinn (F Vs L) y Jelinek (Pj Vs T) para las áreas de estudio. (A) Diagrama Jelinek para BZ1 junto al diagrama Flinn. (B) diagramas para BZ2. (C) Diagramas para BZ3 y (D) datos totales para BZ1 Y BZ2 (Datos obtenidos por anisoft 5.0.	47
Figura 22. Distribución de las muestras y elipsoides de ASM para La Brizuela con ASM para el análisis de la estructura (Datos dados en formato bootstrap). Fallamiento normal con buzamiento hacia el SE (Elaboración propia, a partir de datos obtenidos por Anisoft 5.0).	48

Figura 23. Yarumalito, San Antonio de Prado, Medellín (Elaboración propia, con información obtenida de Rendón y cartografía base).	53
Figura 24. Afloramiento de Yarumalito (Foto tomada en campo).	55
Figura 25. Elipsoide del sector Yarumalito, Bloque Techo (Ya1) con K_{max} , K_{int} y K_{min} (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0)	56
Figura 26. Diagrama de Jelinek (P_j Vs T) y diagrama de Flinn (F Vs L) sector Yarumalito, Bloque Techo (Ya1) (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0)	56
Figura 27. Elipsoide del sector Yarumalito, Bloque piso (Ya2) con K_{max} , K_{int} y K_{min} con K_{max} , K_{int} y K_{min} (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0)	57
Figura 28. Diagrama de Jelinek (P_j Vs T) y diagrama de Flinn (F Vs L) sector Yarumalito, Bloque piso (Ya2).....	57
Figura 29. Diagramas de Susceptibilidad promedio Vs Grado de anisotropía corregido (1), Histograma de Susceptibilidad promedio (2), diagrama de Jelinek (P_j Vs T) (3) y diagrama de Flinn (F Vs L) (4) para las áreas de estudio (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0).....	58
Figura 30. Mapa morfotectónico de La Tablaza, Caldas (Elaboración propia, con información obtenida de Rendón y cartografía base).	63
Figura 31. Distribución de las muestras para el análisis de ASM (Foto tomada en campo).....	64
Figura 32. Elipsoide de La Tablaza con K_{max} , K_{int} y K_{min} (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0).	64
Figura 33. Diagrama de Jelinek (P_j Vs T) y diagrama de Flinn (F Vs L) para las áreas de estudio (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0).	64
Figura 34. Diagramas de Susceptibilidad promedio Vs Grado de anisotropía corregido, Histograma de Susceptibilidad promedio para la zona de estudio (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0).	65
Figura 35. La Caimana en Santa fe de Antioquia (Elaboración propia, con información obtenida de Rendón y cartografía base).	67
Figura 36. Elipsoide con K_{max} , K_{int} y K_{min} (Datos obtenidos del anisoft 5.0).....	69

Figura 37. Diagrama de Jelinek (Pj Vs T) y diagrama de Flinn (F Vs L) para las áreas de estudio (Datos obtenidos del Anisoft 5.0)	69
Figura 38. Diagramas de susceptibilidad (Datos obtenidos por el anisoft 5.0)	69
Figura 39. Proyecciones estereográficas de los datos estructurales obtenidos en el estudio. (A) Falla La Mosca. (B). Zona El Salado (Tomado de 14 datos), (C). Falla normal La Brizuela con datos de ASM	74
Figura 40. Diagrama de esfuerzos para la zona La Brizuela y modelo de Riedel	74
Figura 41.(A). Falla San Jerónimo y Falla en Yarumalito (B). Falla en Yarumalito con Tensores medios para los datos obtenidos por ASM	75
Figura 42. Diagrama de esfuerzos para la zona Yarumalito y modelo de Riedel.....	76
Figura 43. Diagrama de tensores medios para ASM de La Tablaza	77
Figura 44. Diagrama de esfuerzos para la zona La Tablaza y modelo de Riedel	77
Figura 45. Diagrama de tensores medios para ASM de La Caimana	78
Figura 46. Diagrama de esfuerzos para la zona La Caimana y modelo de Riedel	79
Figura 47. Campos de esfuerzos para los puntos neotectónicos con modelo Riedel.	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Puntos de interés neotectónicos del Valle de Aburrá y alrededores.....	34
Tabla 2. Descripción de las Subunidades geomorfológicas del sector La Brizuela y alrededores (Tomado y modificado de UCO, 2014; Gallego, 2013).....	40
Tabla 3. Niveles de terrazas de la Quebrada La Mosca (Tomada y modificada de INGEOMINAS, 2015).	41
Tabla 4. Parámetros escalares de ASM para los datos obtenidos para el sector La Brizuela BZ1, donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelínek, 1977)	49
Tabla 5. Parámetros escalares de ASM para los datos obtenidos para el sector La Brizuela BZ2, donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelínek, 1977)	50

Tabla 6. Parámetros escalares de ASM para los datos obtenidos para el sector La Brizuela BZ3, donde se muestra a L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelínek, 1977).....	51
Tabla 7. Parámetros escalares de ASM de los datos obtenidos para el sector Yarumalito (Techo) donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelínek, 1977).....	59
Tabla 8. Parámetros escalares de ASM de los datos obtenidos para el sector Yarumalito (piso) donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelínek, 1977).....	59
Tabla 9. Parámetros escalares de ASM de los datos obtenidos para el sector La Tablaza, donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelínek, 1977).....	65
Tabla 10. Parámetros escalares de ASM de los datos obtenidos para el sector La Caimana, donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelínek, 1977).....	71

1. INTRODUCCIÓN

La evolución geológica del Valle de Aburrá (VA) ha constituido por años un tema de continuo debate (p.e. Scheibe, 1919; Botero, 1963; Ochoa, 1974; Schlemmon, 1979; Hermelín, 1977, 1984; James, 1982; Toro y Velásquez 1984; Restrepo y Toussaint, 1984; Palacio, 1987; Salinas, 1988; Arias, 1996; Rendón, 1999, 2003; Naranjo, 2001; Aristizábal et al., 2004; Rendón et al., 2006; García, 2006; Aristizábal et al., 2008), particularmente por ser un valle encajado entre altiplanos y por estar delimitado en el extremo occidental por sistemas de fallas regionales correspondientes a la zona de deformación de Romeral (p.e. Ego, 1996; Chicangana, 2005; Vinasco y Cordani, 2012; Vinasco, 2019) y en el extremo oriental por cuerpos graníticos de extensión regional como el batolito Antioqueño (p.e. Botero, 1963; Feininger y Botero, 1982; Londoño, 1998; Ordoñez et al, 2007; Ordoñez y Pimentel, 2001; Duque et al, 2019; Almeida y Villamizar, 2012; Álvarez, 1983)

Muchos de estos trabajos plantean la importancia del estudio de los depósitos que se encuentran a lo largo del VA para poder entender el origen del mismo. El problema radica en que son pocos los datos cronológicos (Restrepo, 1991; Toro, 1999; Rendón et al., 2005) y geofísicos (Lüschen et al., 1984; Rendón 2003) que permitan establecer una correlación completa entre los depósitos, la paleo-topografía del VA y las relaciones espaciales del mismo con los relieves adyacentes, con el fin de proponer hipótesis más robustas sobre el proceso evolutivo del VA.

Estudios como el de Rendón (2003), plantea que el VA corresponde a un conjunto de cuencas de origen tectónico con diversos tipos de rellenos sedimentarios que marcan una historia acoplada entre eventos de levantamiento tectónico y fases de erosión, sedimentación y reorganización del paisaje.

El presente proyecto, pretende contribuir al entendimiento del comportamiento reciente de las fallas geológicas que rodean el VA, particularmente en la zona de influencia de la falla La Mosca (oriente Antioqueño) con continuidad con el sistema de fallas de Belmira (Rendón, 2003) y a lo largo de la zona de deformación de Romeral (occidente del VA), donde los desplazamientos a lo

largo de estas estructuras, produjeron los espacios de acomodación, en los cuales se acumularon diversos tipos de depósitos (Rendón, 2003). Algunos de estos depósitos posteriormente fueron deformados debido a la reactivación de las fallas anteriormente citadas, asociadas a las fases finales de la orogenia Andina, marcando así un registro de deformación neotectónica (p.e. Woodward-Clyde Consultants, 1980; Integral, 1982; Rendón, 2003; Rendón-Rivera et al., 2015).

Los sitios de interés neotectónico reportados en el VA y sus alrededores (p.e. Woodward-Clyde Consultants, 1980; Integral, 1982; Rendón, 2003; Rendón-Rivera et al., 2015), se convierten en lugares clave para la aplicación de técnicas geomorfológicas, estratigráficas y de análisis de la anisotropía de susceptibilidad magnética. Esto nos llevó a proponer las siguientes **preguntas de investigación**: (i) ¿Cuál es la expresión morfotectónica de las fallas cubiertas por depósitos cuaternarios en los lugares de interés neotectónico del VA y alrededores? ii) ¿El método de Anisotropía de Susceptibilidad Magnética (ASM) se puede convertir en un proxy para determinar la deformación en los sitios mencionados? Y iii) Si la respuesta de ASM es relevante, ¿Cómo se relacionan los elipsoides de deformación encontrados con los modelos tectónico-erosivos existentes en el VA?

De acuerdo con lo anterior, en el presente proyecto de investigación partimos de la **hipótesis** de que la aplicación del método de ASM en depósitos cuaternarios deformados del Valle de Aburrá, se convierte en una técnica de aproximación confiable que permitirá documentar los elipsoides de deformación y estimar los campos de esfuerzos actuales a lo largo de fallas con desplazamiento recientes, arrojando información de gran relevancia para la evaluación de la amenaza sísmica del Valle de Aburrá.

El **objetivo general** planteado se centra entonces en caracterizar por medio de ASM, la fábrica magnética y los elipsoides de deformación de depósitos cuaternarios deformados, asociados a la falla La Mosca (oriente del VA) y a la zona de deformación de Romeral (Occidente del VA), para el entendimiento de la actividad neotectónica en el Valle de Aburrá y sus alrededores. Para el logro de este objetivo se plantearon los siguientes **objetivos específicos**: 1) Conformar una Geodatabase

para el análisis morfotectónico de los sitios de interés Neotectónico en el VA y sus alrededores. 2) Caracterizar por medio de ASM los elipsoides de formación en depósitos localizados al Este y Oeste del Valle de Aburrá. 3) Integrar los resultados de los análisis de ASM con los datos estructurales de las fallas locales cada sitio analizado, para discutirlos a la luz de los modelos de evolución tectónico-erosivo existentes para el valle de Aburrá.

En general, se pudo concluir que el análisis de ASM arrojó un tipo de fábrica magnética de tipo Tectónica tipo IV para el Oeste e intermedia tipo III para el Este, asociado a susceptibilidades magnéticas bajas (entre un rango de 400 a 600E-06SI para la zona Oeste y 20 a 50E-06SI para la zona Este), debido a los pocos minerales magnéticos de los depósitos (principalmente filosilicatos y silicatos paramagnéticos, en algunos sectores con presencia de yeso asociado a hierro ferrico). Las formas oblatas, la distribución de los K, indicaron resultados similares al Este y Oeste del VA, indicando que en general la zona de estudio está controlada por el mismo campo de esfuerzos, en dirección NW-SE, como ha sido propuesto por Rendón, 2003. Coherente con un modelo tectónico-erosivo (Arbeláez, 2019)

2. MARCO GEODINÁMICO Y GEOLOGÍA REGIONAL

En los Andes Colombianos, la distribución de los campos de esfuerzos, al igual que las cuencas tectónicas, las cadenas de montañas y la cinemática de los grandes sistemas de fallas son controlados por la triple interacción entre las placas Nazca, Caribe y Suramérica y las microplacas Panamá-Chocó y el Bloque Andino (Cortés y Angelier, 2005) (Figura 1). Las placas Nazca y Caribe subduce debajo del bloque Norandino. Nazca subduce en dirección ENE a E-W con una tasa de movimiento de 54 mm/año relativa a la parte estable de Sudamérica, Caribe subduce en dirección SE con una tasa de movimiento de 20 mm/año relativo al mismo marco de referencia, La zona de estudio está principalmente bajo el régimen de esfuerzo de Nazca, la cual subduce con un *plunge* aproximado de 35° (Kirby 2006; Noquet et al., 2014; p.e. Posada et al., 2017; Mora-Paez et al., 2019).

El bloque Norandino se encuentra fisiográficamente segmentado en tres cordilleras: Occidental, Central y Oriental. En el caso específico de la Cordillera Central donde se encuentra localizado el área de estudio del presente proyecto (Figura 2), el basamento está compuesto por rocas metamórficas paleozoicas del Complejo Cajamarca (conformado por las rocas metamórficas de Ayurá-Montebello) en contacto fallado con el Complejo Quebradagrande localizados al Este y Oeste de la falla Romeral respectivamente, hacia Occidente, se observa nuevamente un cinturón metamórfico en contacto fallado con el Complejo Quebradagrande que a nivel regional se conoce como el Complejo Arquía (e. g., Sillitoe et al., 1982; Aspden et al., 1987; Restrepo-Pace, 1992; Cediél et al., 2003). Esta zona, ha sido ampliamente intruida por una serie de plutones del Pérmico-Tríasicos (p.e. Granito de Palmitas, ver Cediél et al., 2003 y referencias allí citadas), intrusivos jurásicos (e.g. Batolitos de Sonsón e Ibagué, Cediél et al., 2003), intrusivos Cretácicos (e.g. Batolito Antioqueño). Hacia el Cenozoico, se desarrollaron espacios de acomodación que permitieron la depositación de los sedimentos siliciclásticos de la Formación Amagá (miembros inferior y superior), con el desarrollo de estratos de carbón económicamente explotables. La cuenca Amagá, limitada al Este por la falla Romeral y al Oeste por la Falla Cauca, se generó en un ambiente de cuencas de tracción (Sierra and Marín-Cerón, 2011), las cuales fue ampliamente disturbadas por el vulcanismo del Mioceno (Formación Combia) el cual se extendió hasta al menos hace 6 M.a. (Marín-Cerón et al, 2019). Un nuevo episodio de pequeñas cuencas de tracción fue desarrollado entre 6-3 M.a. (e.g. Cuenca Irra) y posteriormente, la Cordillera Central se ha visto disturbada por el magmatismo actual (3 M.a hasta el presente, Marín-Cerón et al, 2019). Durante este periodo, se han reportado el desarrollo de cuencas de tipo pull-apart que dieron origen a valles interandinos (p.e. Valle de Aburrá, Rendón 2003). Para el caso específico del Valle de Aburrá, una serie de deslizamientos se han generado rellenando y modificando la morfología del Valle (Aristizábal, E., & Yokota, S. (2006) (Figura 3 y 4).

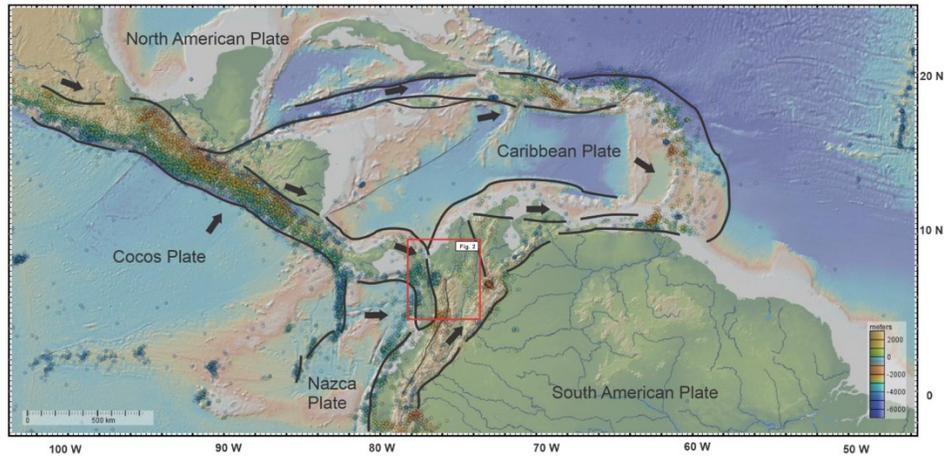


Figura 1. Mapa del contexto geodinámico de los Andes Colombianos (Tomada de Noriega, S. Documento en preparación)

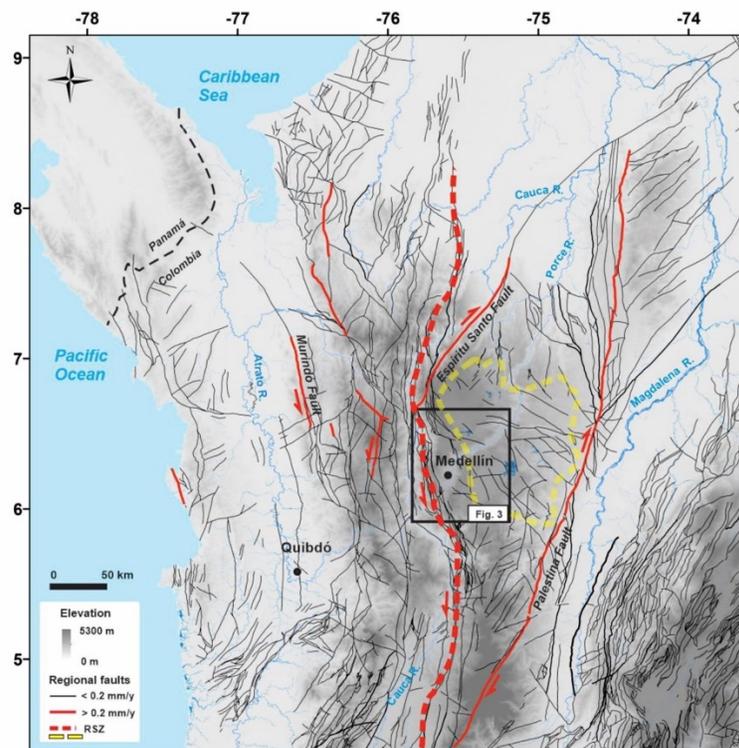


Figura 2. Localización regional del Valle de Aburrá, indicando las fallas regionales (Línea rojas) y la distribución espacial del Batolito Antioqueño (Línea punteada amarilla), (Tomada de Noriega, S. Documento en preparación)

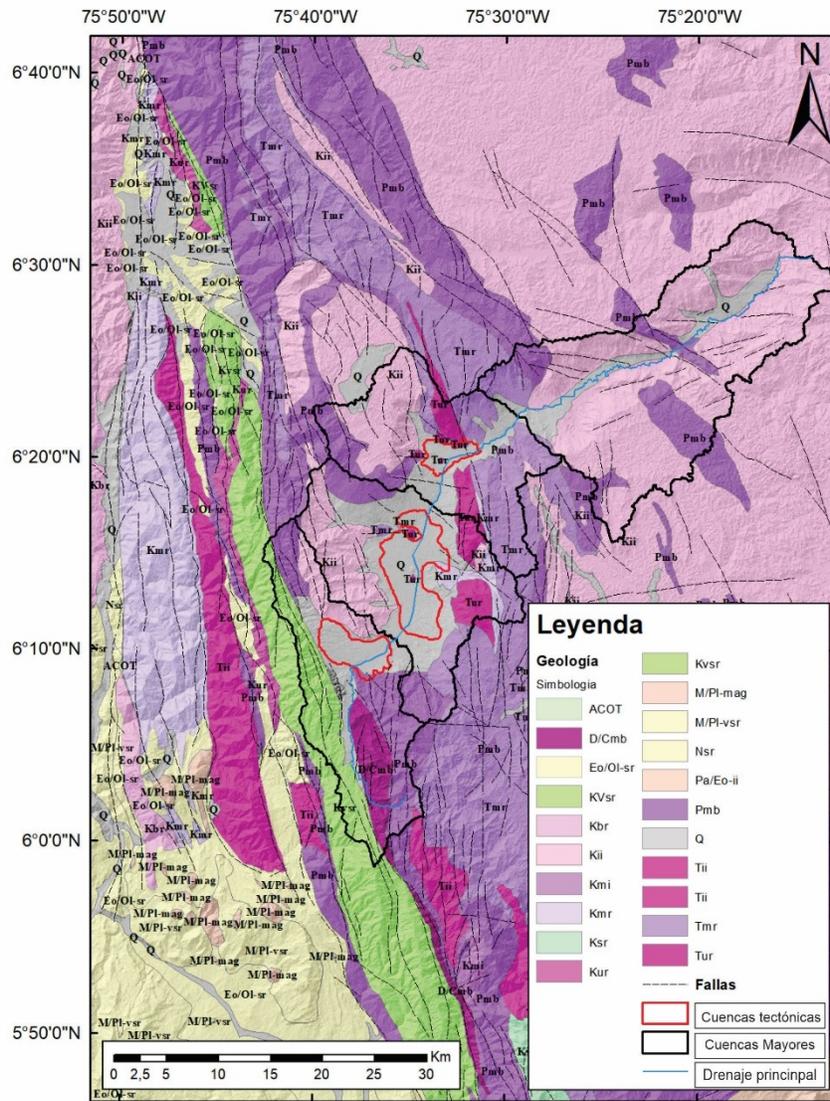


Figura 3. Mapa geológico estructural del área de estudio (Elaboración propia basado en información de CartoAntioquia, Rendón, 2003). Terreno acrecionado del océano Caribe (ACOT), Basamento metamórfico Devonico/carbonífero (D/Cmb), Rocas sedimentarias Oligoceno (Eo/Oi-sr), Rocas basálticas (Kbr), Rocas ultramáficas (Kii) Rocas metamórficas (Kmr), Rocas intrusivas (KvSr), Rocas magmáticas Plioceno (M/Pi-mag), Rocas sedimentarias Neogeno (NSr); Baasamento metamórfico (Pmb), Depositos cuaternarios (Q), Rocas Triasico intrusivas (Tii), Basamento metamórfico Paleozoico (Tmr); Rocas ultramáficas Triasico (Tur).

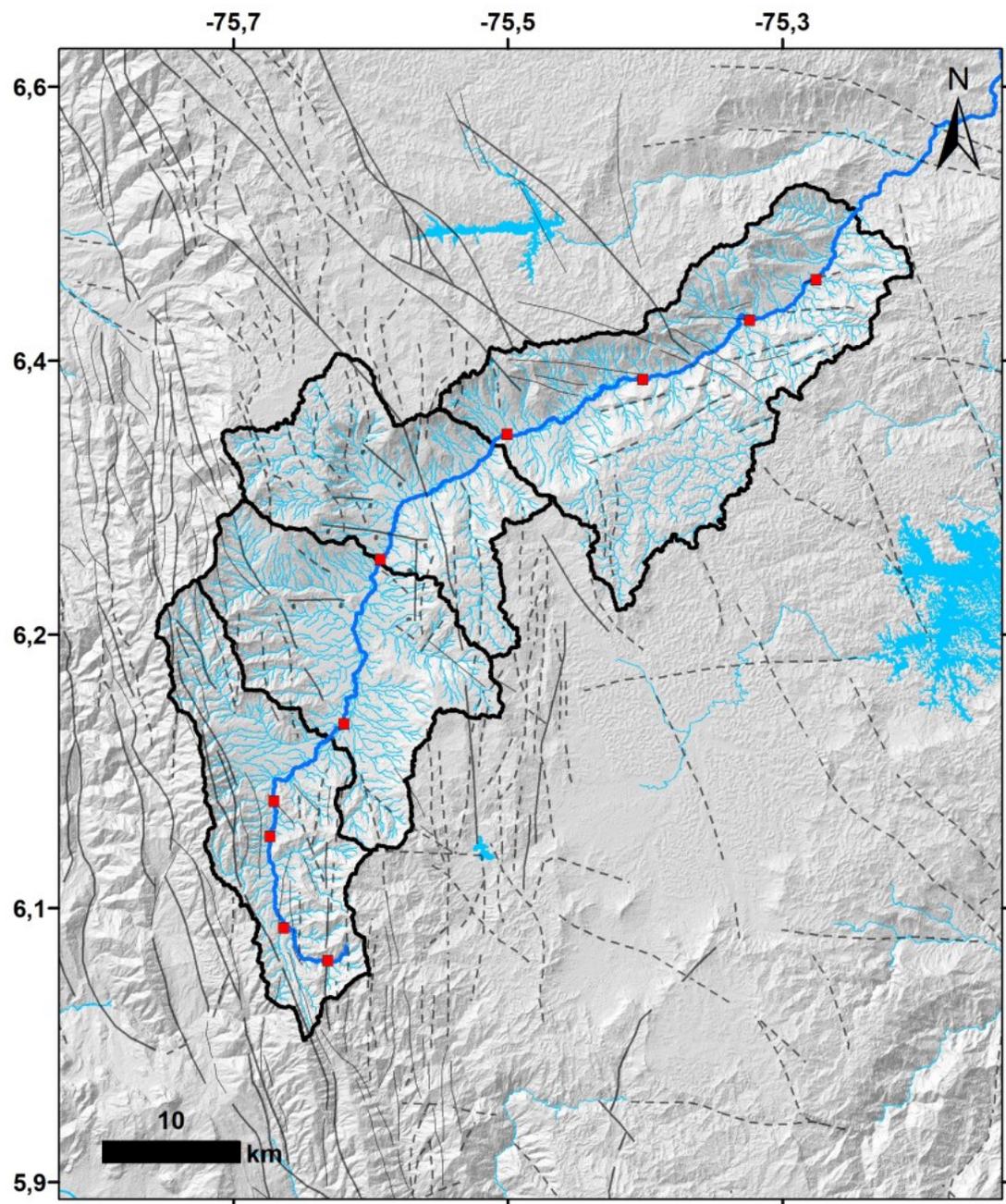


Figura 4. Localización del Valle de Aburrá asociado a las cuencas presentes en la zona.

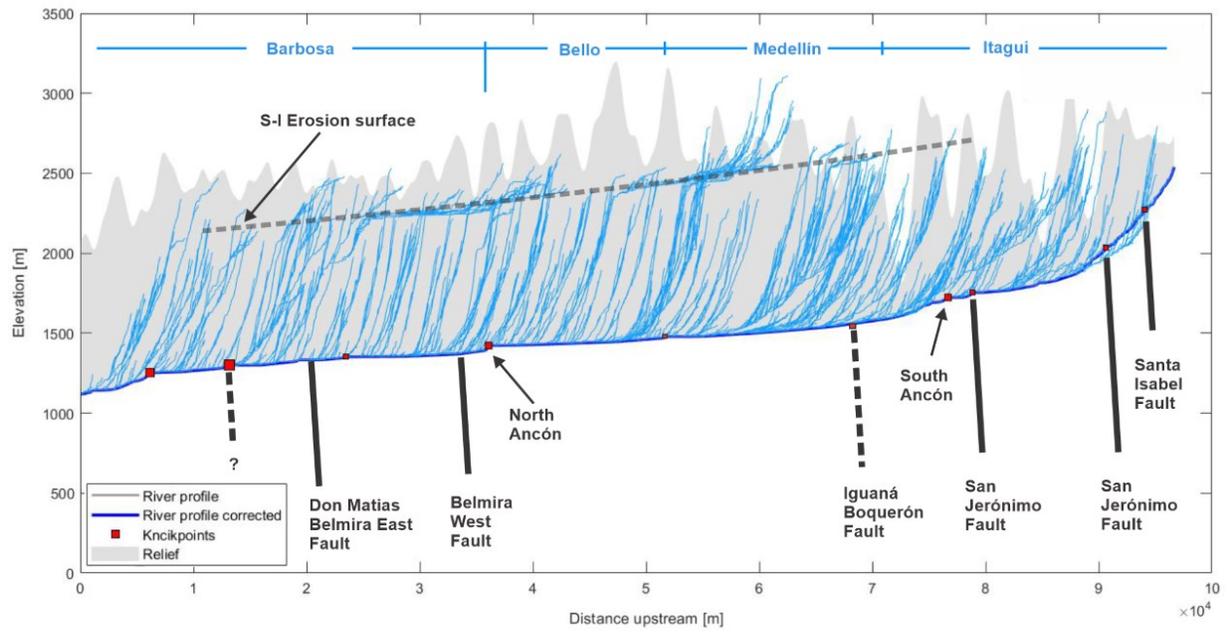


Figura 5. Perfil de las cuencas asociadas al Valle de Aburrá (Noriega, S. Artículo en publicación).

3. MODELOS DE FORMACIÓN DEL VALLE DE ABURRÁ

Uno de los primeros intentos por explicar la formación del VA, fue realizado por Scheibe (1919), quien propuso que el desnivel entre los altiplanos y el nivel del Río Aburrá fue generado por ser un valle meramente erosivo. Posteriormente, Ochoa (1974) planteó la hipótesis de un valle glacial, pero sería descartada rápidamente por otros autores luego de encontrar nuevas evidencias (p.e. tectónicas, climáticas, etc). En la década de los 70's, Hermelin (1977, 1978), realizó una primera aproximación al hablar de un origen tectónico para el valle, a partir de la comparación con otros valles de igual magnitud en la Cordillera Central, sin embargo, sus planteamientos sugerían la ocurrencia de un graben tectónico con poca influencia de procesos erosivos. Características como la fisiografía del valle, escarpes marcados en las vertientes, escalonamientos de las laderas y el fuerte cambio en la dirección de los drenajes, fueron algunos de los parámetros utilizados para apoyar dicha hipótesis. Luego, Hermelin (1984) realizó una compilación de las hipótesis planteadas hasta ese momento y sugirió un origen mixto para su formación, en el que los procesos erosivos fueron generados como respuesta a los eventos tectónicos. Posteriormente, Toro y Velásquez (1984), plantearon movimientos sinestrales de las fallas N-S asociadas al Sistema de Fallas Romeral en el sector occidental del VA, las cuales permitían postular la hipótesis de un graben en el sector suroccidental del valle.

Hacia el año 2000, Arias (2003) definió el VA desde el punto de vista morfológico, como: “una depresión con orientación sur-norte de fondo plano, ubicada en la parte alta de la Cordillera Central, limitada lateralmente con laderas inclinadas en roca y en la parte baja cubierta por flujo de lodos. El interior del valle es caracterizado por terrazas, llanuras aluviales a lo largo del río Medellín y depósitos aluvio-torrenciales que forman abanicos a lo largo de sus principales tributarios. Este autor, también identifica que los antiguos altiplanos, fueron desarrollados en tres generaciones de superficies de erosión. Estos dos rasgos geomorfológicos principales, han sido interpretados como la presencia de relieves subaéreos antiguos (30-40 M.a) y la presencia de relieves adyacentes con morfologías contrastantes de cañones, que segmentan los altiplanos (Arias, 1996). A nivel geomorfológico el VA se puede dividir en dos macrounidades: superficies de erosión y escarpes de erosión regionales (Figura 6).

Las superficies de erosión, se encuentran oscilando en alturas que van desde 1800 a 3300 m, están distribuidas básicamente hacia el este y oeste del VA con un área promedio de 800 km² (Rendón, 2003). Hacia el Este, las superficies están cubiertas por la Formación La Honda y La Formación Mesa, extendiéndose hacia el Valle del Magdalena (Rendón, 2003). Las superficies (S), se han clasificado en pre S-I (alturas >3000 m), S-I (3000 a 2500 m) y S-II (altura media de 2200m).

La superficie de erosión S-I (Santa Rosa- La Unión), presenta unidades geomorfológicas como colinas bajas y valles lisos y suaves con una morfología homogénea, la cual se extiende también hacia San Vicente, Guarne y La Unión; se encuentra desarrollada principalmente en rocas graníticas y metamórficas (Rendón, 2003).

La superficie de erosión S-II (Rionegro), presenta pequeñas colinas redondeadas, cimas planas y amplios valles con una presencia significativa de depósitos aluviales en la zona, ocurre principalmente de 200 a 300 m por debajo del S-I y se encuentra principalmente en la parte oriental del alto del VA. Esta superficie de erosión, se encuentra cortando el Complejo polimetamórfico y el Batolito Antioqueño (Rendón, 2003).

En cuanto a la macrounidad de los escarpes regionales, son característicos de las pendientes empinadas que marcan un contraste geomorfológico con las superficies de erosión (Rendón, 2003); el escarpe de San Nicolás se encuentra separando el altiplano de Santa Elena de la superficie de Rionegro, presentando una altura promedio de 400 m (UCO, 2014). La cuenca del Río Cauca es otra unidad característica de valles estrechos y empinados con incisión vertical a lateral, cuyos drenajes corren principalmente de E-W con una dirección secundaria de N-S. Esta se unidad se encuentra en una zona con alta variabilidad litológica controlada por el trend de fallas regional Cauca-Romeral, al cual se le adjudicando actividad neotectónica (Rendón, 2003).

Las superficies de erosión anteriormente mencionadas son para Arias (1996), antiguas superficies de erosión del Terciario Inferior-Medio, que se pueden subdividir temporalmente en: Altiplano antiguo (Páramo de Belmira y Páramo de Sonsón), altiplano intermedio (Santa Rosa de Osos-Rionegro) y Altiplano reciente (Anorí-Amalfi-Carolina-Embalse de peñol), limitados unos de otros mediante los escarpes siendo estos, la generación más joven de los relieves del primer orden (Arias, 1996). Los cañones, según el mismo autor se pueden dividir en: (i). Cañones lineales (de los ríos Nus y Porce), (ii) Cañones ramificados que dan origen a un relieve montañoso.

Estudios sísmicos llevados a cabo por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Microzonificación Sísmica, 2002, 2006), afirman que la región del VA ha constituido una zona tectónicamente activa durante el Cenozoico tardío. Bajo este marco, Rendón (2003) propone que la génesis de la cuenca está relacionada con movimientos relativos de bloques de la corteza, asociados a una cinemática lateral-izquierda de los principales sistemas de falla que se relacionan con la zona de deformación de Romeral y que incluso poseen estructuras a lo largo del valle. Debido a las características documentadas a partir de datos morfotectónicos, geofísicos, y estratigráficos, este autor plantea que el sector superior del Valle de Aburrá corresponde a un conjunto de tres cuencas de tipo “pull-apart”, que se formaron por acción conjunta de procesos tectónicos y erosivos. En ese sentido, Aristizábal (2006) propone que la evolución del VA, ha sido caracterizada por la ocurrencia de numerosos deslizamientos que cubren el valle en forma de depósitos de vertiente que cubren las laderas medias y bajas del valle. Algunos de estos eventos han sido datados como Plioceno (2,4 Ma) por Restrepo (1991), Pleistoceno (0,62 y 0,15 Ma) por Yokota y Ortiz (2003) y Pleistoceno (>40 k.a., 0,19, y 0,22 Ma) por Aristizábal y Yokota (2004).

En el 2006, Rendón et al., presentan y recopilan las dataciones absolutas de depósitos del Valle de Aburrá, de los datos nuevos presenta edades de los depósitos más antiguos (serie I) con una edad posterior a 3.12 Ma (2.6 ± 0.18) y anterior a 1.8 ± 0.13 Ma correspondiente a circones volcánicos embebidos en depósitos de vertiente. Para la serie II obtiene la edad de 1.8 ± 0.13 Ma que coincide con las edades de la muestra 62 de Restrepo (1991) de 1.98 ± 0.42 Ma como con la edad de 2.04 ± 0.12 Ma de Toto (1999). Ambos corresponden a edades de flujo de lodos ubicados en la zona de

Robledo. Aristizábal (2004) obtiene una edad de 0.19 ± 0.02 Ma y 0.22 ± 0.05 Ma para muestras de cenizas de los depósitos de vertiente I y II indicando así que la edad para estos depósitos debe ser mayor a esos valores. Para la serie III se realizó ensayos de C^{14} en turba encontrada en los depósitos, indicando edades de mayores de 40 ka (Aristizábal, 2004). Rendón (2005) indica que Ortiz (2002) reporta edades de depósitos de la serie II proveniente de fragmentos de material tufáceo con edad de 0.62 Ma por trazas de fisión.

Al interior del semillero de investigación en Geología Regional y Geoquímica, Arbeláez (2019) retoma las hipótesis planteadas por Rendón (2003) y Aristizábal y Yokota, (2008) para realizar un análisis comparativo de la morfotectónica del VA, dividiendo el valle en cuatro subcuencas tectónicas desde Caldas hasta Barbosa. Este trabajo permite plantear la hipótesis de que cada subcuenca tectónica, presenta una respuesta morfotectónica diferente, debido a la influencia de las fallas geológicas con desplazamiento lateral izquierdo que las delimitan que las delimitan, el comportamiento reológico de los macizos rocosas. Esto se expresa en características geomorfológicas y estratigráficas diferentes, asociado a una evolución de en independiente, hasta que se produjo un proceso de coalescencia de cuencas debido a la captura fluvial y al ascenso de los frentes de erosión a lo largo del río Porce y el río Medellín, como respuesta a los cambios de nivel base detonados por el levantamiento tectónico.

Hipótesis alternativas se han planteado para la cinemática de las fallas que se encuentran dentro del VA y sus alrededores, donde a partir del análisis poblacional de fallas se sugiere la ocurrencia de fallas dextrales que responde a un tensor de esfuerzos en sentido NE-SW y un tensor secundario en sentido NW-SE, (Mariño y Duque-Trujillo, 2017); sin embargo, la temporalidad de dicho tensor aún no ha sido constreñido.

4. APLICACIONES DE FÁBRICA MAGNÉTICA EN NEOTECTÓNICA

La neotectónica estudia el marco de deformación tectónica actual de una región, con el fin de caracterizar la cinemática y orientación de las fallas activas, es decir, fallas que han registrado desplazamientos en el pasado geológico reciente y que responden a un campo de esfuerzos activo hoy día (Burbank y Anderson, 2011). Durante el desplazamiento de una falla geológica, los minerales y fragmentos ubicados en su zona de influencia pueden ser rotados y reorientados mecánicamente, acomodándose a las condiciones de equilibrio que marcan la dirección de ruptura de la estructura, es decir, como respuesta a su geometría y cinemática (Passchier & Trouw, 2005).

Diferentes aproximaciones como cartografía morfotectónica, análisis sismotectónicos, caracterización de fallas activas y análisis paleosismológicos (Burbank y Anderson, 2011., McCalpin, 2012), han sido propuestas como proxies para el estudio de la actividad neotectónica.

La fábrica magnética, es una aproximación de la manera en que los minerales con propiedades magnéticas se ordenan y orientan en una roca o sedimento. La fábrica magnética a su vez se puede representar como un elipsoide cuyos ejes vienen definidos por los valores de ASM (Levi et al., 2014). La magnitud y orientación de la fábrica magnética asociada a deformación tectónica se puede caracterizar midiendo la ASM de una muestra previamente orientada (Maffione et al., 2012). Se denomina elipsoide oblató a la fábrica magnética que posee un eje vertical pequeño respecto a los ejes horizontales, como es el caso de una partícula tamaño limo o arcilla luego de la sedimentación; mientras que un elipsoide prolato corresponde a una fábrica magnética con elongación preferente en una dimensión, la cual puede estar asociada a deformación tectónica, flujo sedimentario, entre otras (Chadima, 2019; Soto et al., 2009).

ASM es un método usado para el estudio de la fábrica magnética de los minerales (Hrouda et al. 2017). Los datos obtenidos a partir del estudio de técnicas de ASM, representan un proxy para el estudio de deformaciones (Maffione et al. 2011), que permite realizar análisis sobre la neotectónica de un área en específico, la cual se basa en los procesos tectónicos generados a lo largo de la historia geológica (Wu & Hu. 2019). Estos análisis neotectónicos sirven para generar un análisis

estructural y con este generar interpretaciones del movimiento de la corteza en tiempos recientes (Jiang et al. 2010).

Las medidas tomadas de ASM, pueden ser expresadas a partir, de tres ejes máximos de susceptibilidad k_{\max} , k_{int} y k_{\min} dados como (k_1, k_2, k_3) , donde k_{\min} se denomina polo de foliación magnética y k_{\max} , como la línea magnética. La forma del elipsoide, se encuentra relacionada con la fábrica de roca entre L (lineación) y F (foliación) (Arzadun et al, 2018).

Teniendo en cuenta varios parámetros escalares de forma como P_j que mide el grado de anisotropía, o la excentricidad del elipsoide ($1 > P_j > \text{infinito}$) que se encuentra relacionado con el grado de esfericidad; otros de los parámetros importantes, es la susceptibilidad media k_m que está dada por $(k_1+k_2+k_3/3)$, donde su intensidad, se encuentra variando de acuerdo a las proporciones de minerales ferromagnéticos y paramagnéticos (Robion et al., 2007).

La fábrica magnética, se puede clasificar en tres fábricas fundamentales (Robion et al, 2007): (i). fábrica uniaxial plana, que se encuentra caracterizada por el agrupamiento del eje k_3 y una dispersión dada por k_1 y k_2 en un plano normal a k_3 . (ii). La fábrica uniaxial lineal, caracterizado por una dispersión del k_2 y k_3 y un agrupamiento del k_1 . (iii). La fábrica triaxial, que se caracteriza por tres distintos grupos de ejes de anisotropía (Figura 7). La foliación magnética es el plano definido por los ejes k_1 y k_2 y la línea magnética es la dirección del grupo k_1 . En el caso de un tejido triaxial, siendo esta fábrica la más común en rocas sedimentarias (Figura 8)

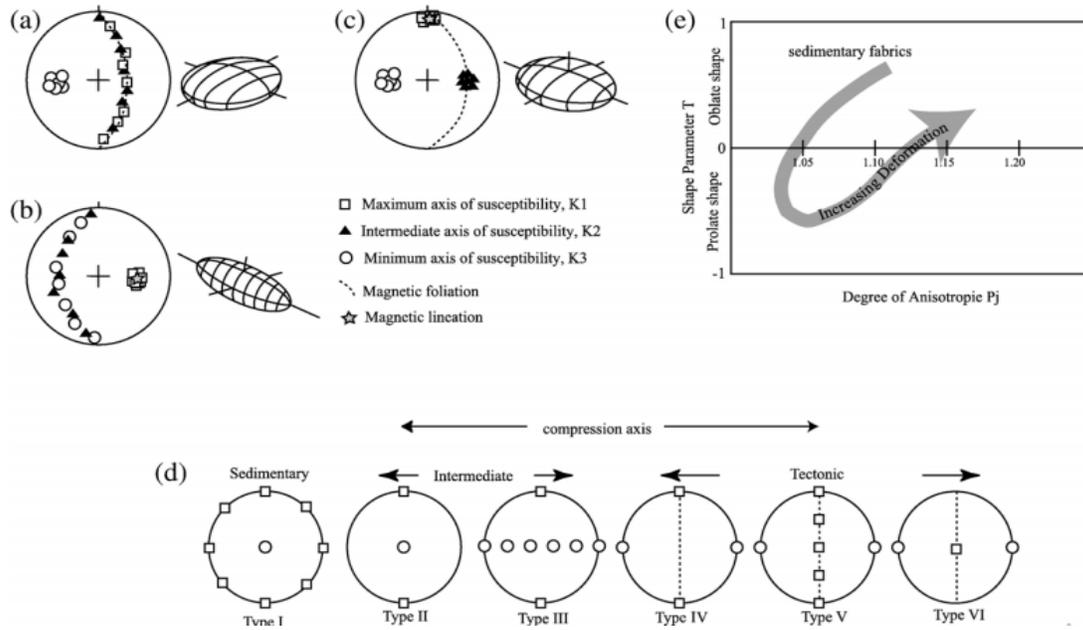


Figura 7. Clasificación de fábricas magnéticas (a) Fábrica uniaxial plana, (b) Fábrica uniaxial lineal, (c) Fabrica triaxial, (d) Secuencia de fábricas magnéticas y (e) Gráfico de rocas deformadas T Vs Pj. Tomado de Robion et al, 2007

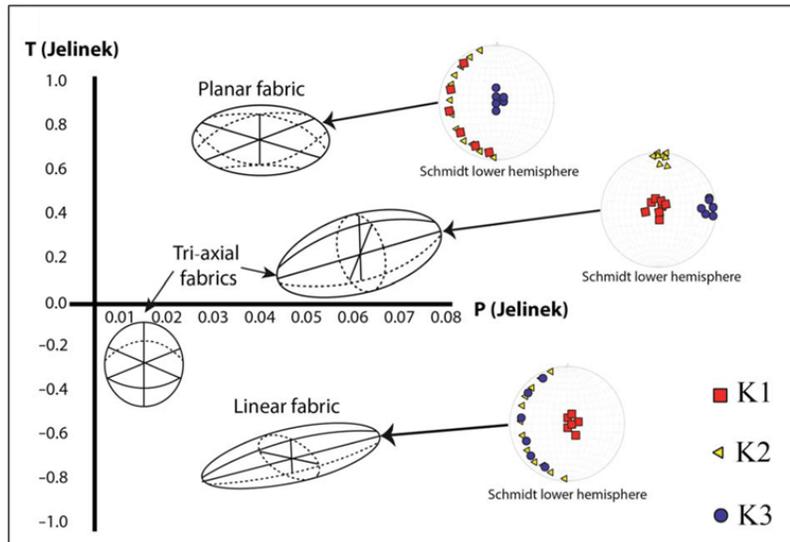


Figura 8. Tipos de fábricas magnéticas asociadas a la distribución de los ejes K1, K2 y K3. Tomado de Burgin et al, 2019

A nivel global, estudios de ASM han sido implementados en los Apeninos del Norte-Italia (Maffione et al. 2011), centro este de México en las ignimbritas del Castillo (Valdivia et al. 2017), en Colombia más específicamente en la formación Zarzal en el Valle del Cauca (Neuwerth et al. 2006) y en Antioquia, en la Formación Amagá (Ramírez et al. 2012) y el granito protomilonítico de Palmitas (Piedrahita et al., 2019).

El presente trabajo, busca aplicar la técnica de ASM en depósitos cuaternarios deformados por fallas activas, como proxy para: i) estimar la fábrica magnética y los elipsoides de deformación de las muestras analizadas, ii) analizar los elipsoides de deformación en relación con la geometría y cinemática de las fallas, y (iii) evaluar los resultados de ASM con los datos de geología estructural y los modelos de evolución tectónico- erosivo del VA.

5. DESARROLLO METODOLÓGICO

El flujograma metodológico para el desarrollo del presente proyecto se sintetiza en la figura 9. En este se hace una aproximación a partir de cada uno de los objetivos propuestos como se describe a continuación:

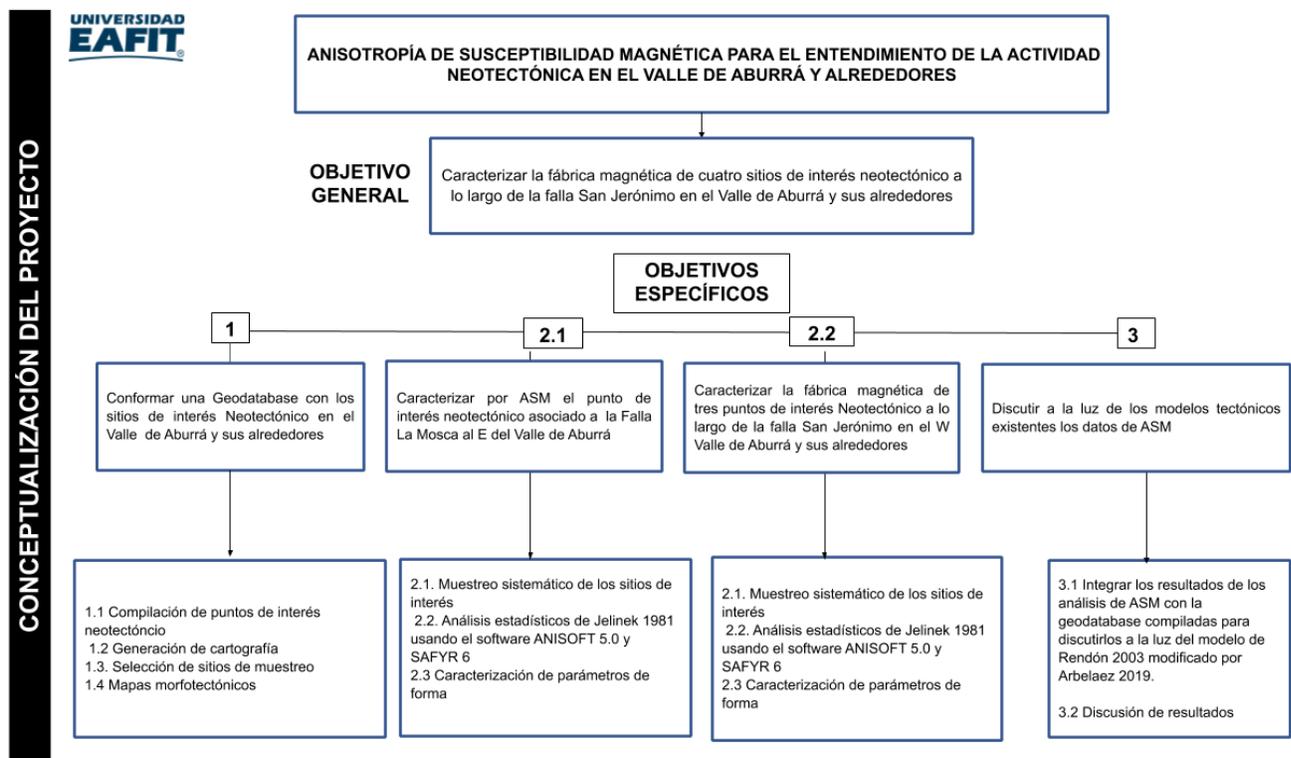


Figura 9. Flujograma metodológico a partir de los objetivos propuestos. Elaboración propia

5.1 Conformación de geodatabase

La conformación de la geodatabase partió de la recolección de información secundaria en el Valle de Aburrá y sus alrededores: geología, geología estructural, geomorfología, geocronología, estratigrafía y estudios de neotectónica, como fuentes de información básica para la identificación de áreas de interés neotectónico. Una vez compilada toda esta información en ArcGis, se procedió a la conformación de una geodatabase, para el trabajo de la información base, a partir de un modelo de elevación digital (DEM) que permitió obtener la información de apoyo para la realización de cartografía base, la delimitación de las fallas tectónicas relacionadas a los puntos de interés para la interpretación, la geomorfología y estratigrafía para la identificación de los depósitos asociados a las fallas principales en estudio y por último una integración que permitió la articulación de los datos para reportar los puntos de interés. El flujograma metodológico para esta fase se describe a continuación en la figura 10.

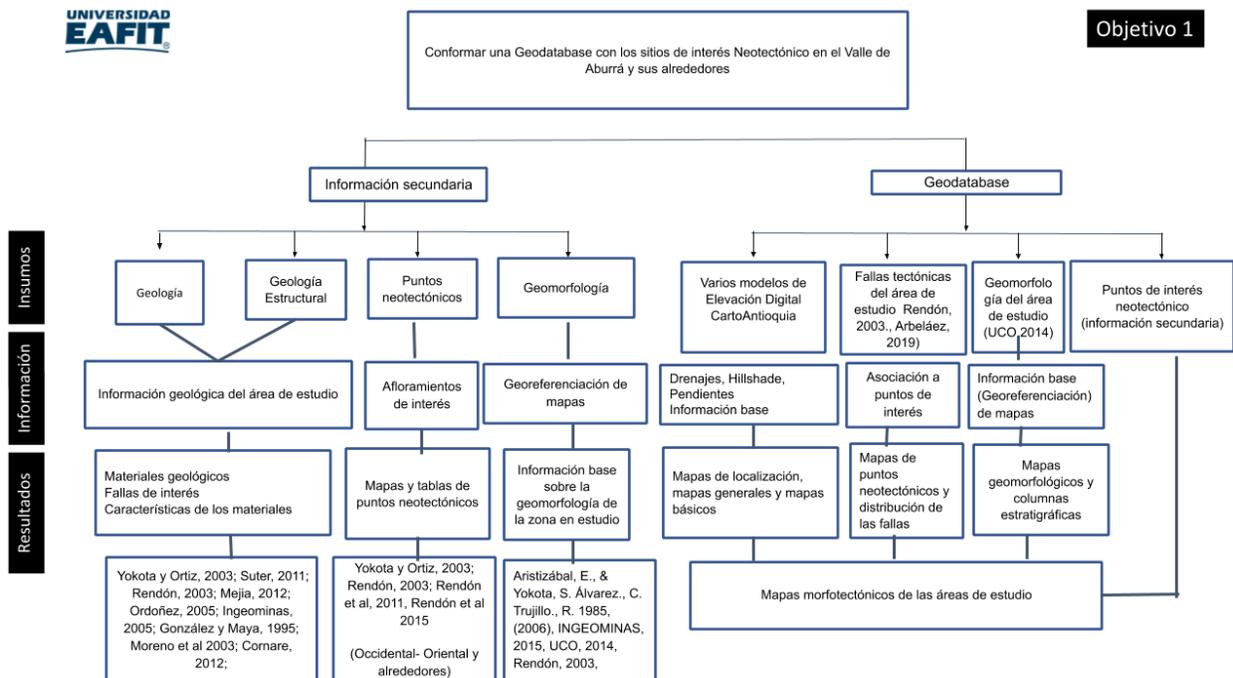


Figura 10. Flujograma de los insumos bases requeridos para la realización de la geodatabase (Elaboración propia).

El Modelo de Elevación Digital del VA se obtuvo a partir del almacenamiento de datos de CartoAntioquia y la cartografía base del área de estudio se adquirió en el geoportal del IGAC y elaboración propia, gracias a los resultados del Proyecto Cartografía de Antioquia (Corantioquia) (IGAC, 2010). La información geomorfológica que se utilizó fue obtenida a partir de estudios realizados por Aristizábal, E., & Yokota, S. Álvarez., C. Trujillo., R. 1985, la Universidad Católica de Oriente (UCO, 2014) e INGEOMINAS 2015, con el objetivo de realizar mapas neotectónicos a escala 1:10.000, con el fin de hacer las correlaciones de los depósitos asociados a los puntos de interés neotectónicos y las fallas principales de la zona (Figuras 14, 26, 28, 30). Toda la información fue manejada mediante el software ArcGis versión 10.5, a partir del cual se realizaron los mapas y los análisis espaciales y la ejecución de la fase de muestreo.

5.2 Análisis de ASM en depósitos recientes del Este y Oeste del Valle de Aburrá y sus alrededores

A partir del marco morfotectónico y geomorfológico local para las zonas de muestreo realizado en la etapa anterior, se procedió al levantamiento de campo y toma de muestras para el análisis de ASM (ver figura 11). Las muestras se colectaron usando cajas de acrílico de 8 cc, siguiendo el protocolo de AGICO (2011), como se observa en la Figura 12. Las orientaciones de cada muestra fueron medidas para luego ser analizadas en el laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad EAFIT usando el equipo Kappabridge MFK1-FB. La construcción del elipsoide de deformación se realizó a partir de un escaneo sistemático de la susceptibilidad magnética bajo 15 orientaciones espaciales diferentes, datos con los cuales se identifican y representan los elipsoides de ASM (Jelinek, 1981) usando el software Safyr 6W y el Anisoft 5.0, el muestreo en esta etapa para los 4 puntos de estudio, se basó en lo expuesto en la Figura 11 y 12. El proceso detallado de campo, datos estructurales, datos de ASM medios, libretas de campo, material fotográfico adicional, se puede observar en los Anexos (1-6).

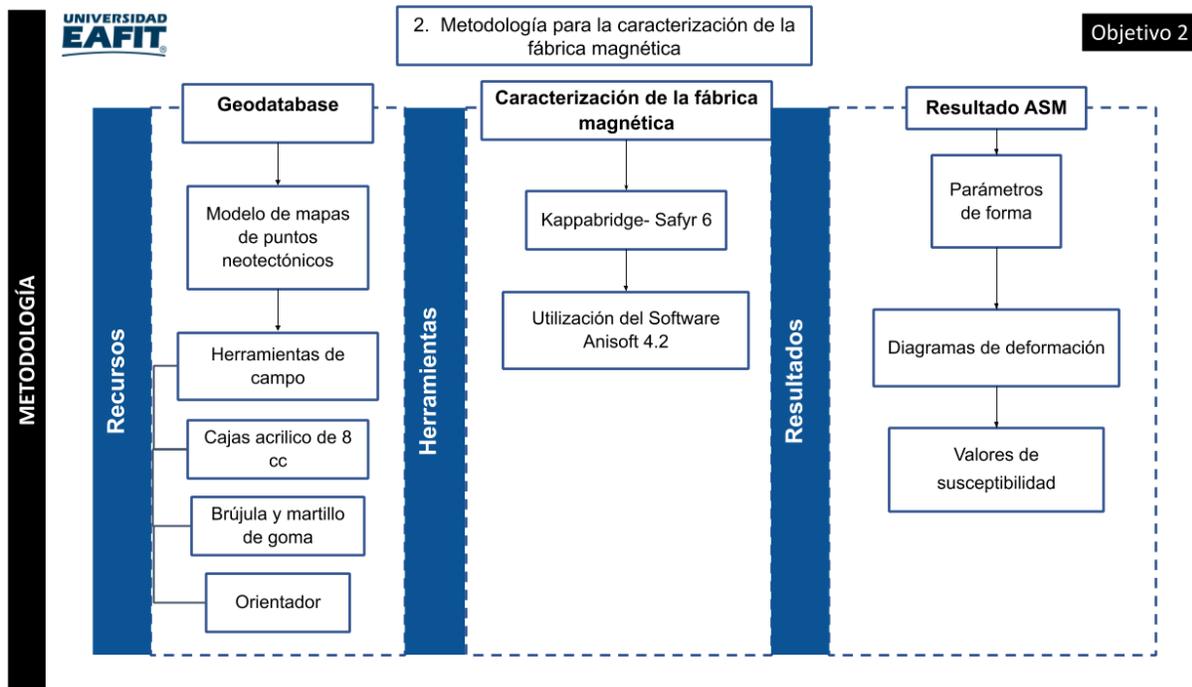


Figura 11. Flujograma de los recursos y herramientas utilizadas en la fase de muestreo y caracterización de elipsoides de deformación usando datos de ASM (Elaboración propia).

El análisis de ASM para las zonas estudiadas (4) al oriente y occidente del Valle de Aburrá estuvieron distribuidas a lo largo de tres fallas: La Mosca al Este, la Falla Cauca Oeste y Falla San Jerónimo Occidente. Se tomaron un total de 56 muestras a lo largo de la estructura principal (Falla La Mosca), 6 muestra para La Tablaza, 15 para Yarumalito y 30 para la Caimana (Falla San Jerónimo – Romeral).

Luego de la etapa de campo, se realizó el procesamiento, utilizando el equipo Kappabridge MFK1-FB existente en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad EAFIT. Para el análisis se utilizó el software Safyr 6 y el Anisoft 5.0, el cual permite obtener diagramas de deformación basada en 15 rotaciones por cada espécimen siguiendo la estadística propuesta por Jelínek (1977), que permite abarcar todas las orientaciones de la muestra, mediante parámetros que describen cuantitativamente el esquema de muestreo P1, P2, P3 y P4 (AGICO, 2011).



Figura 12. Fases del muestreo de campo para el área Oriental y Occidental. (A, B). Identificación y Limpieza del afloramiento. (C). Ubicación de las cajas de acrílico (D). Marcación de las cajas (E, F). Orientación de las muestras y toma de datos estructurales (G). Retiro de las muestras y (H). Medidas del laboratorio

Para la toma de los datos en el laboratorio, se tuvieron en cuenta las siguientes fuentes de variación: Calibración, corrección del titular, temperatura, interferencia con diferentes equipos, manejo de elementos magnéticos y la manipulación de las muestras para disminuir la contaminación de estas. En esta etapa se utiliza la metodología del manual AGICO 2011.

Para el análisis del tipo de fábrica y el tipo de elipsoide de deformación se trabajó con la clasificación de Arzadun et al (2018). La interpretación de la deformación (oblata o prolata), se trabajó según Casas et al. (1998), utilizando los rangos de $-1 < T < 0$ para deformación prolata y de $0 < T < 1$ para oblato.

Para tener conocimiento sobre los valores de grado de anisotropía, se procedió a realizar la clasificación de la misma como baja, media o alta, siguiendo lo propuesto por Rodríguez et al (2012), a partir del análisis de los parámetros escalares usados por el diagrama de Jelinek (T Vs P_j) y Flinn (L Vs F). Los rangos establecidos fueron $P_j < 1.05$ para un grado de anisotropía baja, $1.05 < P_j < 1.1$ para grado de anisotropía media y $P_j > 1.1$ como alta.

Finalmente, los parámetros de forma, los diagramas de deformación y valores de susceptibilidad dados por el muestreo de cada espécimen, se procedió al proceso de interpretación de ASM, a partir de la representación del k_{max} , k_{int} y k_{min} (ejes principales del elipsoide), L (Lineación magnética), F (Factor de forma), P (Grado de anisotropía), P_j (Grado de anisotropía corregido), T (simetría de la forma) y los valores residuales (los cuales representan las desviaciones de los datos medidos y ajustados mediante el método de mínimos cuadrados, en la estadística de Jelínek, 1977).

5.3 Integración de datos

La etapa final del este proyecto, consistió en la integración de los datos obtenidos en campo y en el laboratorio, para proponer una discusión a la luz de los modelos de evolución existentes para el Valle de Aburrá.

6. RESULTADOS

6.1 Inventario de puntos de Interés

Para entender la actividad neotectónica del Valle de Aburrá, se partió de la información compilada en diferentes estudios publicados en la Universidad Nacional de Colombia (Grupo GEA, 2015; Rendón et al, 2011), Gallego 2013 (Zona Oriental del VA) y la zona occidental (WWC, 1979; Toro y Velásquez, 1984; Ortiz y Yokota, 2003; Microzonificación 2006; Martínez, 2012; García, 2013) resumidos en la tabla 1 y mostrados en la figura 13.

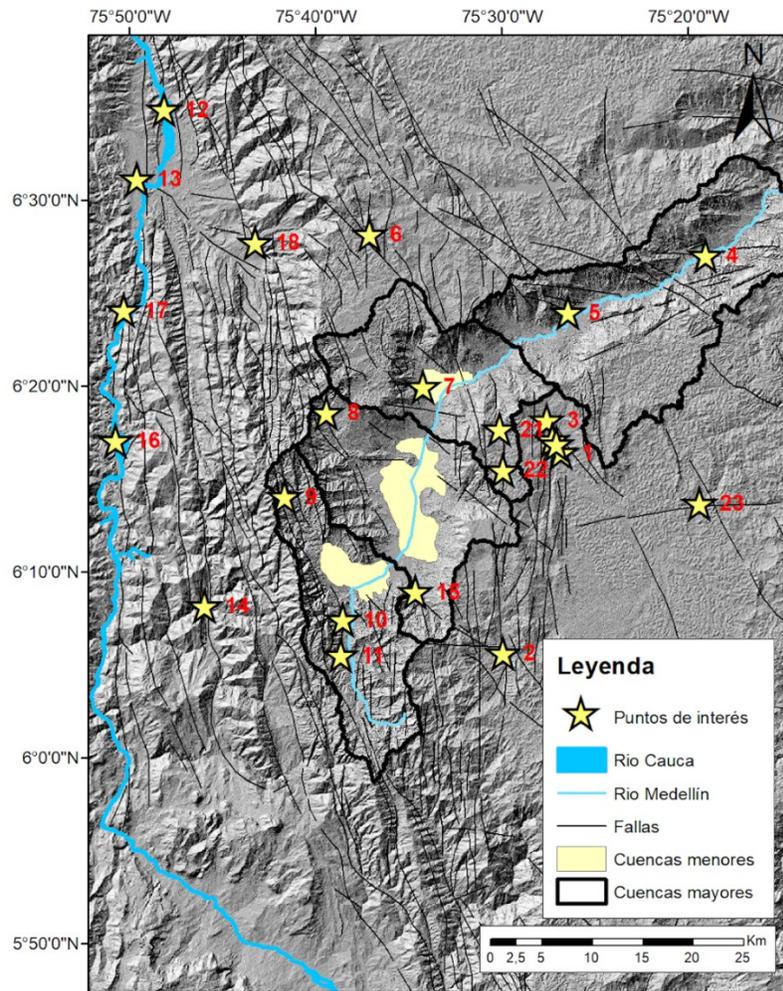


Figura 13. Puntos de interés neotectónico asociados al Valle de Aburrá (Referencias citadas en la tabla 1)

Tabla 1. Puntos de interés neotectónicos del Valle de Aburrá y alrededores

#	Sitio	Falla	Observaciones	Edad de desplazamiento	Referencias	Ubicación respecto al VA
1	Guarne La Brizuela	La Mosca (N30W)	Capas de cenizas volcánicas con fallas y depósitos fluvio-lacustres	Holoceno?	Page and James, 1981; Gallego 2013; Rendón et al., 2015.	Este
2	La Fe	n/n (N80E to N-S)	Faults and joints in deposits older than 40 ky.	Holoceno?	Lalinde 2004; Ingeominas, 2005; Rendón et al 2015.	Sureste
3	Guarne Batea Seca	La Honda (N-S)	Depósitos de pleistoceno con fallas y capas de cenizas	Pleistoceno?	Gallego 2013; Ingeominas 2005; Seismological Group of Medellín 2002.	Este
4	Barbosa	Don Matías (N30-40W)	Flujo de lodos deformados	Pleistoceno?	Integral 1982; Rendón 2003	Noreste
5	Girardota	Belmira W?	Flujo de lodos deformados	Pleistoceno?	Álvarez y Trujillo, 1989	Norte
6	Belmira	Belmira W (N-S to N30-40W)	Buena expresión morfotectónica. Depósitos deformados.	Pleistoceno?	Integral 1982; Rendón 2003	Norte
7	Bello	Calles (N-S)	Flujos de lodos deformados. Depósitos de arcilla diaclasados en la quebrada el Hato con edades 14C de 29.9 ky +/- 1.5 ky	Pleistoceno Tardío	Bustamante and Velásquez, 1984 En Egeo 1984; Estec 1983; Rendón 2003	Norte
8	San Cristóbal	Iguana-Boquerón. (N-S to N15-20W)		Pleistoceno?	Integral S.A. 1998; Rendón 2003	Oeste
9	San Antonio de Prado-Yarumalito	San Jerónimo (N20-30W)	Depósitos de arcilla, limo-arena y conglomerados fallados	Holoceno Tardío	Yokota y Ortiz, 2003; Rendón 2003	Oeste
10	La Estrella-La Tablaza	San Jerónimo (N20-30W)	Depósitos deformados	Pleistoceno?	Toro y Velásquez, 1984; Toro, 1999	Sur

11	San Miguel	San Jerónimo (N10W)	Cenizas volcánicas deformadas en la parte alta de Caldas	Holoceno?	Cuadros 1987; Noreña and Patiño, 1986; de Greiff, 2001	Sur
12	Santa fe de Antioquia- La Caimana	Cauca	Depósitos deformados Quebrada la Caimana	Holoceno?	Mesa, 1999	Noroeste
13	Santa Fe de Antioquia Q. La juanes	Cauca	Abanico aluvial desplazado		Mesa, 1999	Noroeste
14	Armenia/Angelópolis	Graben de las Animas			WWC, 1979	Suroeste
15	Envigado	Ayura? NW	Terrazas desplazadas por fallas NW al norte de Envigado		Toro and Velásquez, 1984	Sur
16	Anzá		Quebrada Niverengo		WWC, 1979	Oeste
17	Anzá-Santa Fe de Antioquia	Cauca W	Quebrada Noque		WWC, 1979; Page and Cline 1981	Oeste
18	San Jerónimo	San Jerónimo		Holoceno?	WWC, 1979; Page and Cline 1981	Noroeste
19	Guarne (Hamburgo)	La Mosca (N30W)	desplazamiento en la secuencia de depósitos de vertiente y capas de cenizas volcánicas.	Holoceno?	Grupos GEA, 2015, Gallego 2013	Este
20	Guarne (El Salado)	La Mosca (N30W)	licuación cosmica en una secuencia de limos y arenas laminada	Holoceno?	Grupos GEA, 2015	Este
21	Piedras Blancas	Falla Acuarela y Rodas	relacionado a algunas geoformas como silletas en dirección N-S		Rendón et al, 2011	Este
22	Santa Elena	Falla La Acuarela y Rodas	Lineamientos N-S		Rendón et al, 2011	Este
23	Salto Abajo		Cambio del comportamiento de Rionegro		Rendón et al, 2011	Este

Se puede observar que existen al menos 23 puntos de interés distribuidos en la zona de estudio del Valle de Aburrá y alrededores (Figura 12). Estos puntos de interés se encuentran ubicados de la siguiente manera, 8 al Este del valle (Puntos 1, 2, 3, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Tabla 1), 8 dentro del valle (Puntos 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11 y 15 de la Tabla 1) distribuidos de Norte a Sur y 7 al Oeste (Puntos 6, 12, 13, 14, 16, 17 y 18). Los sitios más interesantes por su proximidad a las fallas (La Mosca y San Jerónimo), junto con la buena exposición de los afloramientos y las características estratigráficas, nos permitió priorizar en este estudio la toma de las muestras para el análisis de ASM en los sectores Sector la Brizuela (punto 1 en el municipio de Guarne), sectores Yarumalito (punto 9, municipio de Medellín,) La Tablaza (Municipio de la Estrella, punto 9) y la Quebrada La Caimana (Municipio de Santafé de Antioquia), todos localizados al Oeste del Valle de Aburrá en la zona de influencia de las fallas San Jerónimo. El análisis detallado se presenta a continuación.

6.2 Neotectónica al Este del Valle de Aburrá

Para caracterizar el sector Este del Valle de Aburrá mediante la técnica de ASM, se seleccionó el punto 1 de la figura 13, localizados en el sector La Brizuela (coordenadas: 6°16'29.11''N y 75°26'45.80''W), a una altura de 2181 m, ubicado en el Municipio de Guarne (Figura 14).

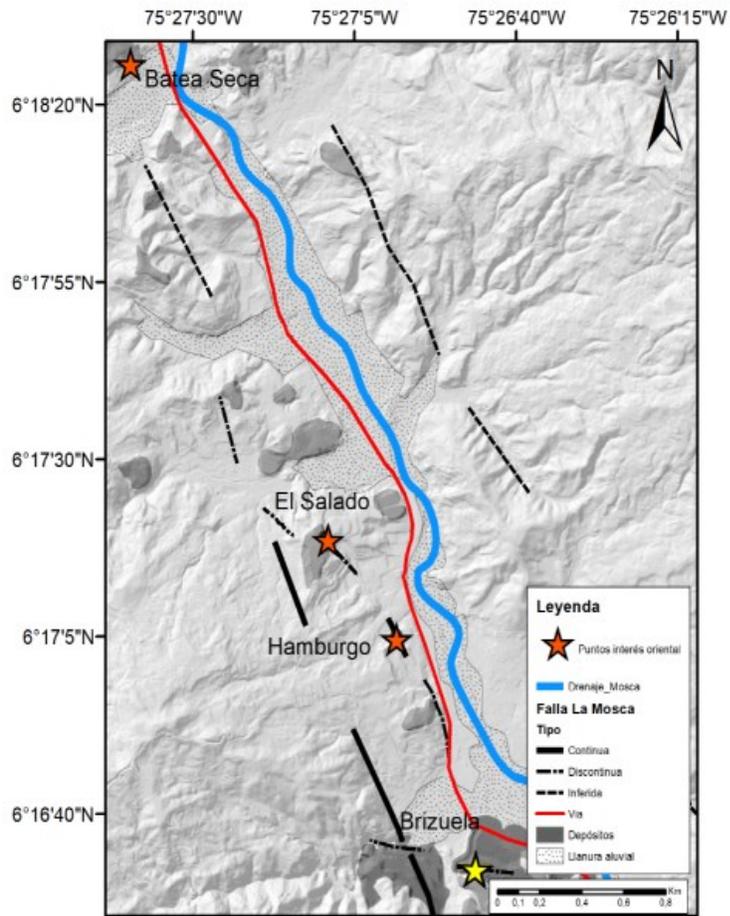


Figura 14. Mapa de interés para el sector La Brizuela (Elaboración propia)

MAPA MORFOTECTÓNICO LA BRIZUELA

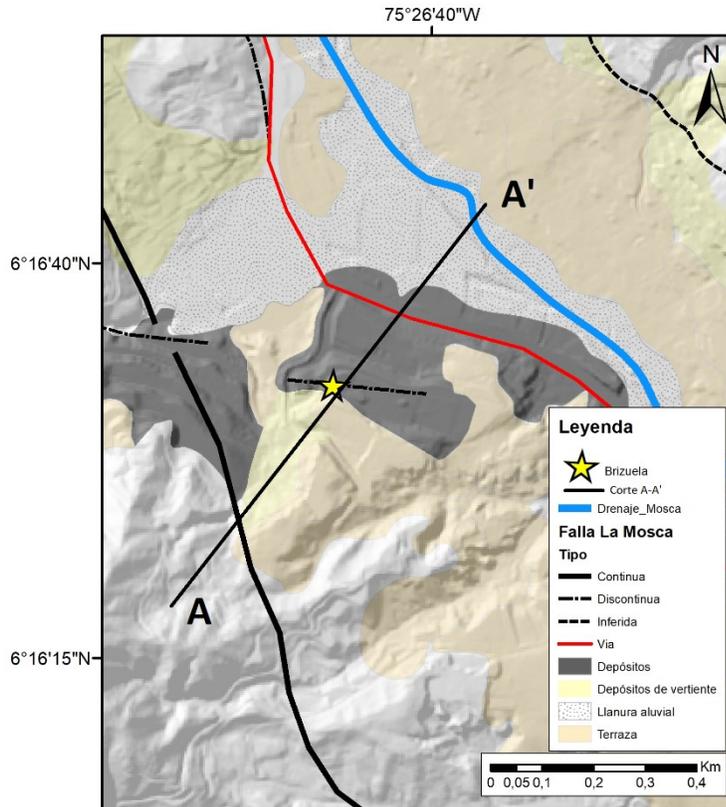


Figura 15. Mapa morfotectónico asociado al punto de La Brizuela (Elaboración propia, a partir de información obtenida por Gallego, 2013 para la identificación de las terrazas).

6.2.1 Sector La Brizuela

La unidad geomorfológica asociada al sector La Brizuela es la terraza (RT7) (Figura 16), esta terraza se relaciona a otros niveles de terrazas, principalmente de tope plano a semiplano (Gallego, 2013). La tabla 2, presenta la correlación entre las terrazas descritas en el trabajo de la UCO (2014) y el trabajo de Gallego (2013). Esta subunidad presenta 4 capas de sedimentos, distribuidas de la siguiente forma: (1) Roca completamente meteorizada, consiste en un material arenoso de

tonalidades marrones con bloques de cuarzo de aproximadamente 3cm de longitud. esta capa presenta una variación en sentido E-W en su granulometría de arcilloso a arenoso, disminuyendo su granulometría hacia el W. (2) Capa arenosa: Se encuentra en contacto gradacional con el material meteorizado, presenta tonalidades amarillentas, el tamaño de los granos de esta capa es media a fina (variación de 2 mm a 1 mm), aumentando el tamaño de grano hacia su base, los granos son subangulares a subredondeados. Se encuentran algunos fragmentos de cuarzo de aproximadamente 2 cm. El espesor de es 60 cm aproximadamente. (3) Capa arcillosa: Material arcilloso de tonalidades grisáceas, de tamaño aproximado de 0.5mm con forma de los granos de redondeadas. Presenta poca humedad esta capa. El espesor es de aproximadamente 60 cm y en algunas zonas se encuentran fragmentos de cuarzo en menor cantidad que las capas anteriores. (4) Capa arcillosa: Material arcilloso de tonalidades grisáceas, aflorante en la zona superior (Figura 17 y 18).

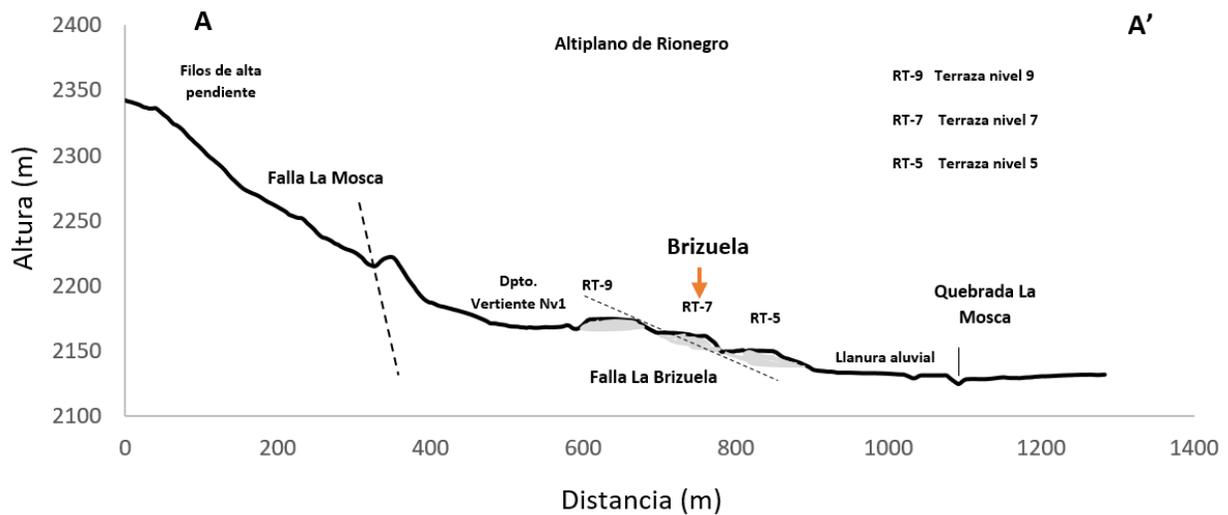


Figura 16. Corte esquemático de las terrazas asociadas al sector La Brizuela, Falla La Brizuela, en dirección N87W, y La Mosca N30W (Elaboración propia)

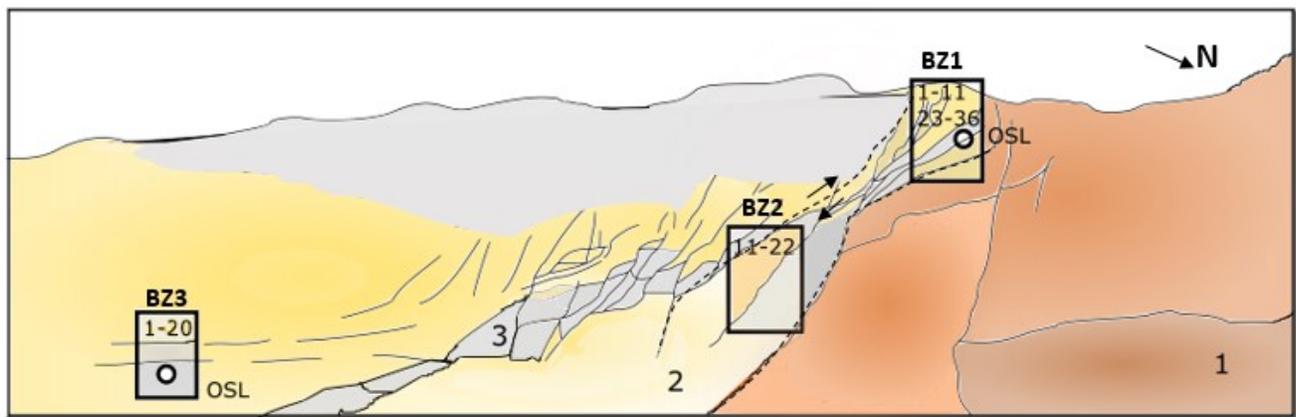
Altiplano y Terraza	Gallego, 2013	Altura	Nombre	Descripción
Altiplano		2000 y 2220 msnm	Altiplano Rionegro	Tiene una pendiente de 15 y 20°, superficie cóncava alargada rellena con depósitos aluviales con una extensión de 170
RT-9	Nivel 7 (Granja Román Gómez):	80-90 m sobre el nivel actual de la Quebrada La Mosca	Terraza La Brizuela Guarne	Son superficies onduladas de terrazas altas formadas por arenas, limos y arcillas.
RT-7	Nivel 7 (Granja Román Gómez):	50-55 m sobre el nivel actual de la Quebrada La Mosca	Terraza Vereda La Laja Rionegro	Son superficies onduladas de terrazas formadas por arenas, limos y arcillas.
RT-5	Nivel 5 (Terraza mina de oro en Guarne)	30-35 m sobre el nivel actual de la Quebrada La Mosca	Terraza La Macarena	Terraza de superficie plana originada por depositación de material en barras puntuales.
Llanura Aluvial		A menos de 2m sobre el nivel actual de la Quebrada La Mosca	Llanura aluvial Quebrada La Mosca	Franja alargada con más de 2km de largo y ancho variable de 60m y 380m

Tabla 2. Descripción de las Subunidades geomorfológicas del sector La Brizuela y alrededores (Tomado y modificado de UCO, 2014; Gallego, 2013).

Esta subunidad, también ha sido descrita y reportada por otros autores como Durango (1975) y Page & James (1981). Durango la clasifica en la Quebrada La Mosca asociada a tres niveles principales (TA, TII y TIII) vistos en la tabla 3, donde la terraza TII está relacionada a 7 estratos principales dentro de los cuales se encuentran saprolito de cuarzodiorita, gravas, arenas y capas de cenizas; donde se encuentra presencia de minerales de hierro como la magnetita a una altura de 30 m sobre la Quebrada La Mosca. otro lado, en la terraza TIII predomina materiales arcillosos y arenosos a 12 m de la Quebrada (INGEOMINAS, 2015). Los depósitos asociados a estas terrazas estarían representados por la presencia de cantos mal seleccionados de cuarzo de rocas intrusivas y rocas metamórficas, con un gran interés económico dada por la explotación para la producción de arcillas y extracción de oro (INGEOMINAS, 2015).

Terraza No Page & James (1981)	Terraza No Durango (1975)	Altura sobre el nivel actual del río (m)	Nombre	Litología
t-3	TII	29	T. mina de oro Guarne	Sobre la quebrada La Mosca paquetes de 2 a 10 m de espesor de gravas cuarzosas oxidadas que suprayace arcillas y limos, disectadas
t-5	TIII	13	T. Coltepunto	Forma una superficie ondulada de 400 m de ancho, compuesta por gravas de cuarzo bien redondeadas de 2-3 m de espesor en arenas amarillo grisáceo, suprayacidas por arenas, limos y arcillas con estratificación cruzada

Tabla 3. Niveles de terrazas de la Quebrada La Mosca (Tomada y modificada de INGEOMINAS, 2015).



LEYENDA

 Material Meteorizado	 Estructura
 Material limo arenoso	 Área de muestreo ASM
 Material arcilloso	
 Material limo arcilloso	

Figura 17. Esquema de estructuras y materiales de La Brizuela (Elaboración propia).

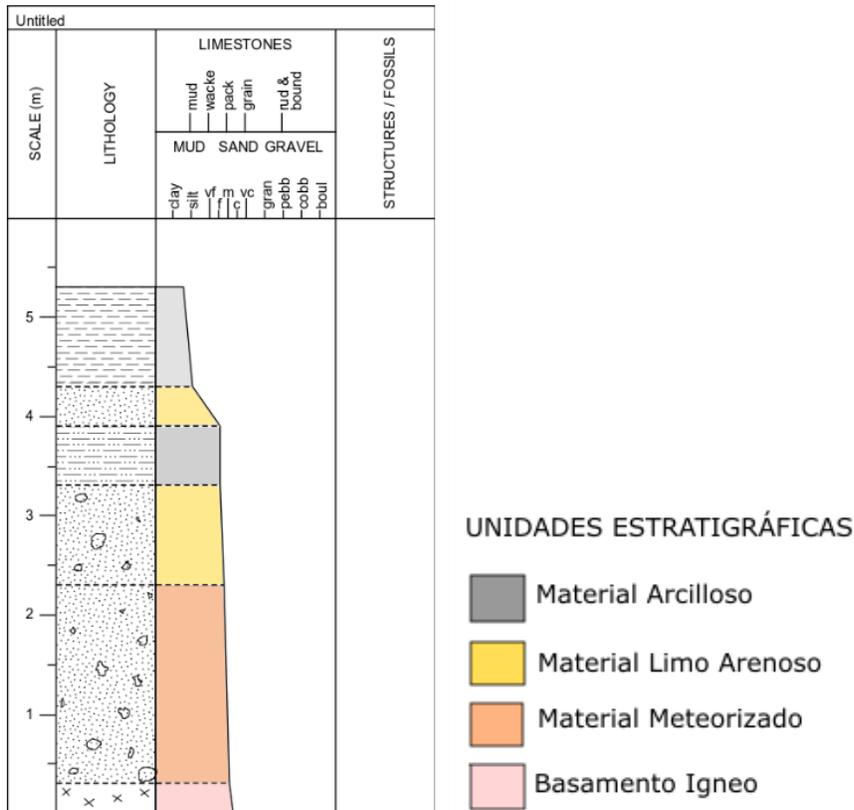


Figura 18. Columna estratigráfica sector La Brizuela

6.2.2 Análisis de ASM en La Brizuela

El estudio de ASM para la zona de La Brizuela fue desarrollado a partir del análisis de 56 muestras distribuidas a lo largo de dos estructuras principales, 24 muestras en la zona superior (de la 1-10 y 23-36) que estaría identificado como el bloque techo, 12 en la zona inferior (11-22) como bloque piso y 20 muestras distribuidas en estratos horizontales encontrado en el área (Figura 19 y Figura 22). Los valores medidos para los tres elipsoides de ASM de cada sitio de muestreo y sus valores de anisotropía, junto con los diferentes parámetros de forma se ilustran en la tabla 4, 5, y 6. El elipsoide que se encuentra representando el bloque techo y los sedimentos horizontales representan una tipología diferente en comparación con el bloque piso del área de estudio. BZ1 y BZ3 se

encuentran representados por un elipsoide triaxial con tres direcciones de deformación bien definidas. Dando valores bajos para la susceptibilidad (Figura 20) para las tres zonas.

Para las muestras BZ1 los K_{max} y K_{int} se encuentra perpendiculares a la estructura principal en estudio (Figura 22), es decir, en una dirección NE-SW y una distribución de los K_{min} hacia la orientación NW-SE. Está representada por un elipsoide triaxial al igual que BZ3 con una deformación tipo oblata (Figura 21). Esta área de estudio, presenta un grado de anisotropía corregido (P_j) bajo, siendo las muestras 2, 4, 5, 8, 9, 10, y 35 los especímenes con mayor grado. Los valores de tensores medios para esta zona, K_{max} de 1.036 con azimut/inclinación (A/I) de 221.4/19.4, K_2 con 1.000 y un (A/I) de 77.2/66.5 y K_3 de 0.964 con un (A/I) de 315/12.7 y un error estándar de 32.88E-06.

Para el área BZ2 se muestra una diferencia respecto a las distribuciones de los ejes de susceptibilidad en comparación a las otras dos áreas en estudio, en esta zona es posible identificar una foliación magnética, dada por el agrupamiento de los k_{int} y k_{min} hacia la dirección de la estructura principal NW-SE con una posible fábrica magnética intermedia tipo III. El elipsoide de esta zona es tipo prolato (predominio de prolato sobre oblato). El grado de anisotropía magnética corregido (P_j) se encuentran en un rango alto, siendo los especímenes 12,14,15,17,18 y 19 los que más presentan deformación. (Tabla 5). Los valores de los tensores medios para esta zona son: K_{max} de 1.078 con azimut/inclinación (A/I) de 234/3.9, K_2 con 0.980 y un (A/I) de 134/67.5 y K_3 de 0.943 con un (A/I) de 325/22.1, con un error estándar de 102.4E-06.

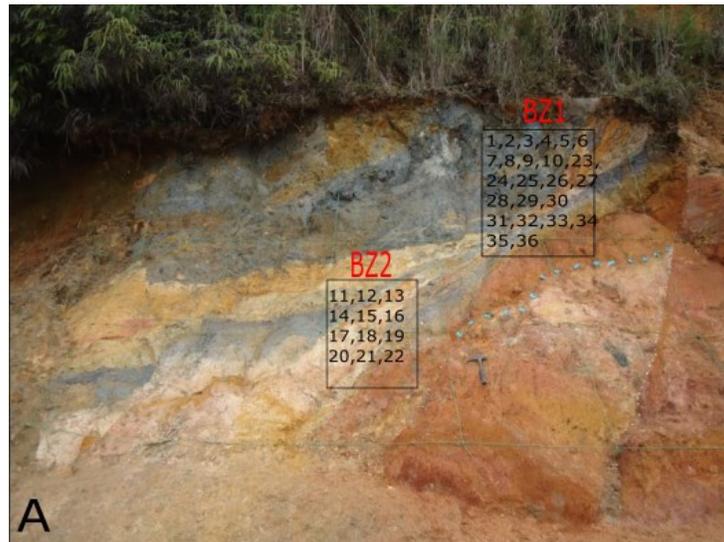


Figura 19. Distribución de las muestras para el análisis de ASM. (A). La Brizuela sectores BZ1 y BZ2. (B) Distribución para BZ3 y (C). Muestreo general para toma de muestras ASM (Fotos tomadas en campo)

Por último, el área BZ3 que corresponde a los datos obtenidos para sedimentos horizontales sin alguna deformación, arrojan como resultado una distribución del k_{max} y k_{int} una tendencia hacia la orientación N-S en su máxima acumulación con una distribución de los K_{min} de E-W principalmente. Esta zona de estudio al igual que la zona BZ1 corresponde a una deformación oblata con elipsoide triaxial. El grado de anisotropía corregido (P_j) para esta área es baja. Que verifica la baja deformación ya que estos sedimentos no eran afectados directamente por la falla. (Tabla 6). Los valores de los tensores medios son: K_{max} de 1.009 con azimuth/inclinación (A/I) de 181.8/40.4, K_2 con 1.004 y un (A/I) de 10.5/49.3 y K_3 de 0.986 con un (A/I) de 275/4.3, con un error estándar de 48.12E-06

En términos generales, en el sector La Brizuela se encuentra un predominio principal de una fábrica triaxial, con deformación oblata, según lo analizado para los diagramas de Flinn y Jelinek (Figura 21) donde los ejes (k_{max} , k_{int} y k_{min}) se enmarcan definitivamente entre las direcciones SW para K_{max} , NE para K_{int} y NW para K_{min} encontrando solo un sistema de direcciones variantes para BZ2 la cual, se asocia al muestreo de los datos, dado por la distribución de las muestras, ya que estuvieron dispersas a lo largo de la estructura principal, lo cual, puede arrojar una tendencia sobre la orientación de la fábrica y los minerales susceptibles. Con base en los datos obtenidos, se infiere que el grado de deformación de La Brizuela se encuentra entre un rango similar, incluso comparado con los datos de la muestra de los sedimentos que no están cercanos a la falla y están en posición horizontal, presentando todos en general elipsoides de deformación triaxiales (Figura 22). Los valores de tensores medios están dados por K_{max} de 1.036 con azimuth/inclinación (A/I) de 221/19.4, K_2 con 1.000 y un (A/I) de 77.2/66.5 y K_3 de 0.964 con un (A/I) de 315/12.1, con un error estándar de 77.98E-06 (Ver Anexo 4).

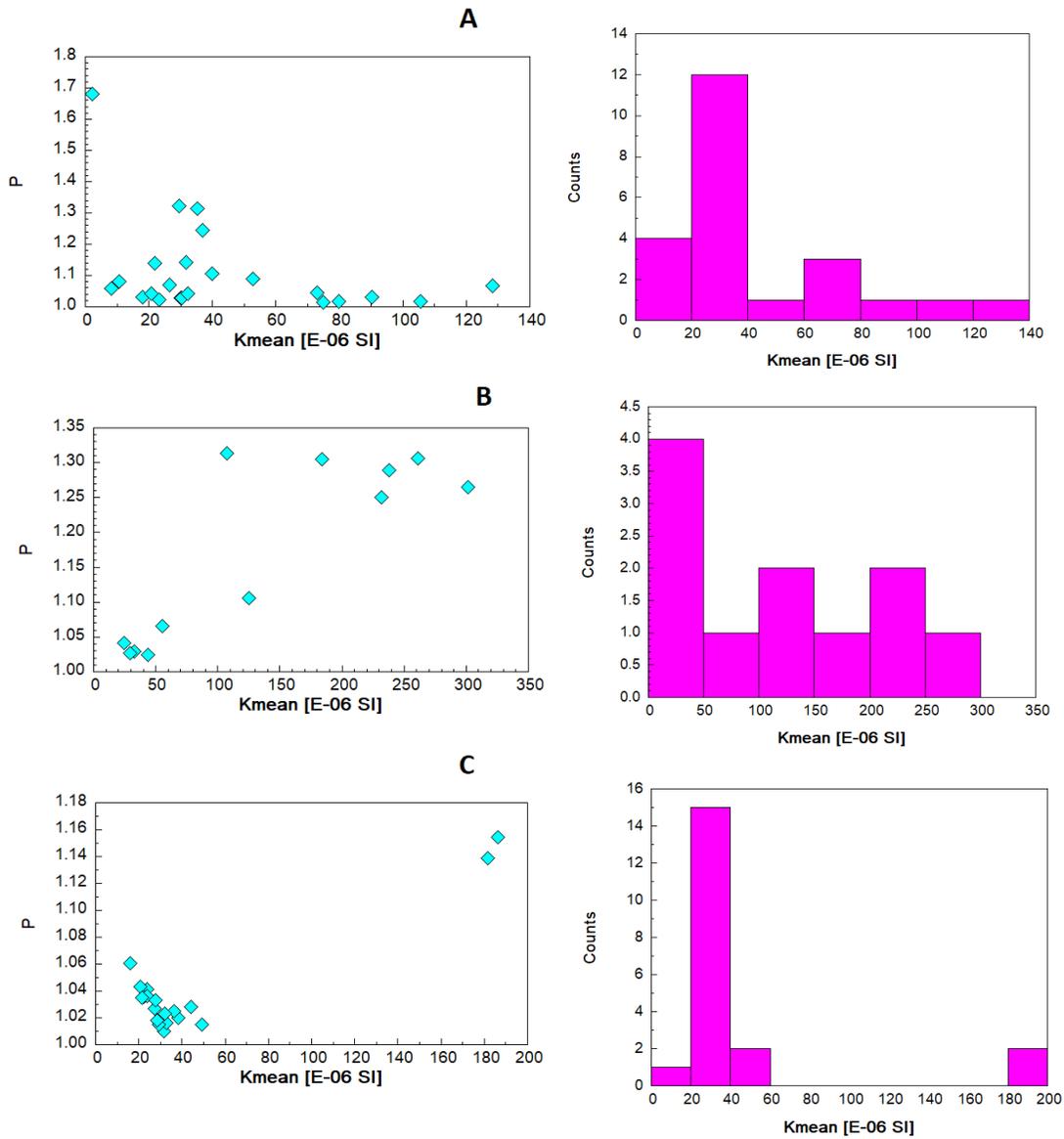


Figura 20. Representación de los valores de susceptibilidad y parámetros de forma. (A) Bloque techo BZ1, (B) Bloque piso BZ2 y (C) Sedimentos horizontales BZ3. (T) parámetro de forma para las áreas de estudio (Datos obtenidos por anisofit 5.0).

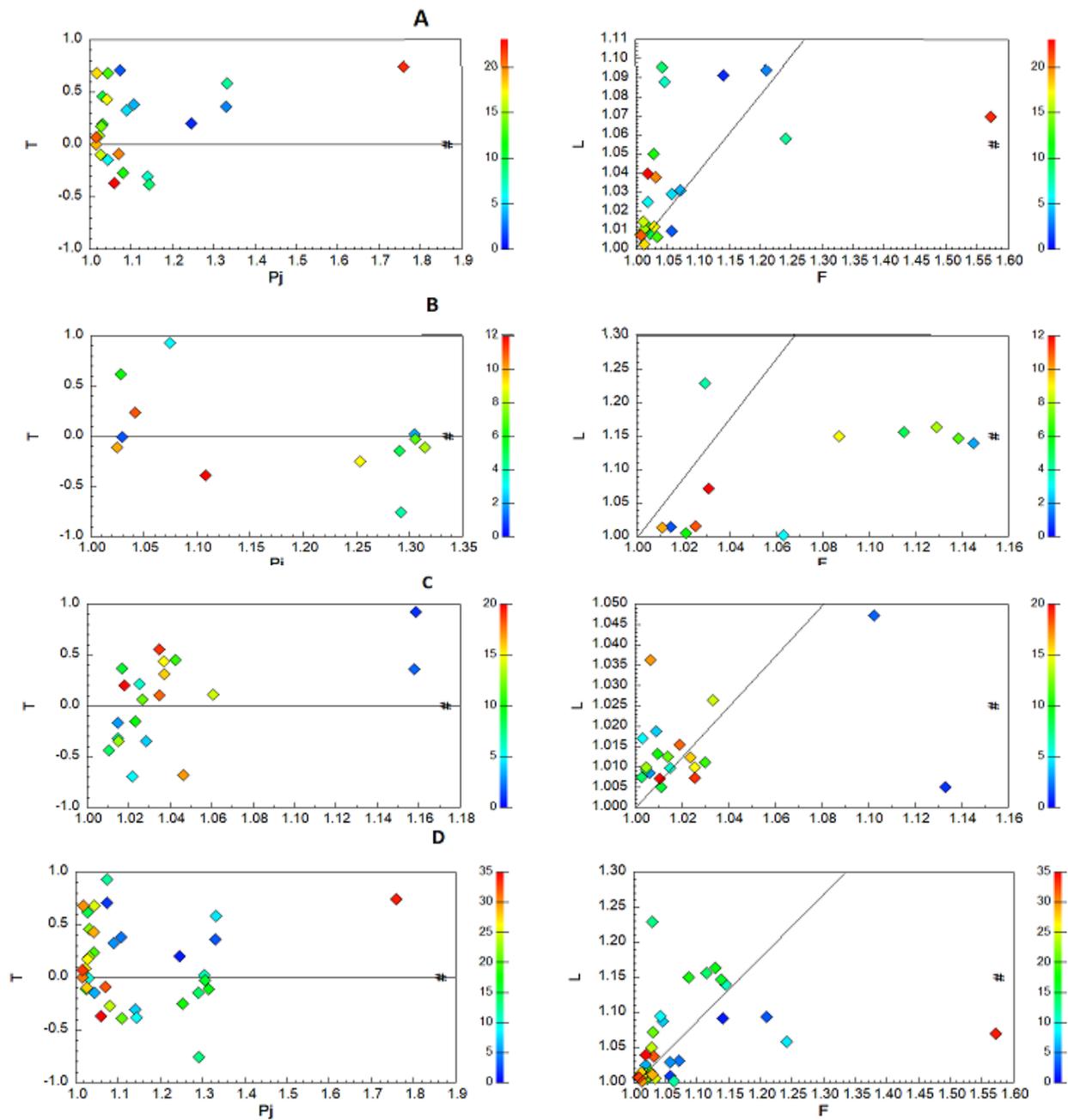


Figura 21. Diagramas de Flinn (F Vs L) y Jelinek (P_j Vs T) para las áreas de estudio. (A) Diagrama Jelinek para BZ1 junto al diagrama Flinn. (B) diagramas para BZ2. (C) Diagramas para BZ3 y (D) datos totales para BZ1 Y BZ2 (Datos obtenidos por anisoft 5.0).

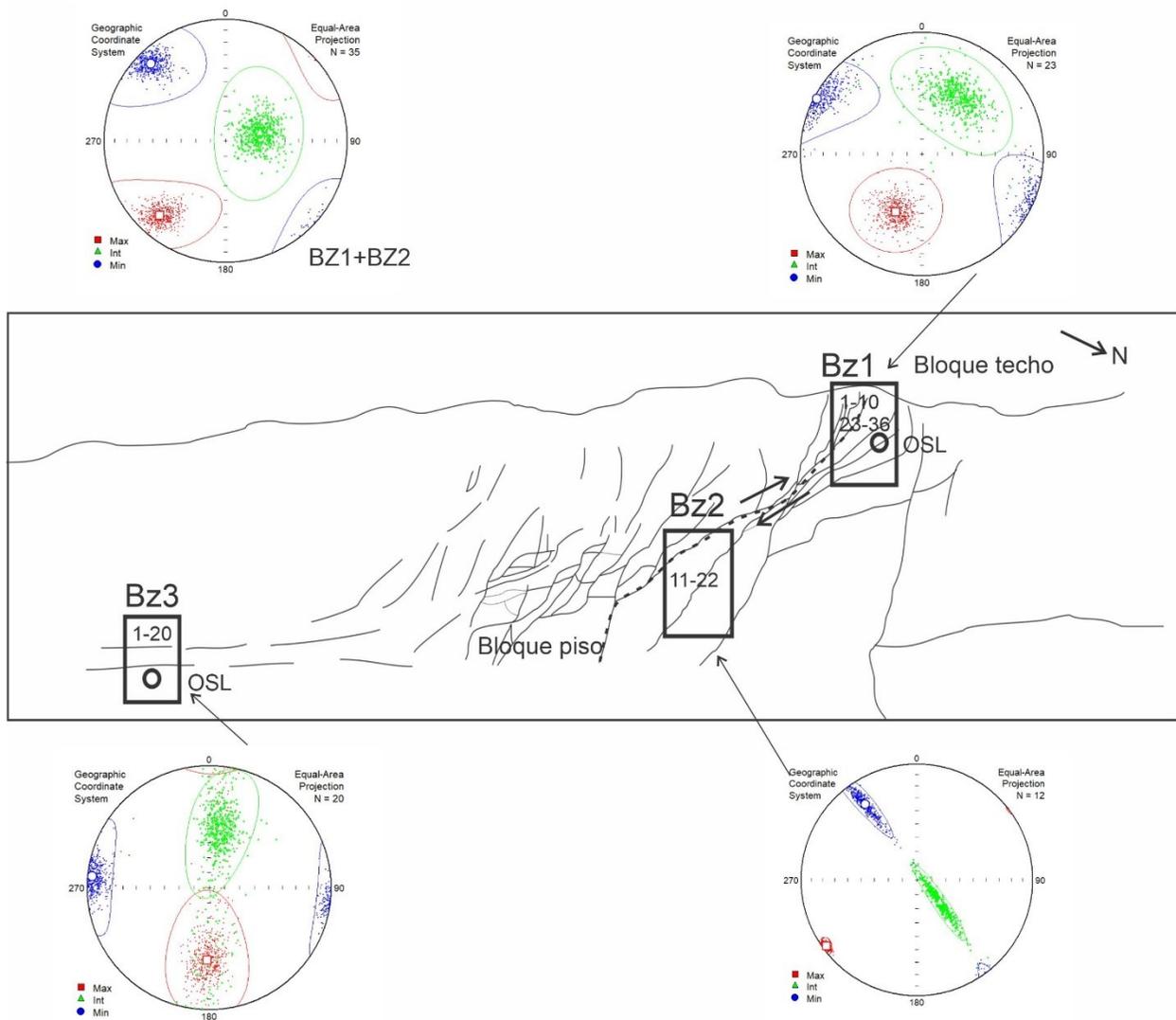


Figura 22. Distribución de las muestras y elipsoides de ASM para La Brizuela con ASM para el análisis de la estructura (Datos dados en formato bootstrap). Fallamiento normal con buzamiento hacia el SE (Elaboración propia, a partir de datos obtenidos por Anisoft 5.0).

BZI (Bloque techo)											
Nº	Km	Kmax		Kint		Kmin		L	F	Pj	T
1	40.84E-06	219.4	50.5	220.4	18.3	99.3	20.5	1.008	1.017	1.026	0.354
2	36.85E-06	220.6	53.8	341.3	20.5	83.0	28.4	1.073	1.119	1.203	0.232
3	128.3E-06	273.6	13.9	131.3	72.7	6.2	10.2	1.007	1.033	1.043	0.632
4	29.62E-06	216.7	41.5	3.9	43.5	110	17.1	1.093	1.158	1.270	0.244
5	39.84E-06	28.3	34.5	222.4	54.6	122.9	6.7	1.030	1.066	1.101	0.363
6	52.85E-06	350.3	79.8	192.0	9.5	101.4	3.7	1.027	1.046	1.076	0.249
7	72.94E-06	249.7	37.3	72.0	52.7	340.5	1.1	1.017	1.013	1.031	-0.132
8	21.91E-06	227.3	11.5	319.4	9.9	89.3	74.7	1.057	1.045	1.105	-0.112
9	35.19E-06	28.0	71.3	188.1	17.6	280.0	6.0	1.053	1.216	1.298	0.581
10	31.75E-06	208.0	40.9	6.5	47.0	108.4	10.9	1.072	1.036	1.112	-0.332
23	90.26E-06	99.4	54.0	255.5	33.6	353.3	11.4	1.006	1.016	1.023	0.428
24	17.92E-06	142.0	18.1	251.0	44.9	36.3	39.6	1.014	1.014	1.028	-0.014
25	10.74E-06	209.0	63.8	66.7	21.3	330.9	14.6	1.031	1.018	1.050	-0.263
26	20.74E-06	131.8	39.2	261.0	37.8	15.7	28.3	1.020	1.011	1.032	-0.274
27	30.07E-06	103.2	55.3	292.3	34.4	199.4	4.3	1.012	1.015	1.028	0.126
28	23.16E-06	221.3	4.2	127.6	41.1	316.0	48.6	1.018	1.017	1.036	-0.040
29	30.43E-06	268.5	11.7	169.7	36.5	13.3	51.1	1.010	1.014	1.024	0.128
30	32.38E-06	276.0	13.3	174.5	40.1	20.6	46.8	1.004	1.006	1.010	0.140
31	105.5E-06	270.3	45.9	131.4	36.2	24.5	21.7	1.003	1.005	1.008	0.330
32	74.97E-06	238.1	44.1	110.3	32.3	0.1	28.7	1.003	1.016	1.020	0.716
33	26.45E-06	214.3	24.9	29.2	65.0	123.4	1.9	1.026	1.023	1.050	-0.070
34	79.94E-06	221.3	33.8	74.1	51.5	322.7	16.1	1.004	1.012	1.017	0.497
35	2.13E-06	174.8	49.1	42.5	30.2	297.0	24.7	1.070	1.144	1.229	0.334
36	8.33E-06	236.8	44.1	142.0	4.9	47.0	45.5	1.015	1.004	1.020	-0.577

Tabla 4. Parámetros escalares de ASM para los datos obtenidos para el sector La Brizuela BZI, donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelinek, 1977)

BZ2 (Bloque piso)											
Nº	km	Kmax		Kint		Kmin		L	F	Pj	T
11	32.56E-06	70.3	0.5	160.7	33.6	339.6	56.4	1.016	1.000	1.019	-0.951
12	184.0E-06	232.5	1.8	358.2	86.9	142.4	2.5	1.130	1.136	1.284	0.023
13	55.12E-06	253.6	18.4	149.5	36.9	5.2	48.0	1.003	1.048	1.057	0.877
14	301.3E-06	230.7	3.6	323.2	35.0	135.6	54.7	1.210	1.035	1.274	-0.697
15	237.7E-06	50.8	0.9	141.7	44.0	319.9	46.0	1.142	1.119	1.279	-0.083
16	29.14E-06	242.2	29.5	129.1	34.8	1.8	41.1	1.005	1.010	1.015	0.294
17	261.4E-06	54.1	1.2	146.3	60.9	323.4	29.1	1.142	1.135	1.295	-0.024
18	107.2E-06	232.5	4.5	58.7	85.5	322.6	0.5	1.154	1.122	1.295	-0.106
19	231.8E06	238.8	1,4	140.5	80.6	329.0	9.3	1.146	1.083	1.244	-0.260
20	43.63E-06	203.2	14.6	110.6	9.8	347.7	72.2	1.009	1.011	1.020	0.127
21	24.70E-06	260.8	1.9	170.2	18.7	356.3	71.2	1.027	1.031	1.059	0.083
22	124.9E-06	235.2	13.3	118.4	62.3	331.2	23.8	1.064	1.031	1.059	-0.332

Tabla 5. *Parámetros escalares de ASM para los datos obtenidos para el sector La Brizuela BZ2, donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelinek, 1977)*

BZ3 (Sedimentos horizontales)											
N°	km	Kmax		Kint		Kmin		L	F	Pj	T
1	181.6E-06	196.3	61.1	17.3	28.9	287.1	0.4	1.005	1.133	1.159	0.922
2	186.3E-06	193.9	49.0	23.0	40.6	289.1	4.6	1.047	1.102	1.158	0.358
3	49.28E-06	10.1	84.9	120.9	1.8	211.1	4.8	1.009	1.006	1.015	-0.164
4	44.33E-06	224.3	51.6	64.6	36.6	327.1	10.0	1.019	1.009	1.028	-0.349
5	38.20E-06	148.0	41.3	354.6	45.5	250.2	13.6	1.017	1.003	1.022	-0.698
6	36.34E-06	23.0	26.0	235.4	59.9	120.0	14.0	1.010	1.015	1.025	0.217
7	31.42E-06	225.7	50.4	113.3	17.5	11.0	34.2	1.009	1.005	1.015	-0.437
8	31.593E-06	221.2	2.6	127.1	57.3	312.9	32.6	1.007	1.003	1.011	-0.153
9	32.93E-06	316.0	33.6	179.9	47.3	62.4	23.1	1.005	1.011	1.017	0.371
10	31.96E-06	173.9	5.5	75.4	56.7	267.5	32.7	1.013	1.010	1.023	-0.153
11	23.86E-06	183.6	14.1	33.7	73.8	275.6	7.8	1.011	1.030	1.043	0.454
12	27.16E-06	14.9	1.2	278.5	79.7	105.1	10.3	1.013	1.014	1.027	0.060
13	29.29E-06	137.2	24.6	14.5	49.7	242.4	29.7	1.010	1.005	1.015	-0.346
14	16.06E-06	140.8	9.1	5.5	77.3	232.2	8.8	1.026	1.033	1.061	0.113
15	22.08E-06	91.0	66.9	196.2	6.4	288.8	22.1	1.010	1.026	1.037	0.437
16	23.65E-06	134.0	60.7	20.6	12.6	284.3	26.0	1.011	1.024	1.037	0.316
17	20.63E-06	351.1	26.1	232.7	44.2	100.7	34.5	1.036	1.007	1.046	-0.683
18	21.47E-06	157.8	25.7	1.8	62.3	252.6	9.8	1.015	1.019	1.035	0.104
19	27.73E-06	311.2	28.8	197.1	36.7	68.6	39.9	1.007	1.026	1.035	0.555
20	28.36E-06	140.3	41.8	4.9	38.5	254.0	24.2	1.007	1.011	1.018	0.199

Tabla 6. Parámetros escalares de ASM para los datos obtenidos para el sector La Brizuela BZ3, donde se muestra a L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelinek, 1977)

6.3 NEOTECTÓNICA AL OESTE DEL VALLE DE ABURRÁ Y ALREDEDORES

Para caracterizar el Oeste del Valle de Aburrá mediante la técnica de ASM, se seleccionaron los puntos 9, 10, 12 de la figura 13, localizados en el municipio de Medellín (Sector Yarumalito), municipio de la Estrella (La Tablaza) y municipio de Santafé de Antioquia (La Caimana).

6.3.1 Sector Yarumalito

En el municipio de Medellín, Yokota y Ortiz (2003) analizaron un afloramiento en el corregimiento de San Antonio de Prado, localizado en cercanías de la escuela de Yarumalito (Coordenadas: 6°14'03.25"N 75°41'36.72"W) a una altura de 2297msnm. Para llegar a este sitio se toma la vía de San Antonio-Heliconia, luego se desvía por la carrera 94 hasta llegar a la Escuela, el afloramiento se encuentra a unos 200m de esta. El punto de interés está ubicado en el Valle Superior del VA, en el bloque Romeral (Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, 2006). Geomorfológicamente, en la zona es predominan lomos medianamente incisados, depósitos de vertiente y aluviales con rasgos morfotectónicos en sentido NW, concordante con el trazo de la falla San Jerónimo y contrario a la pendiente de las laderas de la zona, lo cual ha sido interpretado por (Yokota & Ortiz, 2003) como una posible evidencia de movimientos de fallas recientes, que probablemente estén relacionados con movimientos de deslizamiento de la falla (Figura 23). El afloramiento corresponde a una secuencia fallada en depósitos Aluvial, conformado por bloques tamaño grava, que cubren las rocas metamórficas y graníticas que han cartografiado en el sector como stock de Altavista y esquistos del Ayurá-Montebello. De techo a base se observa en el bloque superior de la falla (Techo): suelo orgánico (aproximadamente de 15 cm), intercalaciones de limos y arcillas (100cm), seguido de una delgada capa de ceniza volcánica de color café amarillenta (5 cm?) que separa la segunda capa de suelo orgánico (30 cm) que solo aparece en el bloque inferior de la falla, con una capa gruesa de depósitos limo-arcillosos que soportan clastos de tamaño grava (3-4 cm) subredondeados y subangulosos de esquistos y rocas graníticas con baja estratificación (Figura 24).

Dataciones sobre este depósito utilizando el método de radiocarbono convencional y arrojó una edad de 1.440 ± 50 Años correspondiendo así a entre 540 y 670 DC (Yokota & Ortiz, 2003). El posible origen de las cenizas volcánicas que se encuentran en el afloramiento, podría estar relacionado a la emanación de cenizas volcánica del complejo volcánico Ruiz-Tolima, ampliamente reportado por otros autores en el Valle de Aburrá (e.g., Hermelín, 1990; Toro, 1999), sin embargo, hasta el momento no hay dataciones obtenidas en este rango de edad. Con este análisis, queda claro que, aunque no existe una edad precisa para el depósito aluvial de éste sería anterior a 1.400 años, y el movimiento del bloque inferior de la falla (con una componente de rumbo y asociada otra componente normal), podría indicar una actividad de la falla San Jerónimo durante el Holoceno, tal y como lo propuso Ortiz (2003).

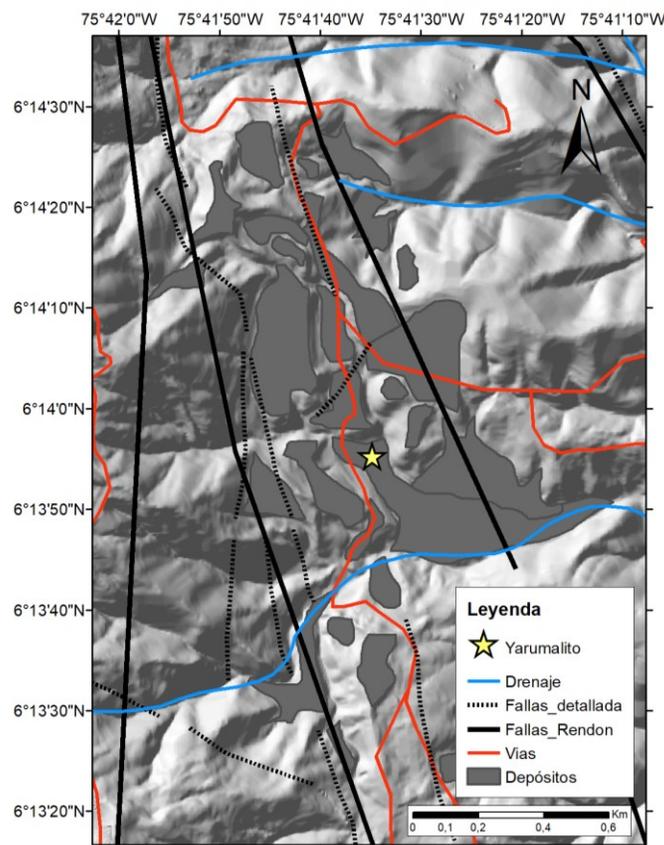


Figura 23. Yarumalito, San Antonio de Prado, Medellín (Elaboración propia, con información obtenida de Rendón y cartografía base).

Análisis de ASM

El estudio de ASM para el sector de Yarumalito se desarrolló a partir del análisis de 15 muestras distribuidas de la siguiente forma: 9 muestras el bloque piso de la falla (de la 1-9) que estaría y 6 en la zona superior (10-15) en el bloque techo (Figura 24).

Los valores medidos para los dos elipsoides de ASM de cada sitio de muestreo y sus valores de anisotropía, junto con los diferentes parámetros de forma se ilustran en la tabla 7 y 8. El elipsoide que se encuentra representando en el bloque techo (Ya1) representa una tipología diferente en comparación con el bloque piso (Ya2). Los datos de Ya1 tiene valores de tensores medios tales como: k_1 de 1.004 con Azimut/Inclinación (A/I) de 27.7/70.7, k_2 de 1.000 con A/I de 181.8/17.5 y k_3 de 0.996 con A/I de 274.3/7.9 con un promedio de susceptibilidad de 422.9E-06 SI y un Error estándar en la susceptibilidad de 172.4E-06 SI. Para Ya2 valores de tensores medios tales como: k_1 de 1.004 con Azimut/Inclinación (A/I) de 52.0/68.2, k_2 de 1.000 con A/I de 254.2/20.3 y k_3 de 0.995 con A/I de 161.4/7.5 con un promedio de susceptibilidad de 491.7E-06 SI y un Error estándar en la susceptibilidad de 253.5E-06 SI, representando un elipsoide triaxial.

La muestra Ya1 (Bloque del techo) y Ya2 (Bloque del piso), presentan valores de grado de anisotropía bajos (P_j) de 1.007 – 1.020 y 1.009 – 1.018 respectivamente (Tabla 7). En ambos casos, no se observa una agrupación de los k_{min} hacia el centro, lo cual es típico de una fábrica magnética es de origen tectónico (Robion, et., 2007). El k_{max} y k_{int} en Ya1, se encuentra perpendiculares a la estructura principal en una dirección NNE-S y una distribución de los k_{min} hacia la orientación WNW-E (Figura 25). Por el contrario, el k_{max} y k_{int} en Ya 2, se encuentra en el mismo sentido de la estructura principal en estudio (Figura 27), es decir, en una dirección NE-SW y una distribución de los k_{min} hacia el NW-SE. En general, se está representado un elipsoide triaxial y una deformación predominantemente oblata (según Casas et, al., 1998), con valores de simetría de la forma (T) que varían para Ya1 entre -0.521 a 0.481 con un dominio en $0 > T > 1$ (Figura 26, Tabla 7) y para Ya2 entre -0.855 a 0.758 con un dominio en $0 > T > 1$ (Figura 28, Tabla 8).

En términos generales para toda la unidad se observa una variación del elipsoide de forma triaxial a lineal o guirnalda para k_{int} y k_{min} en donde los k_{max} tienden a estar agrupados hacia el centro

demonstrando que tiene una fábrica magnética de origen tectónico. Según los diagramas de Flinn y jelinek se observa un domino de una deformación de tipo prolato teniendo una mayor agrupación de datos $0 > T > 1$.



Figura 24. Afloramiento de Yarumalito (Foto tomada en campo).

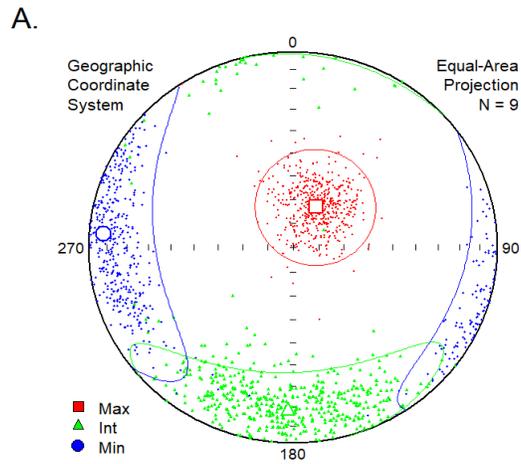


Figura 25. Elipsoide del sector Yarumalito, Bloque Techo (Ya1) con Kmax, Kint y Kmin (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0)

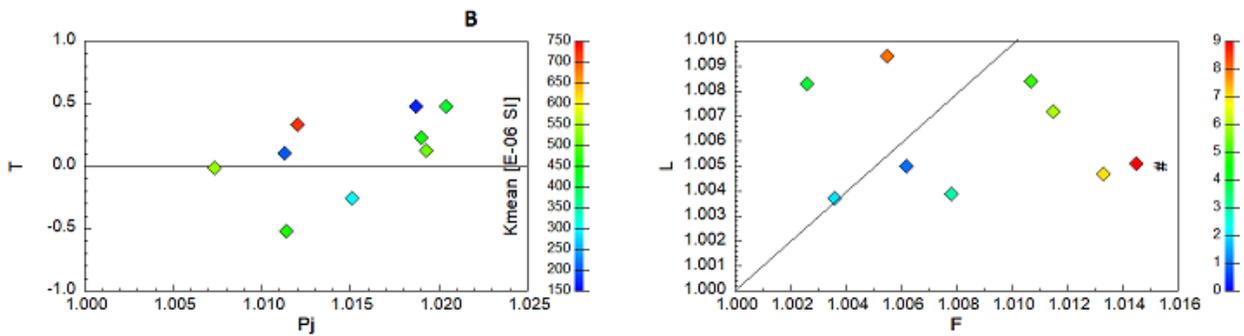


Figura 26. Diagrama de Jelinek (Pj Vs T) y diagrama de Flinn (F Vs L) sector Yarumalito, Bloque Techo (Ya1) (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0)

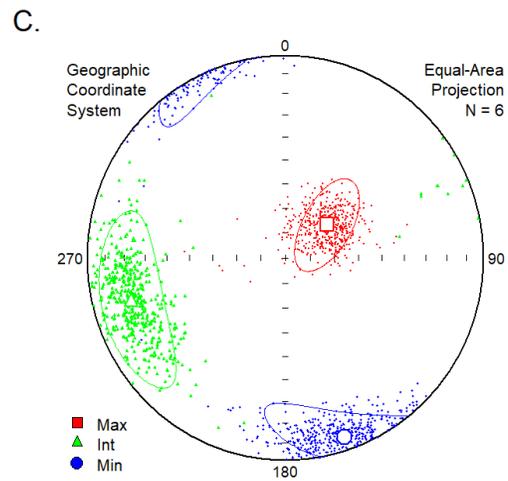


Figura 27. Elipsoide del sector Yarumalito, Bloque piso (Ya2) con Kmax, Kint y Kmin con Kmax, Kint y Kmin (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0)

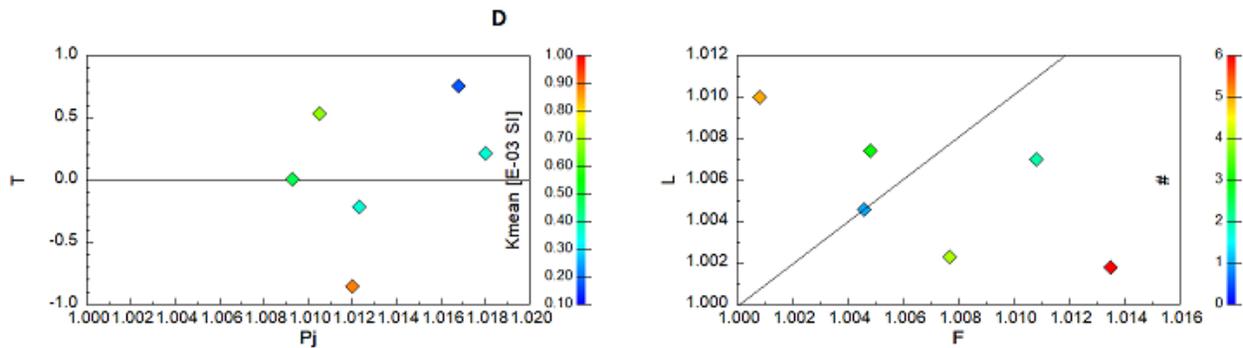


Figura 28. Diagrama de Jelinek (P_j Vs T) y diagrama de Flinn (F Vs L) sector Yarumalito, Bloque piso (Ya2) (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0)

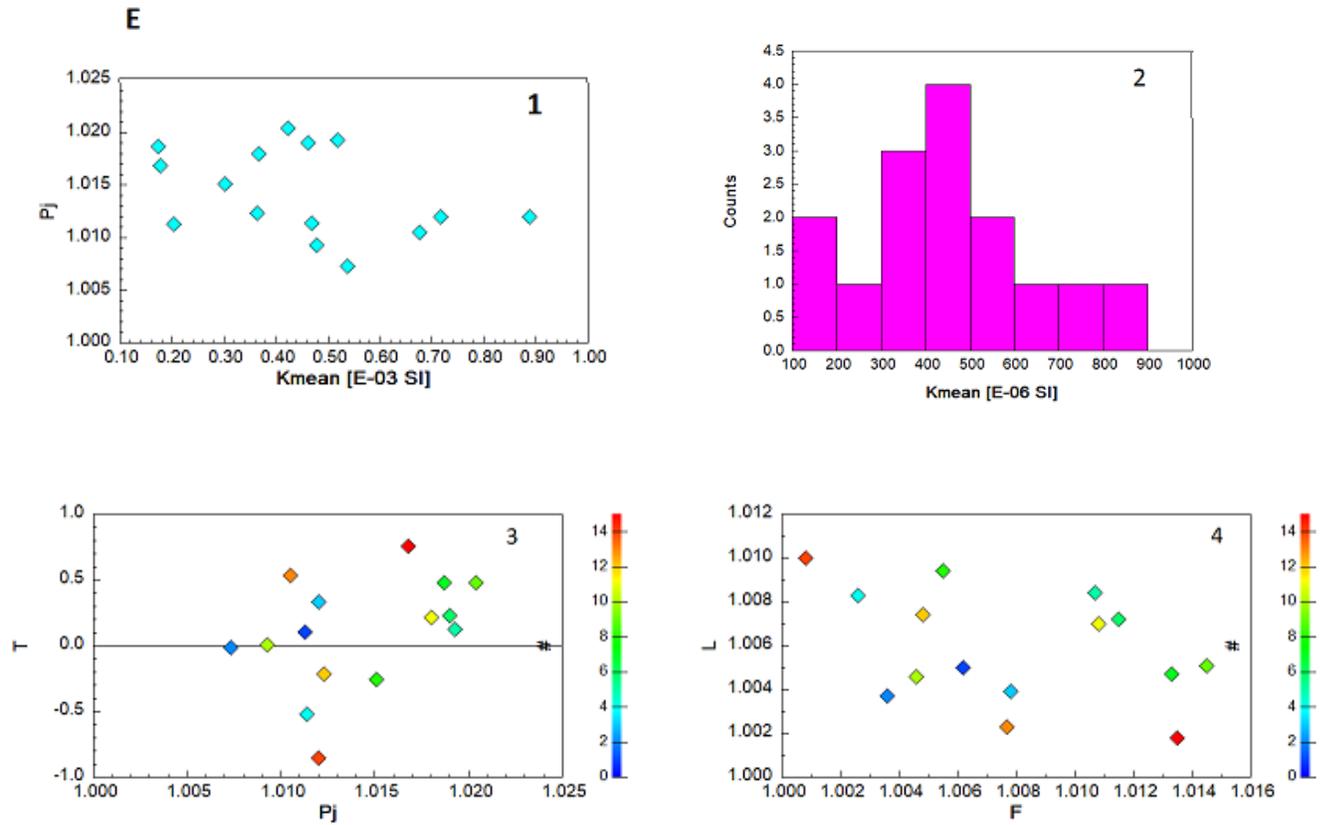


Figura 29. Diagramas de Susceptibilidad promedio Vs Grado de anisotropía corregido (1), Histograma de Susceptibilidad promedio (2), diagrama de Jelinek (P_j Vs T) (3) y diagrama de Flinn (F Vs L) (4) para las áreas de estudio (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0)

Yarumalito (Techo)											
N°	Km	Kmax		Kint		Kmin		L	F	Pj	T
1	203.2E-06	332.1	51.8	167.4	35.4	68.4	12.5	1.005	1.006	1.011	0.105
2	538.3E-06	277.5	12.3	8.6	5.1	121.0	76.7	1.004	1.004	1.007	-0.012
3	717.2E-06	20.2	54.3	208.7	35.4	115.8	4.0	1.004	1.008	1.012	0.333
4	468.6E-06	57.2	52.9	158.3	8.3	254.3	35.9	1.008	1.003	1.011	-0.521
5	517.6E-06	80.0	62.5	80.8	62.5	342.6	4.2	1.008	1.011	1.019	0.122
6	462.5E-06	351.1	38.4	140.1	47.2	248.0	15.9	1.007	1.012	1.019	0.231
7	173.0E-06	200.1	65.9	350.5	21.3	84.8	10.8	1.005	1.013	1.019	0.481
8	302.3E-06	52.3	66.0	263.9	20.8	169.5	11.5	1.009	1.006	1.015	-0.256
9	423.9E-06	224.7	31.5	65.0	56.9	320.5	9.3	1.005	1.015	1.020	0.481

Tabla 7. Parámetros escalares de ASM de los datos obtenidos para el sector Yarumalito (Techo) donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelinek, 1977)

Yarumalito (Piso)											
N°	Km	Kmax		Kint		Kmin		L	F	Pj	T
10	478.8E-06	5.9	44.2	104.5	8.8	203.3	44.5	1.005	1.005	1.009	0.004
11	366.8E-06	53.9	82.3	235.2	7.7	145.1	0.2	1.007	1.011	1.018	0.215
12	363.0E-06	45.1	59.4	273.2	21.6	174.7	20.7	1.007	1.005	1.012	-0.213
13	676.8E-06	294.6	37.9	69.3	42.1	183.7	24.6	1.002	1.008	1.011	0.537
14	887.1E-06	139.6	69.6	6.4	14.3	272.7	14.3	1.010	1.001	1.012	-0.855
15	178.0E-06	64.8	3.8	202.2	84.9	334.6	3.5	1.002	1.014	1.017	0.758

Tabla 8. Parámetros escalares de ASM de los datos obtenidos para el sector Yarumalito (piso) donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelinek, 1977)

6.3.2 Sector La Estrella (La Tablaza):

La Tablaza es un corregimiento del municipio de La Estrella (Coordenadas: 6°07'20.2"N 75°38'18.5"W) con una altura de 1830 msnm, para llegar se toma la vía principal que es la carrera 50, hasta encontrar la calle 100Sur hacia la vía San Miguel parte alta. El punto de interés está ubicado en el Valle Superior, en el Bloque Tablaza - Pueblo viejo. La zona está dominada por colinas en depósitos de vertiente, superficies con pendientes suaves por depositación en vertientes con incisión de medio a alto grado y en menor proporciones depósitos aluviales (Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, 2006).

Este sector está atravesado por la traza de la falla San Jerónimo que penetra el valle de Aburrá en inmediaciones del Alto de minas, con dirección N-S hasta inmediaciones del municipio de Caldas, a partir de allí cambia su rumbo en dirección NNW y prolongándose hacia las vertientes del río Cauca al noroeste del Alto del Padre Amaya (Toro, 1984). Esta falla ha sido denominada como una falla de rumbo lateral izquierdo cuya expresión geomorfológica se caracteriza por quiebres de pendientes, silletas y control de drenaje (Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, 2006). A lo largo de la misma, el estudio anterior estimó que para el segmento 1 de la falla San Jerónimo se puede llegar a generar un sismo potencial de magnitud de momento sísmico (Mw) 6.3 (Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, 2006).

A nivel más local, el estudio de microzonificación sísmica del VA (2006), cartografio la falla Caldas-La Tablaza (Figura 30), con una longitud superior a los 7 km, esta falla se podría asociar al sistema de fallas San Jerónimo con un rumbo que va de N5°W a N10°W y buzamiento de alto grado hacia el Este, siendo también una falla de rumbo lateral izquierdo con fuertes cambios de pendiente, bermas, silleras, lomos anómalos, drenajes deflectados y corta algunos depósitos. Asimismo, en el estudio de la microzonificación sísmica se estimó que se puede generar un sismo potencial de magnitud de momento sísmico (Mw) 6.1. En este segmento del valle, en la parte baja, hay depósitos aluviales, asociados al cauce del río Aburrá (Figura 30) y sus afluentes principales (quebradas La Raya, La Culebra, La Chocha, La Tablacita y La Grande). Los más recientes están

asociados a las llanuras del río Aburrá y sus afluentes mencionados, mientras que los depósitos aluviales antiguos y los depósitos aluviotorrenciales están asociados a geoformas de terrazas y abanicos. En los barrios Bellos Aires y El Hoyo, la terraza del río Aburrá se observa con cuatro metros de espesor. La parte superior presenta sedimentos tamaño arena, con esporádicos clastos de anfibolita. La parte inferior consiste de una capa con 90% de clastos redondeados a subredondeados, de anfibolita, gneis y cuarzo, y un 10% de matriz arenosa, color pardo, con alta presencia de micas.

Para el presente estudio, se analizó la terraza en el sector de La Tablaza y los depósitos aluviales asociados. Allí se encontraron capas de material con estratificación clara de material clasto-soportado, imbricado hacia la base y matriz-soportado hacia el techo de orden centimétrico (1-2cm). En campo no se observaron evidencias directas de fallamiento. El muestreo se centró en el bloque superior de la falla reportada como Caldas-La Tablaza, sobre material limo arcilloso

Análisis de ASM

El estudio de ASM para el área de La Tablaza se desarrolló a partir del análisis de 6 muestras distribuidas a lo largo de un afloramiento de aproximadamente 4 metros de ancho y 1,5 de alto (Figura 30), correspondiente al bloque del techo de la falla Caldas-La Tablaza con dirección NW-SE.

Los valores obtenidos para este sector se ven en la (Tabla 9) con valores de tensores medios tales como: k_1 de 1.007 con Azimut/Inclinación (A/I) de 244.0/762.9, k_2 de 1.000 con A/I de 151.6/1.2 y k_3 de 0.993 con A/I de 60.9/27.0 con un promedio de susceptibilidad de 186.7.9E-06 SI y un Error estándar en la susceptibilidad de 114.8E-06 SI.

Con base en los datos obtenidos, se interpreta una fábrica magnética de origen tectónico debido a la concentración de los valores de k_{max} hacia el centro del elipsoide y k_{int} y k_{min} hacia los extremos (Robion, et., 2007). Los k_{max} y k_{int} se encuentra en la misma dirección de la falla principal Caldas – La Tablaza y la falla San Jerónimo que presenta una tendencia similar. El elipsoide está

representado por una forma triaxial con buen agrupamiento de los tensores, en donde ninguno de los ejes se entrecruza y una distribución de los k_{\min} hacia el NE (Figura 32). El tipo de deformación presente es predominantemente de tipo prolato (Figura 33), presentando rangos de valores de T entre -0.528 a -0.019 (Según Casas et, al., 1998). Presenta valores de grado de anisotropía (P_j) de 1.011 - 1.034 con una susceptibilidad baja (Figura 34) y valores de simetría de la forma (T) entre -0.528 a 0.337 con un dominio en $-1 > T > 0$ (Figura 33).

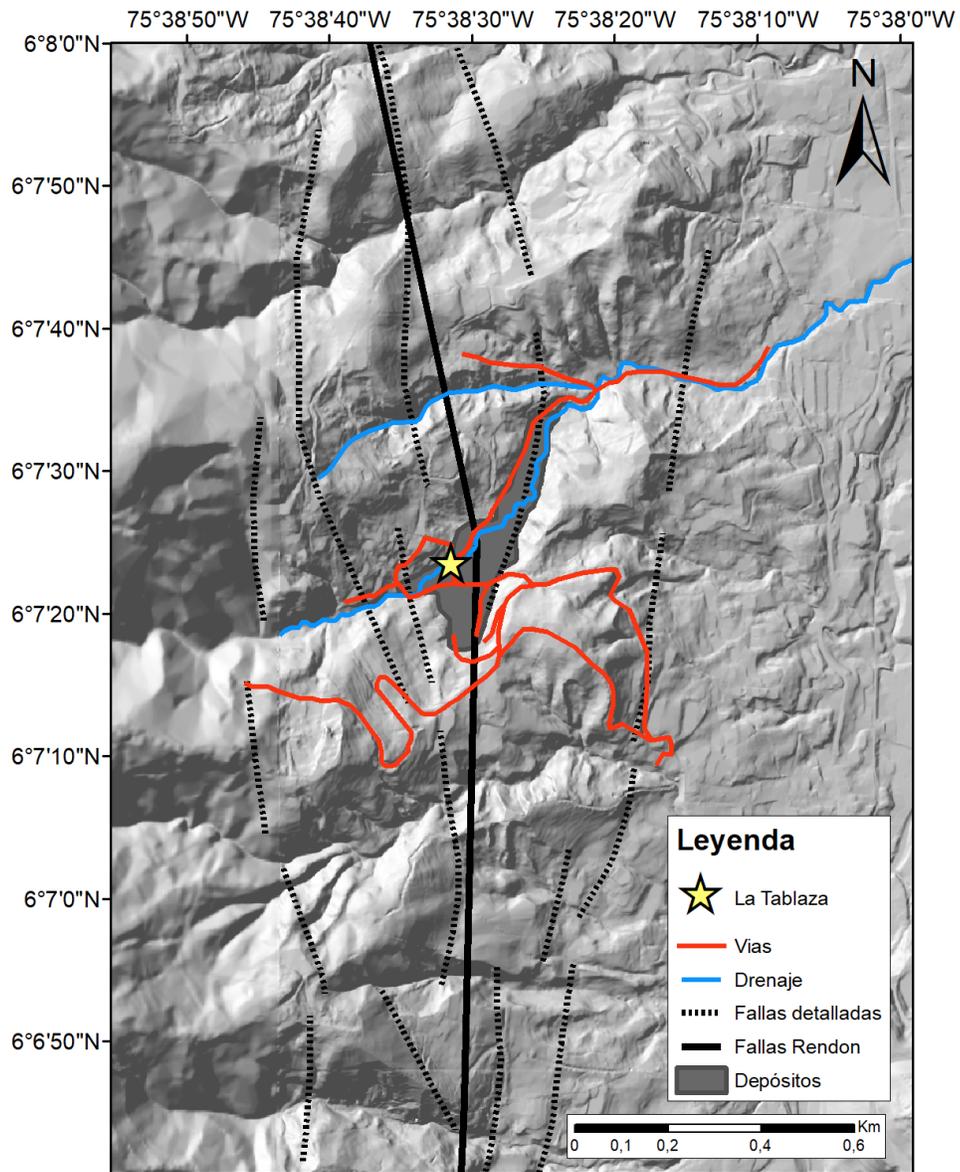


Figura 30. Mapa morfotectónico de La Tablaza, Caldas (Elaboración propia, con información obtenida de Rendón y cartografía base).

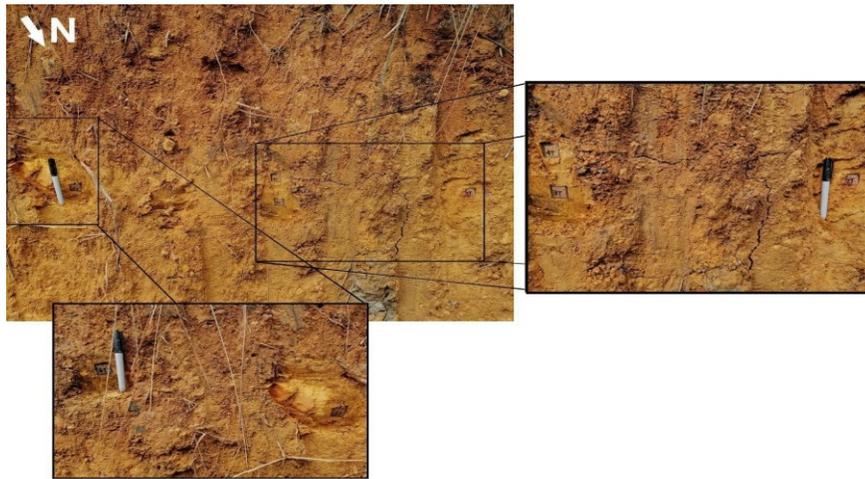


Figura 31. Distribución de las muestras para el análisis de ASM (Foto tomada en campo)

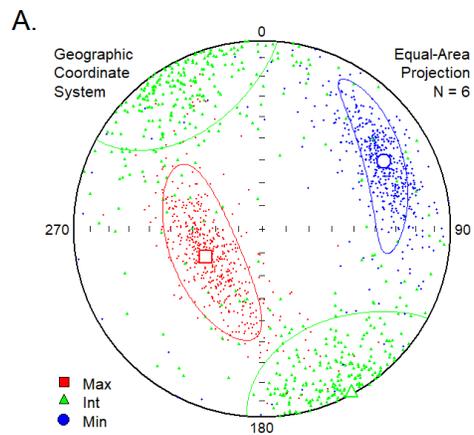


Figura 32. Elipsoide de La Tablaza con K_{max} , K_{int} y K_{min} (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0).

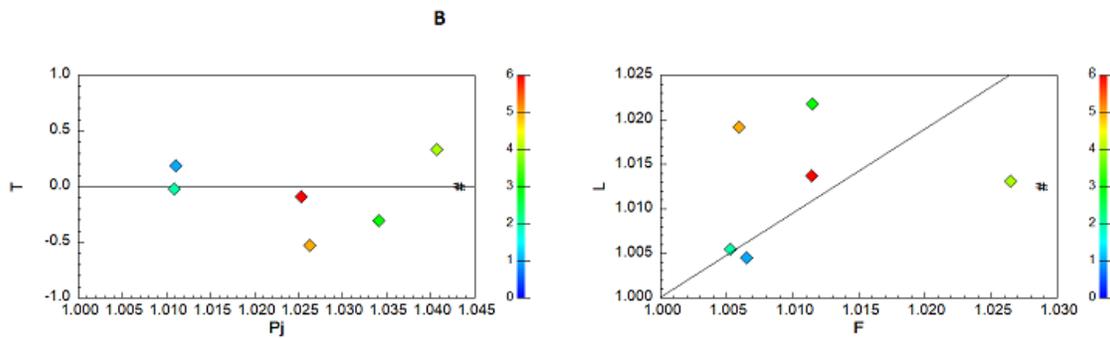


Figura 33. Diagrama de Jelinek (P_j Vs T) y diagrama de Flinn (F Vs L) para las áreas de estudio (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0).

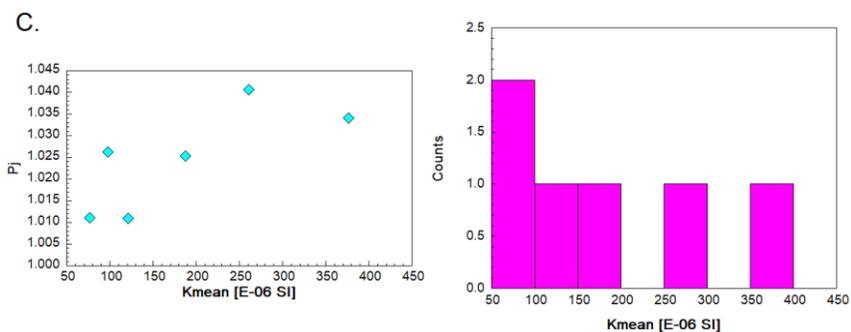


Figura 34. Diagramas de Susceptibilidad promedio Vs Grado de anisotropía corregido, Histograma de Susceptibilidad promedio para la zona de estudio (Datos obtenidos por el Anisotf 5.0).

La Tablaza											
N°	Km	Kmax		Kint		Kmin		L	F	Pj	T
1	76.32E-06	134.4	5.7	226.6	21.3	30.1	67.8	1.004	1.007	1.011	0.186
2	121.4E-06	52.9	33.4	162.4	26.9	282.3	44.6	1.006	1.005	1.011	-0.019
3	376.7E-06	230.5	60.3	338.5	10.0	73.9	27.7	1.022	1.012	1.034	-0.306
4	260.7E-06	217.3	49.8	334.2	20.9	78.3	32.5	1.013	1.027	1.041	0.337
5	97.70E-06	311.9	36.5	115.7	52.4	216.0	7.9	1.019	1.006	1.026	-0.528
6	187.7E-06	158.1	75.3	273.6	6.5	5.1	13.2	1.014	1.011	1.025	-0.092

Tabla 9. Parámetros escalares de ASM de los datos obtenidos para el sector La Tablaza, donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelinek, 1977)

6.3.3 Sector La Caimana

La Caimana se encuentra en la vía Santa fe de Antioquia-Sopetrán, el punto de interés está ubicado 600m antes del puente de Occidente desde Santafé sobre los depósitos de la quebrada (Coordenadas: 6°34'42.66"N 75°48'08.91"W) a una altura de 470msnm. En la zona predomina una geomorfología con control estructural de colinas, cuchillas y filos, y en menores proporciones abanicos aluviales, llanuras aluviales y terrazas, siendo éstas últimas en donde se encuentra el afloramiento analizado conocido como la terraza San Nicolás (Figura 35).

La terraza San Nicolás tiene una altura de 19,7 m. En este afloramiento, se observan láminas de limos en la base y en el techo, mientras que las arenas finas están restringidas solo al techo de la sección. Se observan cristales de yeso, normalmente asociado a hierro férrico, adicionalmente, se observan 3 capas de cenizas volcánicas. La sucesión, se encuentra de manera inconforme entre dos materiales predominantes de tipo arcilloso y limoso.

La erosión de la zona ayuda que se pueda visualizar de mejor manera algunas estructuras sedimentarias; entre ellos, la laminación cruzada, syneresis cracks y "scour and drape", estas últimas son macroestructuras de olas de aproximadamente 1m de ancho, que están cubiertas drapping laminae Suter et al (2011). Aparte de estas estructuras, se aprecia una serie de deformaciones de sedimentos blandos como load casts y convolute bedding son comunes, y han sido atribuidas por Suter et al (2011) a actividad sísmica. Descripción detallada del afloramiento se encuentran en (García et al, 2010), presentando una analogía entre la terraza de San Nicolás y Sucre II en Martínez et al 2011.

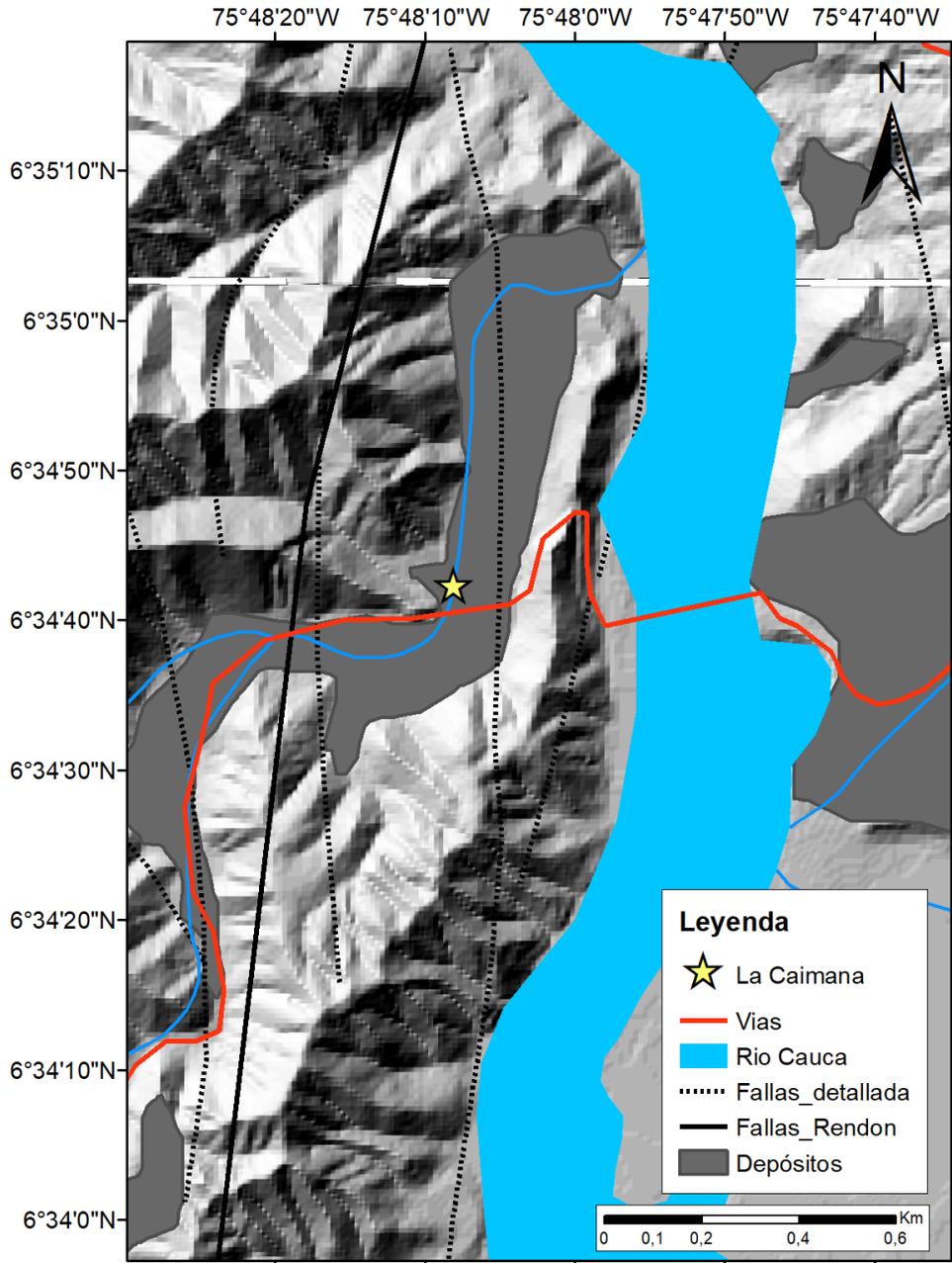


Figura 35. La Caimana en Santa fe de Antioquia (Elaboración propia, con información obtenida de Rendón y cartografía base).

Análisis de ASM

El estudio de ASM para el área de La Caimana se desarrolló a partir del análisis de 30 muestras distribuidas a lo largo del afloramiento de capas finas de limos y arcillas, intercaladas con capas menores de arenas donde la deformación tectónica no era evidente.

Los valores obtenidos para este sector se ven en la (Tabla 10) con valores de tensores medios tales como: k_1 de 1.010 con Azimut/Inclinación (A/I) de 115.0/82.8, k_2 de 1.006 con A/I de 308.3/7.0 y k_3 de 00.984 con A/I de 218.1/1.6 con un promedio de susceptibilidad de 702.0E-06 SI y un Error estándar en la susceptibilidad de 139.8E-06 SI.

Los datos indican fábrica magnética de origen tectónico debido a la concentración hacia el centro de los valores de k_{max} y los valores de k_{int} y k_{min} hacia los extremos (Figura 36) (Robion et al., 2007). Los k_{max} y k_{int} se encuentra en la misma dirección, pero no paralelo a la estructura principal que en este caso es la Falla Cauca en sentido N-NW, existe una diferencia de aproximadamente unos 40° hacia el NW, los K_{min} tienen una dirección hacia el NE. Para este punto, el eje de mayor deformación k_{max} se encuentra en una posición subvertical. El elipsoide está representado por una forma triaxial en donde están muy bien agrupados los ejes, la deformación que arrojan los datos es de tipo oblató (Figura 37) con la totalidad de sus datos dicha zona y presentando rangos de valores simetría de la forma (T) (ver Tabla 10) entre 0.226 a 0.955 (según Casas et, al, 1998).

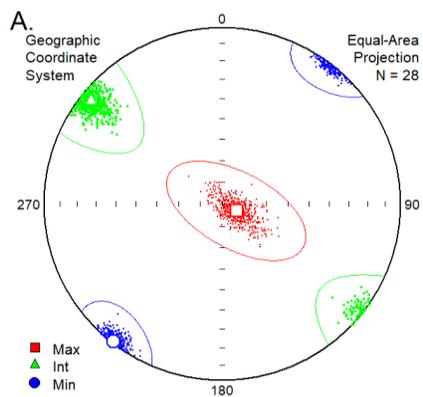


Figura 36. Elipsoide con Kmax, Kint y Kmin (Datos obtenidos del anisoft 5.0)

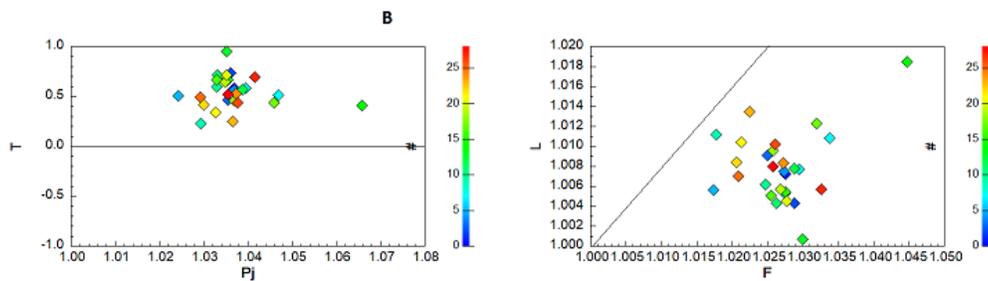


Figura 37. Diagrama de Jelinek (P_j Vs T) y diagrama de Flinn (F Vs L) para las áreas de estudio (Datos obtenidos del Anisoft 5.0)

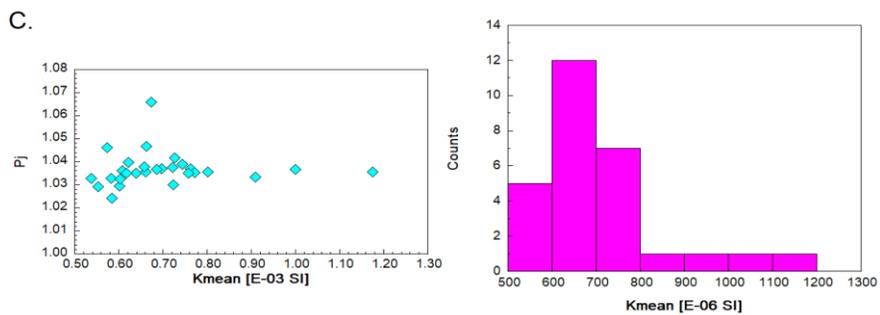


Figura 38. Diagramas de susceptibilidad (Datos obtenidos por el anisoft 5.0)

El grado de anisotropía corregido para la zona es baja con valores (P_j) entre 1.024 a 1.047 y un valor de grado de anisotropía media siendo esta la muestra 14 siendo este de 1.066, estando esta cerca del límite de grado de anisotropía bajo que es 1.050. Las susceptibilidades de los depósitos en lo general son relativamente bajos (Figura 38) y es lo que se aprecia en los datos, aunque existen 3 datos, los cuales tienen una mayor susceptibilidad comparados con el resto del muestreo, siendo estos las muestras 1, 3 y 11 con valores de susceptibilidad de $1.000E-03SI$, $1.175E-03SI$ y $909.6E-06SI$ respectivamente. Estos valores “anómalos” de susceptibilidad magnética puede estar asociado a capas o estratos de materiales ricos en minerales ferromagnesianos asociando a diferentes ambientes a la hora de la depositación del material. Hay que tener presente que esta región tiene influencia de rocas ultramáficas asociadas al complejo Quebradagrande el cual puede parcialmente aportar materiales de alta susceptibilidad magnética.

N° Muestra	Km	Kmax		Kint		Kmin		L	F	Pj	T
1	1.000E-03	23.5	84.5	127.6	1.4	217.8	5.4	1.007	1.027	1.037	0.583
2	607.4E-06	118.1	34.7	320.7	53.2	320.7	53.2	1.004	1.029	1.036	0.737
3	1.175E-03	93.1	37.1	333.0	33.5	215.2	35.1	1.007	1.027	1.036	0.465
4	763.1E-06	97.3	50.8	333.8	24.2	229.5	28.8	1.008	1.027	1.037	0.566
5	584.3E-06	24.9	59.0	135.8	12.1	232.3	28.0	1.006	1.017	1.024	0.509
6	771.7E-06	4.1	49.0	132.0	28.1	237.9	27.1	1.005	1.027	1.035	0.671
7	662.3E-06	85.8	46.2	296.9	39.3	193.3	16.0	1.011	1.034	1.047	0.512
8	622.4E-06	160.9	74.4	312.8	13.9	44.5	7.1	1.008	1.029	1.040	0.581
9	601.0E-06	253.1	80.0	132.0	28.1	41.5	8.5	1.011	1.018	1.029	0.226
10	582.2E-06	224.2	82.3	335.8	2.9	66.2	7.2	1.006	1.025	1.036	0.595
11	909.6E-06	334.6	61.0	142.8	28.5	235.5	5.0	1.004	1.026	1.033	0.718
12	744.5E-06	240.4	52.6	125.8	17.7	24.4	31.7	1.008	1.029	1.039	0.570
13	638.3E-06	182.6	78.0	315.9	8.3	47.1	8.6	1.001	1.030	1.035	0.955
14	674.0E-06	19.1	73.2	134.5	7.4	226.5	15.0	1.019	1.045	1.066	0.408
15	661.6E-06	185.3	88.2	318.2	1.2	48.2	1.3	1.005	1.027	1.035	0.666
16	538.0E-06	274.9	29.4	136.0	53.3	16.7	20.0	1.005	1.025	1.033	0.666
17	573.4E-06	119.3	48.9	314.3	40.1	218.0	7.4	1.012	1.032	1.046	0.440
18	697.1E-06	321.6	68.5	140.6	21.5	230.7	0.3	1.010	1.026	1.037	0.456
19	758.2E-06	8.3	81.2	138.6	5.7	229.3	6.6	1.006	1.027	1.035	0.649

20	616.8E-06	299.2	83.4	128.6	6.5	38.5	1.1	1.005	1.028	1.035	0.716
21	602.9E-06	277.0	69.0	134.7	16.9	40.9	12.1	1.010	1.021	1.033	0.343
22	722.8E-06	195.1	75.0	304.2	5.0	35.5	14.1	1.008	1.021	1.030	0.415
23	686.7E-06	223.0	65.2	125.3	3.5	33.7	24.5	1.013	1.022	1.037	0.248
24	721.7E-06	112.2	53.4	311.6	35.0	215.0	9.4	1.008	1.027	1.037	0.528
26	553.9E-06	346.0	79.8	106.2	5.2	197.0	8.8	1.007	1.021	1.029	0.494
27	658.4E-06	271.1	46.5	151.3	25.2	43.7	32.8	1.010	1.026	1.038	0.436
29	726.6E-06	144.0	63.3	281.2	20.3	17.5	16.7	1.006	1.033	1.042	0.698
30	802.0E-06	28.6	78.6	292.1	1.3	201.9	11.4	1.008	1.026	1.036	0.523

Tabla 10. Parámetros escalares de ASM de los datos obtenidos para el sector La Caimana, donde se muestra L como la lineación magnética, F como factor de forma, Pj el grado de anisotropía corregido y T la simetría de la forma (Jelinek, 1977)

7. DISCUSIÓN

El modelo de evolución del VA y sus alrededores se puede discutir a partir de los resultados obtenidos en el análisis de la Anisotropía de susceptibilidad magnética en los cuatro puntos de interés neotectónicos estudiados en el presente estudio: La Brizuela (al Este del VA) relacionado con el proceso de fallamiento de la falla La Mosca; Yarumalito y La Tablaza (al Oeste del VA) relacionados con el sistema de fallas Romeral específicamente el ramal de San Jerónimo; y La Caimana (al Oeste del VA en el valle del Cauca), relacionado con la falla Cauca W. Como se puede observar en la figura 13, las diferentes secciones analizadas muestran muy buenos patrones de lineaciones magnéticas con dirección NW-SE para La Brizuela y Yarumalito, una foliación magnética para la Caimana en dirección NW-SE. En el caso de la Tablaza se interpretó a partir del sistema de falla principal.

Considerando el contexto regional el evento compresional NW-SE actual que se encuentra reflejado en un fallamiento regional dextral de rumbo con componente normal, el cual está sectorizado en Valle de Aburrá y sus alrededores de tipo Riedel (Riedel, 1929) formada a partir de un conjunto de varias estructuras tectónicas principales como lo son: La falla Palestina (Flanco Oriental de la Cordillera Central), Falla Romeral (Eje de la Cordillera Central) y Falla Cauca (Flanco Occidental de la Cordillera Central), los cuales generan esfuerzos y actividad neotectónica ampliamente reportada por diferentes autores (ver referencias en la Tabla 1).

Neotectónica en el Oriente cercano del VA

En el Oriente cercano al VA, el sector la Brizuela está asociado a un elipsoide triaxial, bien definido y una deformación tipo oblato con un posible origen intermedio tipo III con base en la clasificación de Robión, 2007; con una herencia sedimentaria según la distribución de los K_1 , K_2 y K_3 se puede definir un lineamiento casi horizontal por la dirección del K_{max} y una foliación perpendicular a este donde $K_1 > K_2 - K_3$. Los valores de BZ1 y BZ2 son comparados con el sector BZ3, donde los sedimentos se encuentran en posición horizontal, mostrando aun así un elipsoide

de deformación medio, que sigue una tendencia de deformación mencionada anteriormente. Indicando que la respuesta de este sector ante la geodinámica actual, genera esfuerzos en dirección NW, para σ_1 (Figura 40) reflejando un elipsoide alargado en este sentido y un acortamiento en el NE. Al comparar el azimut de los ejes de deformación máximos y mínimos para los elipsoides medios del bloque techo y el bloque piso de este sector, y proyectarlos sobre el plano de falla, es posible identificar una componente de rumbo en sentido dextral. Además, dado que en el campo se observó un desplazamiento normal, este sector de la Brizuela, y los depósitos cuaternarios asociados a terrazas aluviales de la quebrada La Mosca, muestran una deformación asociada a una falla secundaria que corta a esta falla con una geometría N87W/3SW y una cinemática normal con componente dextral (falla La Brizuela) (Figura 39). Los valores de tensores medios para BZ1 +BZ2 están dados por K_{max} de 1.036 con azimut/inclinación (A/I) de 221/19.4, K_2 con 1.000 y un (A/I) de 77.2/66.5 y K_3 de 0.964 con un (A/I) de 315/12.1, con un error estándar de 77.98E-06 y para BZ3 son: K_{max} de 1.009 con azimut/inclinación (A/I) de 181.8/40.4, K_2 con 1.004 y un (A/I) de 10.5/49.3 y K_3 de 0.986 con un (A/I) de 275/4.3, con un error estándar de 48.12E-06

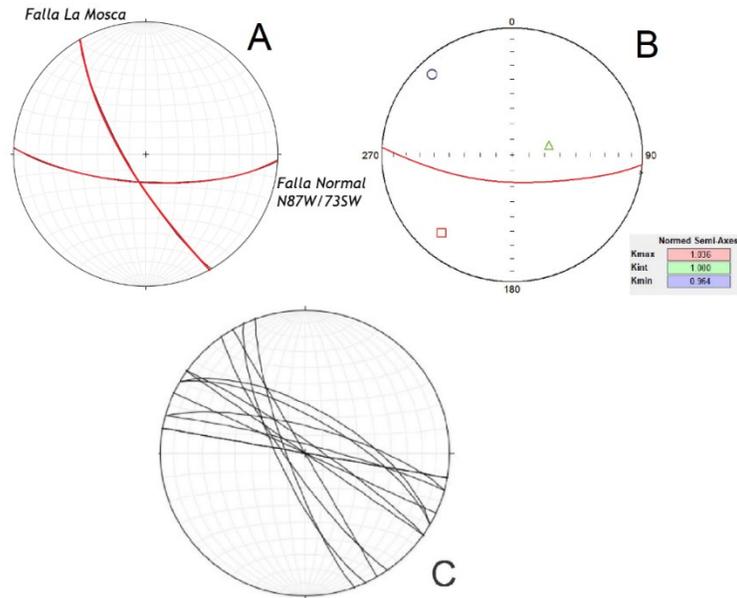


Figura 39. Proyecciones estereográficas de los datos estructurales obtenidos en el estudio. (A) Falla La Mosca. (B). Zona El Salado (Tomado de 14 datos), (C). Falla normal La Brizuela con datos de ASM

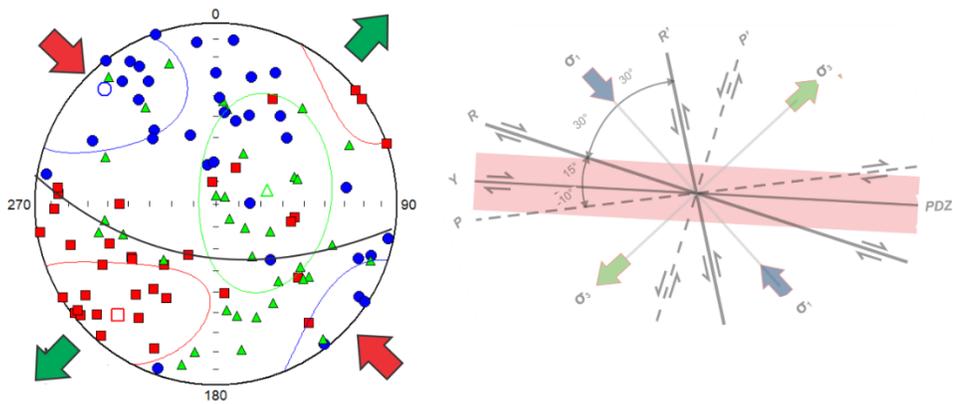


Figura 40. Diagrama de esfuerzos para la zona La Brizuela y modelo de Riedel

Neotectónica en el Occidente del VA

En el sector del Occidente cercano al VA, llamado Yarumalito, se observan los valores de grado de anisotropía más bajos de todos los sitios analizados, posiblemente esto está asociado a un

fallamiento secundario y con una poca deformación (Desplazamiento de la falla normal), demostrada en el afloramiento. La dirección de las estructuras principales tiene dirección N-NW (Figura 41A). En el afloramiento estudiado se encontró una falla de tipo normal en dirección N85W/75SW. Los tensores medios arrojan una fábrica magnética de origen tectónico de tipo VI con k_1 de 1.004 con Azimut/Inclinación (A/I) de 38.1.0/71.4, k_2 de 0.999 con A/I de 219.2/18.6 y k_3 de 0.997 con A/I de 129.1/0.3 con un promedio de susceptibilidad de 450.5E-06 SI y un Error estándar en la susceptibilidad de 202.9E-06 SI, y una lineación subvertical definido por $K_1 > K_2 \sim K_3$ con el tensor k_3 en dirección hacia el NW definiendo la dirección σ_1 y un σ_3 en sentido NE (Figura 41B). El σ_1 con respecto a la falla normal muestra que no es perpendicular a ella, sino que existe un pequeño desplazamiento en sentido horario mostrando así un desplazamiento lateral derecho (dextral) y una componente de tipo normal, esto en el Modelo de Riedel se expresaría la estructura principal la falla San Jerónimo con una dirección NW-SE y con un movimiento de Rumbo sinistral. (Figura 42).

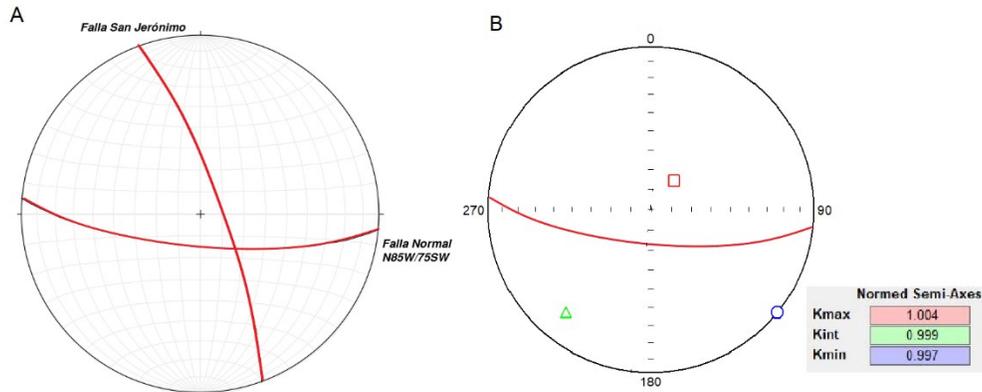


Figura 41.(A). Falla San Jerónimo y Falla en Yarumalito (B). Falla en Yarumalito con Tensores medios para los datos obtenidos por ASM

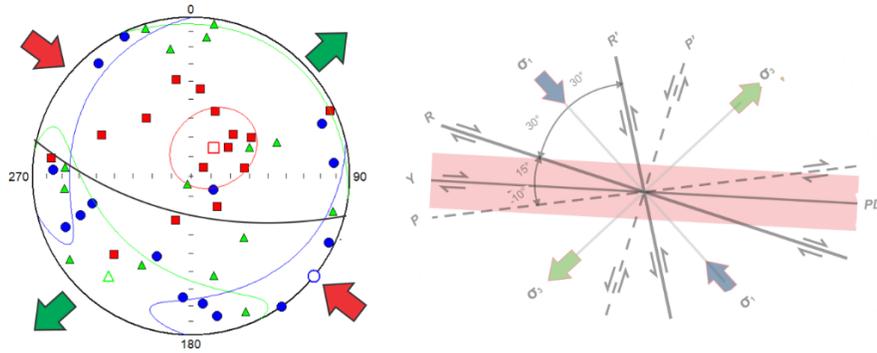


Figura 42. Diagrama de esfuerzos para la zona Yarumalito y modelo de Riedel

En el sector de la Tablaza se trabajaron depósitos afectados por la zona de deformación de la Falla San Jerónimo (falla la con una dirección N20W y una componente de rumbo sinistral). se puede identificar por la distribución de los tensores medios que tiene una fábrica magnética de origen tectónico tipo VI, con k_1 de 1.007 con Azimut/Inclinación (A/I) de 244.0/762.9, k_2 de 1.000 con A/I de 151.6/1.2 y k_3 de 0.993 con A/I de 60.9/27.0 con un promedio de susceptibilidad de $186.7.9E-06$ SI y un Error estándar en la susceptibilidad de $114.8E-06$ SI. y una dirección de σ_1 hacia NW y σ_3 en sentido NE-SW (Figura 43), el σ_1 definido por la foliación, tiene dirección en el mismo sentido a la falla San Jerónimo, con una variación en sentido antihorario posiblemente creando fallamiento de tipo Riedel (R) que presentaría un comportamiento de rumbo lateral izquierdo (Sinistral) y con componente inversa (Figura 44). Es de aclarar que, por los pocos datos suministrados en este punto, puede presentar un resultado difuso ya que se muestreo con el mínimo permitido.

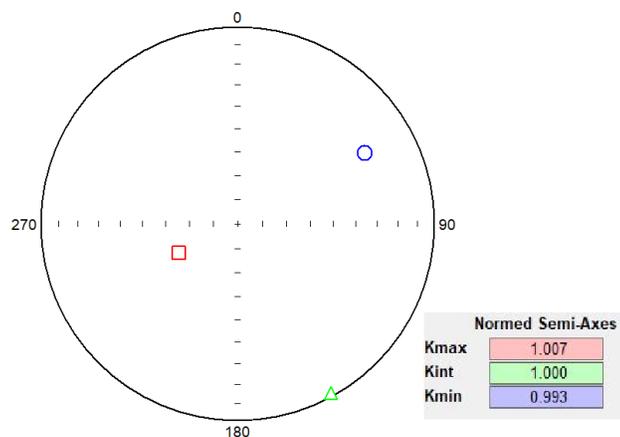


Figura 43. Diagrama de tensores medios para ASM de La Tablaza

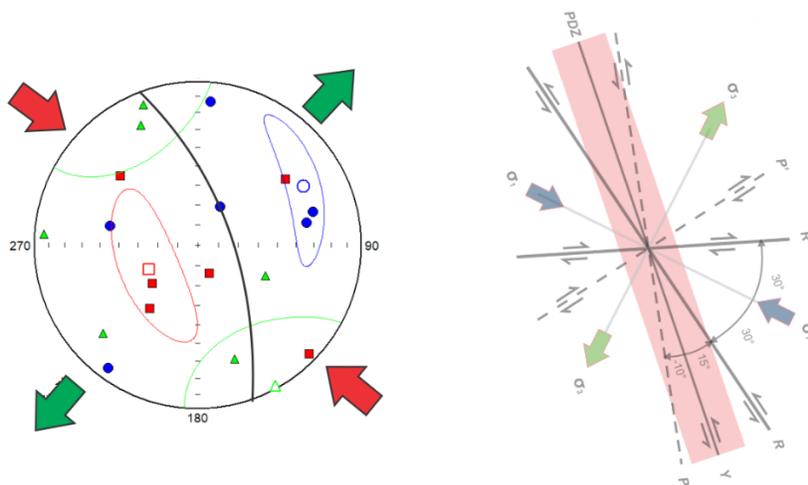


Figura 44. Diagrama de esfuerzos para la zona La Tablaza y modelo de Riedel

Finalmente, hacia el sector de la Caimana, lugar de influencia de la falla Cauca W con la Falla San Jerónimo (Figura 13). Para el sector Oeste del valle, este es el punto con respecto a los demás a lo largo de la traza de Falla San Jerónimo con mayor grado de anisotropía, pero aun así promedia una anisotropía baja, lo que nos indica, que, hay una mayor deformación, a esto le añadimos que en el afloramiento no se presentaba rasgos de falla, pero se tomó como punto de interés debido a la

ubicación con respecto a la Zona de Falla de Romeral. Los valores tensores medios en el elipsoide indican que la fábrica magnética de origen tectónico de tipo VI, k_1 de 1.010 con Azimut/Inclinación (A/I) de 115.0/82.8, k_2 de 1.006 con A/I de 308.3/7.0 y k_3 de 00.984 con A/I de 218.1/1.6 con un promedio de susceptibilidad de 702.0E-06 SI y un Error estándar en la susceptibilidad de 139.8E-06 SI, En este caso, la deformación sobre sedimentos Holocenos de La Caimana estaría mostrando un plano de foliación y un fallamiento normal con rumbo predominante en sentido NW definida por $K_1 \sim K_2 \gg K_3$ (Figura 45). Es posible que exista una componente de rumbo debido al bajo buzamiento del valor mínimo de ASM, pero no es posible indicar su sentido, aunque el modelo Riedel sugiere una componente netamente vertical (Figura 46).

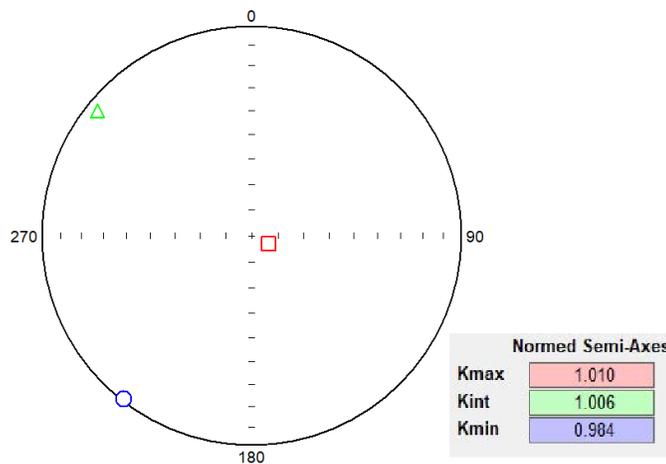


Figura 45. Diagrama de tensores medios para ASM de La Caimana

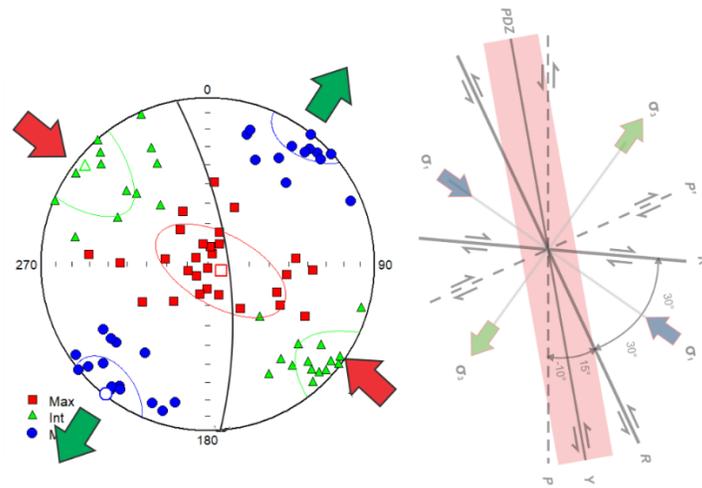


Figura 46. Diagrama de esfuerzos para la zona La Caimana y modelo de Riedel

Integración de resultados de ASM con el modelo de evolución del Valle

Con base en los análisis de ASM obtenidos para los puntos neotectónicos en estudio y la interpretación estructural de los mapas obtenidos, se infiere que la actividad tectónica asociada al oriente y occidente del Valle de Aburrá presentan una dinámica geometría y cinemática de fallamiento diferente a escala local. Sin embargo, los resultados de la estimación de los campos de esfuerzos, basados en el modelo de cizallamiento Riedel, indican vectores de acortamiento medios en sentido NW-SE, que indicarían un control tectónico regional para cada uno de los puntos analizados.

Los resultados obtenidos entre los dos sectores analizados a ambos lados del Valle de Aburrá, indican que el grado de anisotropía obtenido para la parte del oriente antioqueño es baja y para el occidente es un poco mayor, el cual, se relaciona a la reología de los materiales y a la densidad de lineamientos (Arbeláez, 2019), ya que la zona occidental presenta un fuerte control de la zona de deformación de Romeral (Vinasco, 2019) con una gran influencia de la falla San Jerónimo y la falla Cauca Oeste, mientras que el sector oriental posee menores grados de deformación debido a la litología contrastante asociada al batolito Antioqueño y a sus valores bajos de anisotropía mecánica comparada con la zona occidental.

En general, aplicando el modelo de Riedel para los puntos de interés sobre la Zona de Deformación de la Falla San Jerónimo y Cauca se obtiene como resultados un tensor de esfuerzos con dirección NW-SE. En general se observa que el modelo Riedel en los sectores de La Brizuela y Yarumalito, presentan campos esfuerzos (con desplazamiento de rumbo sinestral) y generación de estructuras secundarias (con desplazamiento de rumbo dextral) muy similares, indicando que a lado y lado del valle está siendo dominado por el “mismo” campo de esfuerzos regional, esto mismo se ve reflejado en La Tablaza, pero no se observaron estructuras secundarias. Para La Caimana que es predominado por la falla Cauca muestra un campo de esfuerzos similar (Figura 47) con un posible movimiento sinestral definido por el modelo de Riedel en el sistema de falla principal en dirección N-S a NNW-SSE (Figura 46).

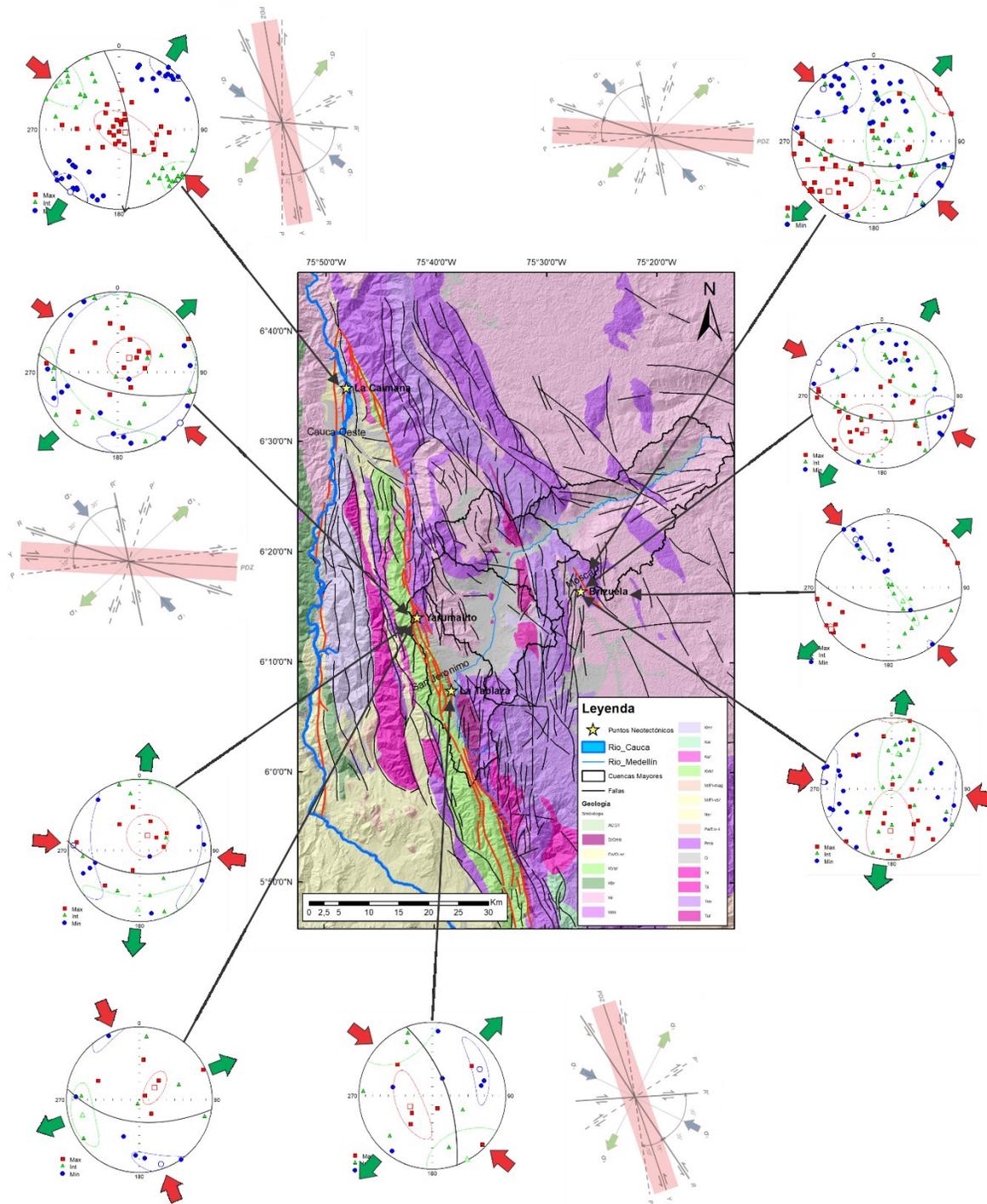


Figura 47. Campos de esfuerzos para los puntos neotectónicos con modelo Riedel.

En el modelo propuesto por Mariño y Duque (2017), a partir de datos de fallamiento, en los cuales cada set de datos se encuentra conformados por el rumbo y buzamiento del plano de falla, y el “Trend” y “Plunge” de los indicadores cinemáticos localizados dentro del plano. En dicho estudio, fueron medidos más de 40 planos de falla a nivel de afloramiento rocoso con sus respectivos indicadores (estrías de falla, fibras minerales, steps y “plught marks”, entre otros). algunos resultados indican vectores de compresión consecuentes con el modelo presentado en este trabajo (Figura 48) al menos para el sector occidental, donde predomina la deformación asociada a las fallas San Jerónimo, Iguana-Boquerón, entre otras asociadas a la zona de deformación de Romeral (Figura de Mariño).

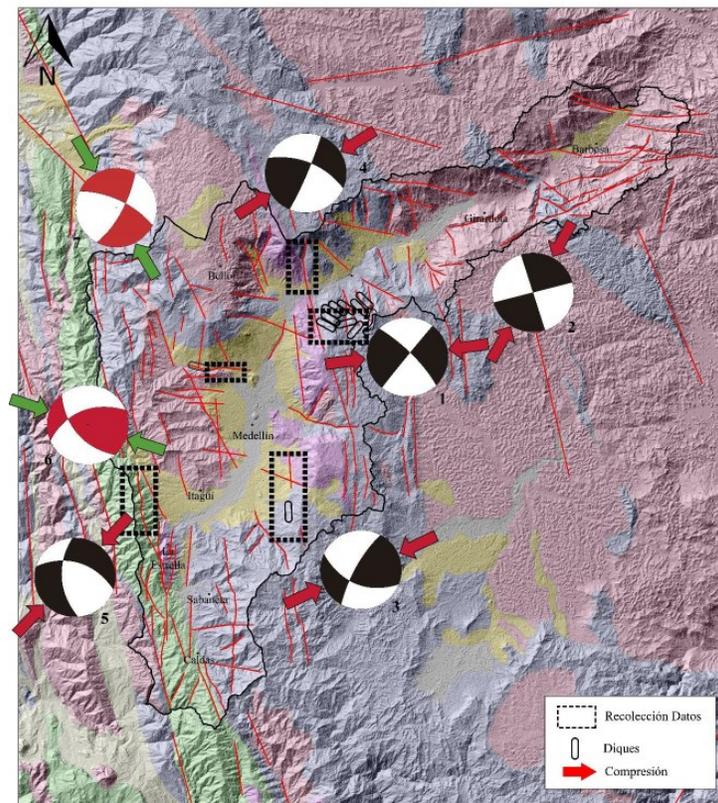


Figura 48. Resultados de los análisis de población de fallas propuestos por Mariño y Duque-Trujillo (2017) indicando dos familias de campos de esfuerzos (verdes y negras), dentro de las cuales se encuentran valores consecuentes (verdes) en el extremo occidental del valle, respecto a los datos presentados en este trabajo.

Finalmente, los datos de geodesia satelital y deformación cortical de escala regional (Figura 49) proporcionados por Noquet et al. (2014), Kirby (2016), Mora-Páez et al., (2019) son consecuentes con los resultados de ASM y análisis estructural presentados en este trabajo, además de los propuestos por Rendon (2003), Arbeláez (2019), y parcialmente los presentados por Mariño-Duque (2017). Este marco de deformación reciente se observa a escala local para cada uno de los puntos de interés neotectónico analizados, además de su integración en conjunto con los modelos de deformación propuestos para el VA, y con el desplazamiento relativo del bloque Norandino en relación con el desplazamiento de las placas Nazca, Caribe y el bloque Panamá-Chocó. De esta manera, se plantea que los resultados de ASM son fundamentales para arrojar nuevos datos en relación con la deformación reciente sobre fallas activas cuyo control temporal viene definido por la ocurrencia de desplazamientos en depósitos cuaternarios, constituyendo una fuente de información esencial para el mejoramiento de los modelos de evolución tectónica del VA, así como su aplicación en la evaluación de la amenaza sísmica de la región.

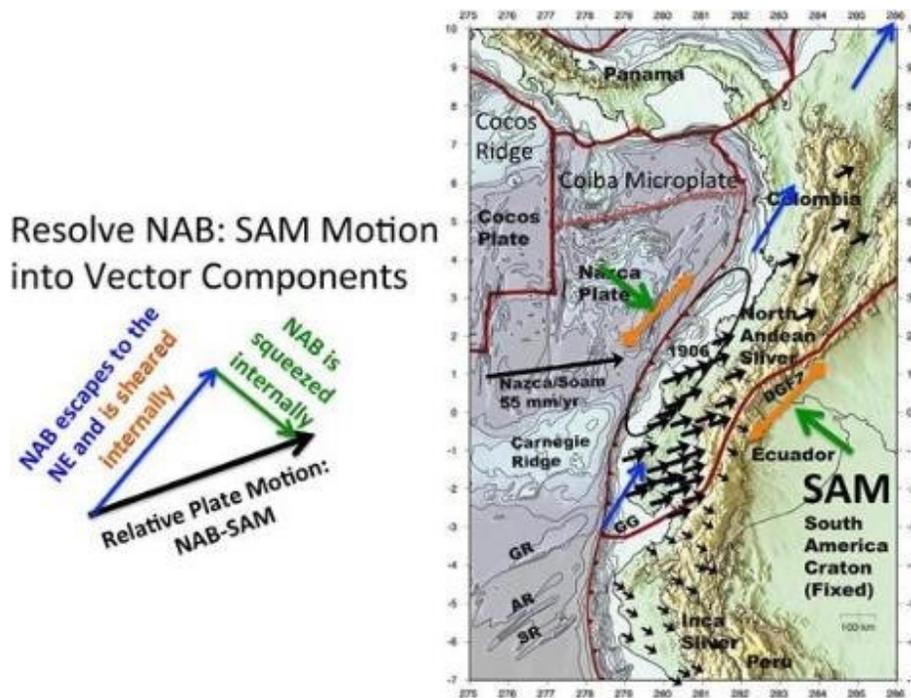


Figura 49. Modelo basado en resultados de geodesia satelital y deformación cortical de escala regional de Kirby (2016) con referencia de Noquet et al. (2014)

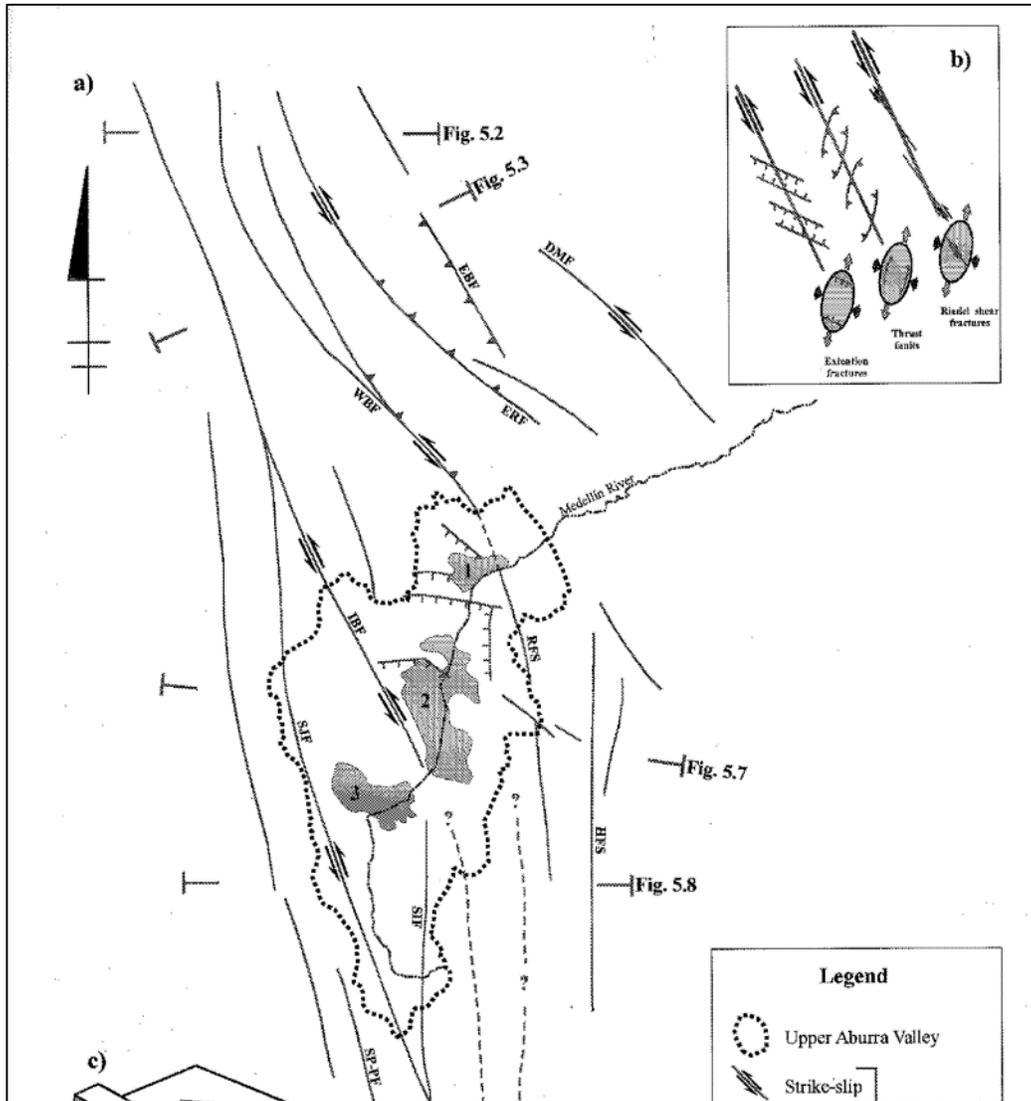


Figura 50. Modelo del Valle de Aburrá Propuesto por Rendón (2003)

Nuestros resultados, adicionalmente apoyan las conclusiones obtenidas en otros estudios realizados al interior del semillero de investigación en Geología Regional y Geoquímica de la Universidad EAFIT, específicamente por Arbeláez (2019). En dicho trabajo, los análisis de morfometría y morfotectónica de las cuatro subcuencas tectónicas que lo conforman, proponen

que el VA es una depresión topográfica de origen tectónico-erosional, dentro del se cual establecen ciertos factores que proponen actividad neotectónica como lo son: alteraciones en la red de drenaje, cambios en el nivel base, basculamientos y una acumulación de esfuerzos, siendo el sector occidental el de mayor afectación. Los índices morfométricos, más específicamente el índice de asimetría (AF) arroja información para detectar el basculamiento tectónico de las cuencas, el factor de simetría topográfico transversal (T) y la densidad de lineamientos (DI).

Finalmente, los puntos de interés neotectónico que se analizaron en el VA y alrededores se encuentran relacionados al modelo generado por Rendon (2003) (Figura 50), en el cual expresa un direccionamiento de esfuerzos principales, la respuesta del sistema de fallas al Oeste y como estas influyen en la creación de las cuencas del valle de Aburrá, que estarían controlando el sistema de esfuerzos como lo es el caso de la falla San Jerónimo, que genera deformación y un control estructural para la cuenca de Itagüí, generando basculamiento hacia el oriente con factor de asimetría de 31.99% por Arbeláez (2019), controlado por la concentración de lineamientos en la zona con valores bajos de densidad de drenaje que indican potenciales de permeabilidad asociadas a fracturamiento y fallamiento en la zona; verificando la deformación neotectónica reciente analizada en los puntos La Tablaza y Yarumalito. Esta DI es máxima para la cuenca de Itagüí con valores de 0,72 que estaría relacionado con los niveles de afectación estructural, la zona oriental mantiene un grado de deformación menor si se compara con la zona occidental, causado principalmente por la reología de los materiales y la DI por Arbeláez (2019), que presentaría una menor deformación argumentado también con los datos obtenidos de ASM para el sector La Brizuela (Figura 47).

De acuerdo con lo anterior, en el presente proyecto de investigación el estudio de ASM en los sitios de interés neotectónico mencionados, nos permitió corroborar la **hipótesis** de que la aplicación del método de ASM en los depósitos cuaternarios deformados del Valle de Aburrá y sus alrededores, se convierte en una técnica de aproximación confiable que permite documentar los elipsoides de deformación y estimar los campos de esfuerzos actuales a lo largo de fallas con desplazamiento recientes, corroborando el modelo propuesto por Rendon (2003) (Figura 50) y

actualizado por Arbeláez (2019) y los datos de Noquet (2014) y Kirby (2016) (Figura 49), arrojando información de gran relevancia para la evaluación de la amenaza sísmica del Valle de Aburrá. Por lo tanto, se recomienda la implementación de la técnica al resto de sitios identificado en el inventario con el fin de validar aún más el modelo de esfuerzos regional.

8. CONCLUSIONES

La anisotropía de susceptibilidad magnética, permitió realizar el estudio neotectónico de 4 puntos asociados a tres fallas (Cauca-Oeste, Falla San Jerónimo y La Mosca) del cual consolida que es un método de gran importancia para determinar o hacer inferencias sobre la expresión morfotectónica de los depósitos del cuaternario, asociada principalmente a deformaciones, producto de estructuras geológicas presentes, con un amarre temporal que permite hacer una aproximación para determinar deformaciones y consolidar y crear modelos nuevos de evolución.

A partir de estos resultados de ASM se puede inferir sobre la evolución del VA para cada uno de estos puntos de interés, que permitieron a su vez correlacionar estos resultados con los modelos propuestos por Rendón, 2003 y Arbeláez, 2019. Considerando en un contexto regional los esfuerzos en dirección NW-SE para el VA consolidado por los puntos de análisis para el sector La Caimana, Yarumalito, La Tablaza y La Brizuela, producto del empuje del Bloque Panamá-Chocó contra la margen noroccidental de Sudamérica, el cual consolida este modelo propuesto para el régimen de esfuerzos.

De igual forma, se determinó también la similitud en la dinámica de estos esfuerzos para el Este y Oeste del VA, exhibiendo de igual forma un comportamiento diferente en sentido de magnitud, mostrando así una mayor deformación asociada al lado Oeste del VA debido a la densidad de lineamientos predicha por Arbeláez, 2019, la cual generaría también el mayor basculamientos asociado a esta zona. La diferencia de las magnitudes de deformación es generada principalmente

por la reología de los materiales en las zonas estudiadas que es controlada por el Batolito Antioqueño y rocas metamórficas para el Oeste.

Esta diferencia encontrada es justificada también por los resultados obtenidos, dentro de los cuales para zona del oriente cercano se obtiene una fábrica intermedia con herencia sedimentaria producto de los sedimentos asociados a este sector, con una fábrica triaxial definidamente, mientras que para la zona del Occidente se obtiene como resultados una fábrica tectónica tipo VI asociada a un elipsoide triaxial.

9. REFERENCIAS

- AGICO., 2011. Manual, U., 2011. User manual Kapabridge Control Software. pp, 73-77. https://doi.org/10.1007/springerreference_28001.
- Álvarez, M., Ordóñez-Carmona, O.V. Marín, M. y Hernández, A.R., Geología de la zona de influencia de la Falla Otú en el distrito minero Segovia-Remedios, DYNA, 74(153), pp. 41-51, 2007
- Almeida, J., Villamizar, F., Petrografía y geoquímica del Batolito Antioqueño en un sector del Municipio de Santa Rosa de Osos, Antioquia. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, pp. 2012
- Álvarez, A., Geología de la Cordillera Central y el Occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Meso-Cenozoicos. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras 26,1983
- Álvarez., C. Trujillo., R., Estudio geomorfológico y estructural del Valle de Aburrá (Zonas 5 y 6). Universidad nacional de Colombia. Facultad de minas. 1985
- Alva-Valdivia, L.M., Agarwal, A., Caballero-Miranda, C., García-Amador, B.I., Morales-Barrera, W., Rodríguez-Elizarráz, S., Rodríguez-Trejo, A., Paleomagnetic and AMS studies of the El Castillo ignimbrite, central-east Mexico: Source and rock magnetic nature. J, pp. 140–154, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.02.014>.

- Aramburo, D. A., 2013. Principales fallas de Colombia: Una aproximación a la Geología Regional del País
- Arias, A., 2003. La diversidad del relieve y de los suelos en el altiplano de Santa Rosa de Osos (Antioquia): sus significados ambientales. *Boletín Ciencias de la Tierra*. No.15.
- Arias., A, 1996, Altiplanos y cañones en Antioquia: Una mirada genética. *Revista Facultad de Ingeniería: Universidad de Antioquia*, 12, pp. 84–96.
- Aristizabal, E., 2004. Geomorphological evolution of the Aburrá Valley, Northern Colombian Andes, and implication for landslide occurrence. Tesis de Maestría, Universidad de Shimane. Japón.
- Aristizabal, E., Yokota, S., Ohira, H., & Hagai, J, 2004, Dating of slope sediments and alluvial deposits in the Aburra Valley, Colombia. *Geoscience Rept. Shimane University.*, 23, pp. 85–88.
- Aristizábal, E., & Yokota, S. 2006. Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá, *DYNA*, 73(149), pp. 5-16.
- Aristizábal., E., & Yokota, S. 2008. Evolución geomorfológica del valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, pp. 5-18
- Arzadún, G., Tomezzoli, R., Tickyj, H., Cristallini, E., Gallo, C, 2018. Visión tectónica en el límite suroeste de Gondwana Basada en la anisotropía de susceptibilidad magnética. Doi:10.5772/intechopen./72825
- Arbelaez, C., 2019., Contribuciones desde la geomorfometría y la geomorfología tectónica: Valle de Aburrá, Cordillera Central de Colombia., Proyecto de grado, Universidad EAFIT.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá AMVA, 2002. Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá. Reporte Interno. Medellín.
- Aspden, J. A., W. McCourt, and M. Brook, 1987, Geometrical control of subduction-related magmatism: The Mesozoic and Cenozoic plutonic history of western Colombia: *Journal of the Geological Society, London*, v. 144, p. 893–905.

- Botero, G. (1963). Contribución al Conocimiento de la Geología de la Zona Central de Antioquia. Anales de la Facultad de Minas, Medellín, Numero 57, 101
- Burgin, H., Amrouch, K., Robion, P., kulikowski, D. 2019. An integrated approach to determining 4D stress development at Castle Cove. The APPEA Journal 59(1), pp. 410-425 <https://doi.org/10.1071/AJ18173>.
- Burbank, D., Anderson, R. 2011. Geomorfología tectónica- Segunda edición. DOI: 10.1002 / 9781444345063.
- Bustamante, M. y Velásquez, A., 1984. Actividad tectónica cuaternaria y recomendaciones para la amenaza sísmica en el Valle de Aburra. I Conferencia de Riesgos en el Valle de Aburra.
- Casas, J.M., Parés, J.M., y Megías, L., La fábrica magnética de los materiales Cambroordovícicos de la parte Oriental del anticlinal de La Massana (Andorra, Pirineo Central). Sociedad Geológica de España 11 (3-4), pp. 317 – 329. 1998.
- Cediel, F., Shaw R.P., and C. Cáceres. 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffer, and J. Blickwede, eds., The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79.
- IGAC., 2010., Proyecto Cartografía de Antioquia (Corantioquia)
- Cornare, 2014. Instituto Humboldt – Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare - CORNARE 014.Convenio de Cooperación No. 13-13-014-224CE
- Cortés, R., Observaciones y descripciones petrológicas y estructurales asociadas al tramo meridional de la Falla Palestina, Geología Colombiana, 17, pp. 211-218, 1990. DOI: 10.15446/gc
- Consorcio Microzonificación (Solingral S.A., Integral S.A., Inteinsa, Universidad EAFIT, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín), 2006. Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe Final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

- Cortés, M. y Angelier, J., 2005. Current states of stress in the northern Andes as indicated by focal mechanisms of earthquakes, *Tectonophysics*, 403(1-4) pp. 29-58. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.03.020
- Cuadros, M., 1987. Estudio geomorfológico y estructural del Valle de Aburrá. Trabajo dirigido de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
- Chincangana, C., 2005, The Romeral Faults system: A shear and deformed extinct subduction zone between oceanic and continental lithospheres in northwestern South America, Vol 9, pp. 51-66.
- Durango, J., 1975. Terrazas del valle del río Negro y sus afluentes. Proyecto de Grado I. Universidad Nacional. Facultad de Minas. Medellín, pp. 56-60.
- Ego, F., Sebrier, M., Lavenu, A., Yepe, & Eguez, A. 1996; Quaternary state of stress in the Northern Andes and the restraining bend model for the Ecuadorian Andes: *Tectonophysics*, 259, pp. 101 – 116
- Feininger, T. & Botero, g. (1982). The Antioquian Batholith, Colombia. publicaciones geológicas especiales del ingenieros 12, pp.1-5
- García., C., 2006, Estado del conocimiento de los depósitos de vertiente del Valle de Aburrá, *Boletín de Ciencias de La Tierra*, pp. 99-102,
- Gallego., J., 2013, Análisis geomorfológico como apoyo a la búsqueda de actividad neotectónica en el oriente antioqueño (oriente cercano a la ciudad de Medellín), pp. 6-50.
- Grupo de Sismología de Medellín, 2002, Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones.
- Hermelin, M., 1992, Los suelos del oriente antioqueño: un recurso no renovable. *Bulletin - Institut Francais d'Etudes Andines*, Vol, 21, pp. 25-36.
- Hermelin, M., 1977. Estudio Geomorfológico del Valle de Aburrá y del Oriente Cercano: informe preliminar. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 31 P
- Hermelin, M., 1982., El origen del valle de Aburrá: evolución de ideas. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, pp.7–8.

- Hrouda, F., Faryad, S.W., Magnetic fabric overprints in multi-deformed polymetamorphic rocks of the Gemic Unit (Western Carpathians) and its tectonic implications. *Tectonophysics* 717, pp,83–98. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.07.003>
- Integral. (1982). Aprovechamiento múltiple del Río Grande. Estudio geológico y evaluación preliminar del riesgo sísmico.
- INGEOMINAS, Geología de la Plancha 147 Medellín Oriental. Explicación del mapa geológico (escala 1:50.000). Medellín. 1415 P. 2005.
- James, M., 1982. Rasgos superficiales y datos geomorfológicos que favorecen un origen tectónico para el Valle de Aburrá: Resúmenes IV Congreso Colombiano de Geología.
- Jelinek, V., 1881. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*. pp, 30-50. 1981. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90110-4).
- Jelinek, V., 1977. Estadístico procesamiento de anisotropía de susceptibilidad magnética medido en grupos de especímenes
- Jian g, Z., Li, L., Song, Y., Tian, F., Zhao, M., Wang, H., Zhao, Z., Control of neotectonic movement on hydrocarbon accumulation in the Kuqa Foreland Basin, west China. *Pet. Sci.* 7, pp. 49–58. 2010. <https://doi.org/10.1007/s12182-010-0006-z>.
- Kirby, S., 2016. Construcción activa de montañas tectónicas y volcánicas como agentes de rápidos cambios ambientales y una mayor diversidad de orquídeas y dispersión de orquídeas a larga distancia en las Américas tropicales: oportunidades y desafíos. Vol, 16. DOI: [10.15517 / lank.v16i2.26027](https://doi.org/10.15517/lank.v16i2.26027)
- Lalinde, C., 2004., Geología de campo en el área de la presa La Fe. Informe inédito presentado a HMV Ingenieros, para la evaluación de la amenaza sísmica para la Presa La Fe. Realizado para EEPP.
- Levi, T., Weinberger, R., & Marco, S., Magnetic fabrics induced by dynamic faulting reveal damage zone sizes in soft rocks, Dead Sea basin. *Geophysical Journal International*. 2014. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu300>
- Londoño, A., Geoformas Asociadas al Batolito Antioqueño. *Geología de Colombia*. EAFIT, Volumen 23, pp. 133-145, 1998

- López, M. C., 2006. Análisis de deformación tectónica en los piedemontes de las Cordilleras Central y Occidental, Calle del Cauca, Colombia - contribuciones paleosísmicas.
- Lüschen, E.; Muckelmann, R. y otros, 1984. Investigaciones gravimétricas y geomagnéticas en el Valle de Aburrá y sus alrededores: Revista Universidad EAFIT, No. 54. pp. 7-25
- Marín-Cerón M.I., Leal-Mejía H., Bernet M., Mesa-García J. (2019) Late Cenozoic to Modern-Day Volcanism in the Northern Andes: A Geochronological, Petrographical, and Geochemical Review. In: Cediel F., Shaw R.P. (eds) *Geology and Tectonics of Northwestern South America*. *Frontiers in Earth Sciences*. Springer, Cham. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_8
- Maffione, M., Pucci, S., Sagnotti, L., & Speranza, F., (2012)., Magnetic fabric of Pleistocene continental clays from the hanging-wall of an active low-angle normal fault (Altotiberina Fault, Italy). *International Journal of Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s00531-011-0704-9>
- Mariño, O.M & Duque-Trujillo, J. (2017). Caracterización de la cinemática y cálculo de paleotensores de esfuerzo para el conjunto principal de fallas en el valle de Aburrá, implicaciones tectónicas
- Maya, M & González H., 1995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Bol. Geol., INGEOMINAS* Vol. 35 No. 2-3, pp. 44-57. Bogotá.
- McCalpin, J. P. (2013). Neotectonics. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_252.
- Mora-Páez, H., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T., Mencin, D., Fernandes, R.M.S., Diederix, H., LaFemina, P., Cardona-Piedrahita, L., Lizarazo, S., Peláez-Gaviria, J.R., Díaz-Mila, F., Bohórquez-Orozco, O., Giraldo-Londoño, L., Corchuelo-Cuervo, Y., 2019. Crustal deformation in the northern Andes – A new GPS velocity field. *J. South Am. Earth Sci.* 89, pp. 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.002>
- Naranjo, J., 2001. Aproximación al estado del conocimiento de las formaciones superficiales y origen del Valle de Aburrá. *Memorias. VIII Congreso Colombiano de Geología*, Manizales, pp. 1-16

- Neuwerth, R., Suter, F., Guzman, C., Gorin, G., 2005. Soft-sediment deformation in a tectonically active area: The Plio-Pleistocene Zarzal Formation in the Cauca Valley (Western Colombia), pp. 1-22.
- Ordoñez, O., 2005. Generalidades del sistema de fallas de Romeral en las cercanías a Medellín
- Ordoñez, O., Pimentel, M., Laux, J. 2007. Edades U-Pb del Batolito Antioqueño. Universidad Nacional de Colombia.
- Ordoñez, O., Pimentel, M. 2001. Consideraciones Geocronológicas e Isotópicas del Batolito Antioqueño. Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, pp. 1-6.
- Ochoa, M. E., (1974). Glaciación al noroeste de Medellín. Anales de la Facultad De Minas. Número 58, pp 110- 117.
- Palacio, F., 1987. Origen invertido erosivo del Valle de Aburrá: I Seminario Gerardo Botero A., Medellín, pp. 123-133
- Passchier, C. W., & Trouw, R. A. J. (2005). Microtectonics. Microtectonics. pp, 4-7 <https://doi.org/10.1007/3-540-29359-0>
- Page, W. y James, M., 1981. The antiquity of the erosion surfaces and late Cenozoic deposits near Medellín, Colombia: Implications to tectonics and erosion rates". Revista CIAF, Vol. 6. No. 1-3. pp. 421-454.
- Piedrahita, V., Tarazona, A., Bernet, M., Chadima, M., Sierra, G. 2019. Permian Palmitas protomylonitic granite, magnetic fabric, petrography and timing of exhumation. Northern Andes, Colombia.
- Piedrahita, V., Bernet, M., Chadima, M., Sierra, G., Marín, M., Toro, G. 2017. Detrital zircon fission-track thermochronology and magnetic fabric of the Amaga Formation (Colombia): Intracontinental deformation and exhumation events in the northwestern Andes. pp, 31-40.
- Posada, G., Monsalve, G., & Abad, A.M. (2017). Construcción de mecanismos focales en el norte de la Cordillera Central colombiana a partir de registros de la Red Sismológica Nacional de Colombia. Boletín de Ciencias de La Tierra.

- Rendón, A., Caballero, H., Arias, L., González, A., Arenas, J., Gallego, J., 2011, Estudio geológico-geomorfológico en el oriente cercano a Medellín, como apoyo a la búsqueda de actividad tectónica reciente. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 29, pp. 39-53.
- Rendón-Rivera, A. D. J., Gallego-Montoya, J. J., Jaramillo-Rendón, J. P., González-Patiño, A., Caballero-Acosta, J. H., Lalinde-Pulido, C. P., & Arias-López, L. A. GRUPO GEA (2015). Neotectonic activity and paleoseismological analysis in Eastern of Antioquia, in the vicinity of Medellín city - Colombia. *Boletín de Ciencias de La Tierra*. <https://doi.org/10.15446/rbct.n37.36011>
- Rendón, D. (2003). Tectonic and sedimentary evolution of the Aburra Valley, northern Colombian Andes. Geosciences Department.
- Rendón, D.; Toro, G. y Trillos, D., 2005. Dataciones de los Depósitos de Vertiente en el Sur Oriente de Medellín; nuevos referentes para la evolución del Valle de Aburrá. Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.
- Rendón, D., Toro, G., & Hermelin, M. (2006). Modelo cronoestratigráfico para el emplazamiento de los depósitos de vertiente en el Valle de Aburrá. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 18, 103–118.
- Rendón, A., Caballero, J., Arias, A., Gonzáles, A., Arenas, J., Gallego, J. 2011. Estudio geológico-geomorfológico en el oriente cercano a Medellín, como apoyo a la búsqueda de actividad tectónica reciente. *Boletín ciencias de la tierra*.
- Restrepo, M., Foster, D., Stockli, D., & Parra, N. (2009). Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes (Colombia) from apatite (U–Th)/He thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(1–2), pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.037>
- Restrepo, J & Toussaint, J., (1984). Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. I Conferencia de Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá, pp. 1-27.
- Restrepo, J. (1991). Datación de algunas cenizas volcánicas de Antioquia por el método de trazas de fisión. *AGID reporte* 16, pp. 148-157.
- Restrepo, J. and Toussaint, J., (1988) Terranes and continental accretion in the Colombian Andes, *IGCP*, 11(3), pp. 189-193.

- Restrepo-Pace, P. A., 1992, Petrotectonic characterization of the Central Andean Terrane, Colombia: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 5, no. 1, p. 97– 116.
- Robion, P., Grelaud, S., Frizon de Lamotte, D., 2007. Pre-folding magnetic fabrics in fold-and-thrust belts: Why the apparent internal deformation of the sedimentary rocks from the Minervois basin (NE - Pyrenees, France) is so high compared to the Potwar basin (SW - Himalaya, Pakistan)? *Sediment. Geol.* 196, pp. 181–200. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.08.007>.
- Ramirez, J., Sierra, G., Marín, M., 2012. Anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) del Miembro Superior de la Formación Amaga, sección quebrada Sabaleticas, SW Antioqueño y su relación con los movimientos del sistema de fallas Romeral en el Cenozoico Tardío, pp. 126-132
- Scheibe, R., 1919. Informe sobre resultados de la Comisión Científica en Antioquia. *Compilación Estudios Geológicos Oficiales en Colombia*, pp. 97 –167
- Sillitoe, R. H., L. Jaramillo, P. E. Damon, M. Shafiqullah, and R. Escovar, 1982, Setting, characteristics and age of the Andean porphyry copper belt in Colombia: *Economic Geology*, v. 77, p. 1837–1850.
- Yokota, S. & Ortíz, E., 2003. C Dating of an organic paleosol covering gravel beds distributed along the San Jeronimo Fault, Western Medellin, Colombia, pp. 27-42.
- Salinas, I. C., 1988. Cartografía e Interpretación de Formaciones Superficiales en el Valle de Aburrá. Tesis de grado, Universidad Nacional, Medellín.
- Sierra, G.M. and Marín-Cerón, M.I., 2011. Amagá, Cauca Patía Basin. In *Petroleum Geology of Colombia*. Editor. Fabio Cediél. Vol (2) Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Soto, R., Larrasoaña, J. C., Arlegui, L. E., Beamud, E., Oliva-Urcia, B., & Simón, J. L. (2009). Reliability of magnetic fabric of weakly deformed mudrocks as a paleostress indicator in compressive settings. *Journal of Structural Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.03.006>
- Shlemon, R., 1979. Zonas de deslizamientos en los alrededores de Medellín, Antioquia (Colombia). *Boletín Geológico Ingeominas, Publicación Especial* 5, 45.

- Toro, G., Hermelin, M., Schwabe, E., Posada, B. O., Silva, D., & Poupeau, G. (2006). Fission-track dating and geomorphic evidences for long-term stability in the Central Cordillera highlands, Colombia. *Zeitschrift Fur Geomorphologie, Supplementband*.
- Toro, G., 1999. Téphrocronologie de la Colombie centrale (département d'Antioquia et abanico de Pereira). Tesis Doctoral Universidad Joseph Fourier, Grenoble-Francia.
- Toro, G. y Velásquez, A., 1984. Estudio geomorfológico y estructural del Valle de Aburrá comprendido entre el Municipio de Caldas y las Quebradas La Iguana y Santa Elena. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Universidad Católica de Oriente (UCO), 2014. Amenaza, Vulnerabilidad Y Riesgo Por Movimientos En Masa E Inundaciones Zona Urbana. Municipio De Guarne, pp. 89-151.
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W. and Beltrán, A., 2011, Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia, *Lithos*, 125(3–4), pp. 875-896, Aug. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.05.003
- Vinasco, C., Cordani, U., 2012, Episodios de reactivación del sistema de fallas de Romeral en la parte Nor-Occidental de los Andes Centrales de Colombia a través de resultados ^{39}Ar - ^{40}Ar y K-Ar. pp, 11-132
- Vinasco, C. 2019., The romeral shear zone. In *Frontiers in Earth Sciences*, pp. 83-200 https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_12
- Woodward-Clyde Consultants. 1980., Phase I: Preliminary seismic hazard study for the cañafisto dam sites, Cauca River hydroelectric project Colombia, pp.38
- Wu, Z., Hu, M., 2019. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology : terminology, applications and advances. *J. Geodyn.* 127, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.01.007>.