

Aguas subterráneas en medio fracturado y su relación con la ocurrencia de movimientos en masa en una ladera del Valle de Aburrá.

César Augusto Espinosa Espinosa

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo

Asesores:

**Ph.D. Marcela Jaramillo Uribe
Ph.D. José Fernando Duque Trujillo**

**Universidad EAFIT
Departamento de Ciencias de La Tierra
Medellín, Colombia
2019.**

Agradecimientos

Gracias a todos los profesores por todas sus enseñanzas, en especial a la profesora Marcela y al profesor José por su atención y colaboración durante este trabajo. También quiero agradecerles a los estudiantes de Maestría en Ciencias de la Tierra Sandra Patiño y Rossemberg y a mis compañeros del semillero de aguas subterráneas por sus colaboraciones en el campo.

A mis compañeros y amigos Richi, Estrada, Emilio, Santiago, Mario, Jorge, Kami, solo por nombrar a algunos, muchas gracias por su compañía y buenos deseos durante estos últimos 5 años.

Finalmente dedicarle esto a mi Familia, la gran motivación de mi vida y a Melissa por ser constante compañía y buena parte de mi inspiración.

Tabla de contenido

Resumen	1
1. Introducción	1
2. Generalidades	2
2.1. Pregunta de investigación	2
2.2. Hipótesis.....	3
2.3. Objetivo general	3
2.4. Objetivos específicos	3
3. Área de estudio.....	3
3.1. Localización	3
3.2. Marco Geológico.....	4
3.3. Marco Estructural	8
4. Métodos	9
4.1. Inventario de movimientos en masa.	10
4.2. Adquisición y análisis estadístico de base de datos hidro-estructurales	10
4.3. Análisis cinemático de estabilidad entre los planos de mayor peso hidráulico y taludes con ocurrencia de movimientos en masa.....	11
5. Resultados.....	12
5.1. Movimientos en masa Inventariados	12
5.2. Caracterización estructural	12
5.2.1. Sector W.....	14
5.2.2. Sector NW	15
5.2.3. Sector SW	15
5.2.4. Sector E.....	16
5.3. Peso hidráulico.....	18
5.3.1. Sector W.....	20
5.3.2. Sector NW	20
5.3.3. Sector SW	21
5.3.4. Sector E.....	21
5.4. Análisis cinemático de estabilidad de taludes.....	22
5.4.1. Talud km 6.....	23

5.4.2.	Talud km 7	23
5.4.3.	Talud La Colegiatura	24
5.4.4.	Talud Retorno #7	25
6.	Discusión	25
6.1.	Flujo Potencial en la Dunita de Medellín y su relación con los Movimientos en Masa	26
6.2.	Deformación Dúctil	28
6.3.	Deformación Dúctil-Frágil.....	28
6.4.	Deformación Frágil	29
7.	Conclusiones y Recomendaciones	30
	Bibliografía	31

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio. Se muestra la distribución espacial de las estaciones de control geomecánico de fracturas y de movimientos en masa, los diferentes lineamientos y la vía Las Palmas. <i>Fuente:</i> elaboración propia.....	4
Figura 2. Unidades geológicas aflorantes cerca a la zona de estudio. Fuente: tomado de Rodríguez et al., (2005). Escala 1:100.000.....	5
Figura 3. Analogía de “mega augen” utilizada por Rodríguez et al., (2005) para describir las estructuras presentes al norte de la cordillera central. <i>Fuente:</i> (Rodríguez et al. 2005).	8
Figura 4 diagrama de flujo generalizado de la metodología empleada.....	9
Figura 5. Construcción de un diagrama de análisis cinemático de estabilidad de taludes por ruptura plana. Fuente: tomado de Suárez-Burgoa (2016)	11
Figura 6. Diagrama de polos y de rosas que muestran la orientación de las familias de discontinuidades presentes en el área de estudio y el rumbo de estas respectivamente	13
Figura 7. Muestra diagrama de polos de la zona de estudio (izquierda), polos del sector W (centro) y diagrama de rosas del sector W (derecha).	15
Figura 8. Muestra diagrama de polos de la zona de estudio (izquierda), polos del sector NW (centro) y diagrama de rosas del sector NW (derecha).	15
Figura 9. Muestra diagrama de polos de la zona de estudio (izquierda), polos del sector SW (centro) y diagrama de rosas del sector SW (derecha).....	16
Figura 10. Muestra diagrama de polos de la zona de estudio (izquierda), polos del sector E (centro) y diagrama de rosas del sector E (derecha).	16
Figura 11. Distribución por sectores del fracturamiento y Pesos hidráulicos altos en la Dunita de Medellín.....	17
Figura 12. Diagrama de rosas de las direcciones de lineamientos en el área de estudio. <i>Fuente:</i> Este trabajo	17
Figura 13. Frecuencia de pesos hidráulicos para el total de discontinuidades del área de estudio, se muestra el valor de $x=2000$ (línea punteada negra)	18
Figura 14. Distribución de los pesos hidráulicos por cada uno de los 5 rangos definidos en este trabajo. <i>Fuente:</i> este trabajo.....	19
Figura 15. Densidad de polos de los mayores valores de peso hidráulico en el sector W (izquierda y centro) y ploteo del plano general de concentraciones de polos y sus respectivos lineamientos (tubificación) resultantes.	20
Figura 16 . Densidad de polos de los mayores valores de peso hidráulico en el sector NW (izquierda y centro) y ploteo del plano general de concentraciones de polos y sus respectivos lineamientos (tubificación) resultantes.	21
Figura 17 Densidad de polos de los mayores valores de peso hidráulico en el sector SW (izquierda y centro) y ploteo del plano general de concentraciones de polos y sus respectivos lineamientos (tubificación) resultantes.	21
Figura 18. Densidad de polos de los mayores valores de peso hidráulico en el sector E (izquierda y centro) y ploteo del plano general de concentraciones de polos y sus respectivos lineamientos (tubificación) resultantes	22
Figura 19. Análisis cinemático de estabilidad del talud km6	23

Figura 20. Análisis cinemático de estabilidad del talud km7	24
Figura 21. Análisis cinemático de estabilidad del talud La Colegiatura	24
Figura 22. Análisis cinemático de estabilidad del talud Retorno #7	25
Figura 23. Flujos potenciales a través de las fracturas en la Dunita de Medellín. Vista en superficie (arriba), vista a profundidad (abajo). Fuente: (corte tomado y modificado Rodríguez et al., (2005)) ..	27
Figura 24. Sistemas de fracturas ideales bajo un sistema de esfuerzos (σ_1). Fuente: Tomado y Modificado de Singhal y Grupta (2010).....	28
Figura 25 Disposición general de las familias de discontinuidades definidas en este trabajo y el esfuerzo que se infiere pueden haberlas generado.....	30

Lista de Tablas

Tabla 1 Geología del área de estudio. Se describen las principales características de las unidades aflorantes en cerca al área de estudio	6
Tabla 2 Resumen taludes inventariados	12
Tabla 3 Familia de diaclasas presentes en el segmento sur de la Dunita de Medellín y su orientación general.....	14
Tabla 4 Rangos de valores normalizados del peso hidráulico para la zona de estudio	19
Tabla 5. Orientación de los taludes con ocurrencia de movimientos en masa inventariados para este trabajo	22

Resumen

En las últimas décadas se ha puesto especial atención a los estudios hidrogeológicos en rocas cristalinas por parte de científicos, ingenieros y algunos países, dado que su permeabilidad está determinada básicamente por las diferentes discontinuidades que pueden presentar (fallas y fracturas); esto les otorga características interesantes en campos como el suministro de agua y en caso contrario como repositorio de desechos radioactivos. En muchas zonas se ha identificado una relación entre aguas subterráneas en medios fracturados con la ocurrencia de movimientos en masa como en el caso del segmento sur de la Dunita de Medellín sobre la vía Las Palmas. En este trabajo se intentó comprobar la relación entre los eventos de inestabilidad de taludes en la vía Las Palmas con la naturaleza del flujo de aguas subterráneas a través del medio fracturado y carsificado que constituye el segmento sur de la Dunita de Medellín. Para tal objetivo se realizó un análisis de fracturamiento en donde se encontraron 5 grandes familias de discontinuidades a partir de 820 datos estructurales recolectados y se calculó el peso hidráulico de cada una según la metodología de Chica (1979). Así, se establece que el potencial flujo de agua en la Dunita de Medellín ocurre con una dirección preferencial al NW y variaciones locales hacia el SE, principalmente por medio de las intersecciones de las fracturas con mayores pesos hidráulicos, identificadas aquí como lineamientos y con las cuales se hace un símil con estructuras como *pipes* (tubificaciones). Las orientaciones de las tubificaciones resultaron ser potencialmente desfavorables ante los taludes analizados dado que configuran una descarga directa del sistema de aguas subterráneas hacia los 4 taludes, esto genera una predisposición a la ocurrencia de eventos de inestabilidad en la vía Las Palmas.

1. Introducción

Las discontinuidades desde el punto de vista hidrogeológico son las estructuras geológicas más importantes en acuíferos de rocas cristalinas, debido a que facilitan el flujo y almacenamiento de fluidos a través de la roca por medio de fracturas, zonas de cizalla, planos de estratificación, entre otras. Por otra parte, pueden actuar como barreras para el agua, como en el caso de algunas fallas y diques (Singhal y Gupta, 2010) dado que pueden impermeabilizar grandes secciones de rocas en toda su extensión.

Una atención particular es puesta sobre la hidrogeología en rocas cristalinas, por un lado, por sus valores bajos de permeabilidad dado que sus características hidrogeológicas les otorga propiedades aprovechables, por ejemplo, como potenciales repositorios de desechos radioactivos (Singhal y Gupta, 2010) y por otro lado, cuando presentan una alta permeabilidad secundaria (fracturas interconectadas) en el campo de suministro de agua. Otro enfoque que han tenido los estudios de hidrogeología en este tipo de rocas es el relacionado a la influencia que los flujos de agua a través de discontinuidades pueden tener sobre la estabilidad de taludes. Sobre el tema se pueden encontrar trabajos como los de Binet et al., (2007) y Hencher (2010).

El proceso de remoción en masa como agente modelador del paisaje, es un proceso natural que actúa modelando la superficie, en especial en zonas que cumplen con los factores reconocidos por Suarez (1998), como son: topografía, presencia de roca muy meteorizada y fracturada, lluvias intensas y movimientos sísmicos, condiciones comunes a lo largo del orógeno andino en el país.

Además de los factores ya citados, la capacidad que posee el hombre de modificar el paisaje e intervenir y construir sobre él, hace que el factor antrópico deba ser tenido en cuenta. Así, el riesgo por la ocurrencia de movimientos en masa se ha incrementado en este último siglo por el crecimiento poblacional y por el aumento del área necesaria para obtener recursos imprescindibles (Croizer, 1986).

Desde inicios de los 80s hasta el año 2007, en el Valle de Aburrá se presentaron 1390 muertos a causa de estos eventos (Aristizábal y Gómez, 2007). Por tal razón, se han venido desarrollando una serie de trabajos enfocados hacia el modelado y descripción de los movimientos en masa, con especial atención en la ladera oriental del Valle de Aburrá. Cabe mencionar el trabajo realizado por Salvá y Velásquez (2013) en el cual identifican la presencia de agua subterránea como un factor importante para tener en cuenta en el modelamiento de movimientos en masa en dicha ladera.

Otra de las problemáticas por la ocurrencia de estos eventos en la zona está relacionada con las afectaciones sobre la carretera Las Palmas, de gran importancia para la región tal como es descrito por el Departamento Administrativo de Planeación – Resolución 273 (2007): “La carretera Las Palmas hace parte de la proyectada vía rápida al aeropuerto José María Córdova (túnel Medellín – Rionegro), como eje básico de conexión, tanto a nivel regional como nacional, integra los valles de Aburrá y Rionegro. Además, dicha carretera es una vía fundamental para la ciudad que garantiza la accesibilidad al sector del Poblado.” Según lo anterior, se hacen de gran importancia las contribuciones que intenten caracterizar la particular inestabilidad de esta ladera del valle.

Según Hoyos (S.f.) la mayor parte de aguas subterráneas que llegan al Valle de Aburrá provienen del Altiplano Central de Antioquia. Esto deja en evidencia que el flujo de aguas subterráneas sobre la ladera oriental del Valle de Aburrá involucra al medio fracturado y carsificado de la unidad litológica Dunita de Medellín y las unidades pertenecientes al Complejo el Retiro.

Por otra parte, se ha visto que, en el caso de grandes pendientes inestables, la distribución espacial de las zonas saturadas influencia la repartición de presión en el macizo y la estabilidad de la pendiente (Binet et al. 2007). En el caso de un macizo rocoso (como el de la ladera suroriental del Valle de Aburrá) cuya principal permeabilidad está relacionada con las discontinuidades presentes, puede ser la distribución espacial de fracturas y sus propiedades las que determinen la repartición espacial de las zonas saturadas.

En este trabajo se intentará identificar si existe relación entre la ocurrencia de movimientos en masa y las fracturas que mayor potencial tienen de transportar agua a través de la ladera sur oriental del Valle de Aburrá con un enfoque en la Unidad litológica Dunita de Medellín.

2. Generalidades

2.1. Pregunta de investigación

¿Están relacionados los eventos de inestabilidad de taludes en la vía Las Palmas con la naturaleza del flujo de aguas subterráneas a través de las discontinuidades de las rocas aflorantes en la zona de estudio?

2.2. Hipótesis

La ocurrencia de movimientos en masa en la vía Las Palmas se ve favorecida por la dinámica del flujo de aguas subterráneas a través de discontinuidades de la Dunita de Medellín.

2.3. Objetivo general

Determinar si existe relación entre los eventos de inestabilidad de taludes en la vía Las Palmas con la naturaleza del flujo de aguas subterráneas a través del medio fracturado que constituye el segmento sur de la Dunita de Medellín.

2.4. Objetivos específicos

- Caracterizar las discontinuidades presentes en la Dunita de Medellín sobre el trazado de la vía Las Palmas y sus pesos hidráulicos asociados acorde a los parámetros y propuesta de Chica (1979) con trabajo de campo y un posterior procesamiento de información en el software DIPS y hojas de cálculo.
- Elaborar un inventario de movimientos en masa a partir de información secundaria y primaria.
- Llevar a cabo un análisis cinemático de estabilidad por ruptura plana entre las familias de discontinuidades con mayor peso hidráulico y los taludes sobre la vía Las Palmas con presencia de movimientos en masa.

3. Área de estudio

3.1. Localización

La zona de estudio se ubica sobre el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia, en la ladera suroriental del Valle de Aburrá y desde el punto de vista político-administrativo se encuentra entre los municipios de Medellín y Envigado. El área de estudio comprende el sector de la vía Las Palmas que pasa por la unidad litológica de la Dunita de Medellín, es decir, desde el km 5 hasta el km 11 + 250 (Figura 1). Desde el punto de vista geológico esta unidad se encuentra espacialmente dentro del terreno Tahamí (Restrepo, 2008).

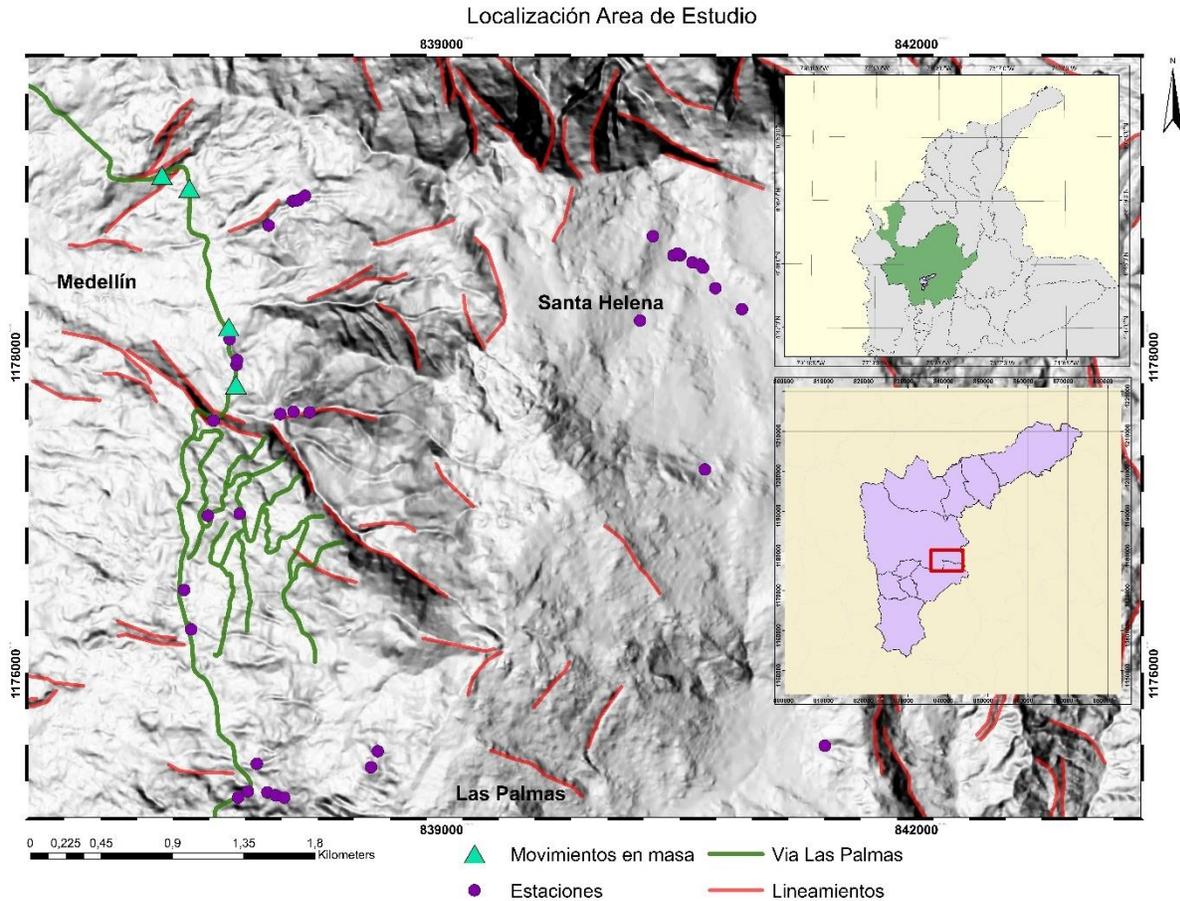


Figura 1. Localización del área de estudio. Se muestra la distribución espacial de las estaciones de control geomecánico de fracturas y de movimientos en masa, los diferentes lineamientos y la vía Las Palmas. *Fuente:* elaboración propia.

3.2. Marco Geológico

La interacción entre las placas litosféricas de carácter oceánico Nazca y Caribe, con la de carácter continental Sur América, configuran el marco geológico y tectónico actual del norte de la cordillera de los Andes (Cediel et al. 2003). En este sector los principales sistemas de fallas son de carácter rumbo deslizantes (Cediel et al. 2003) y con orientaciones N-S, NW-SE y NE-SW. El terreno Tahamí, por otra parte, se encuentra limitado al occidente por fallas del sistema Cauca-Romeral como la falla San Jerónimo y al oriente por la falla Otú-Pericos (Restrepo et al. 2009).

En cuanto a la geología en los alrededores del área de estudio, se encuentra compilada en la Plancha Geológica 247 Medellín Oriental escala: 1:100.000, realizada por Rodríguez et al., (2005). En el presente trabajo esta resumida en la Tabla 1 e ilustrada en la Figura 2, donde se encuentran una serie de rocas metamórficas de probable edad Proterozoica pertenecientes al Complejo el Retiro, rocas ígneas como la de interés en este trabajo, la Dunita de Medellín, y varios intrusivos como el Gabro de San Diego y el

Batolito Antioqueño. Hacia el Valle de Aburrá se destacan Depósitos aluviales del río Medellín y de vertiente de la ladera oriental del valle.

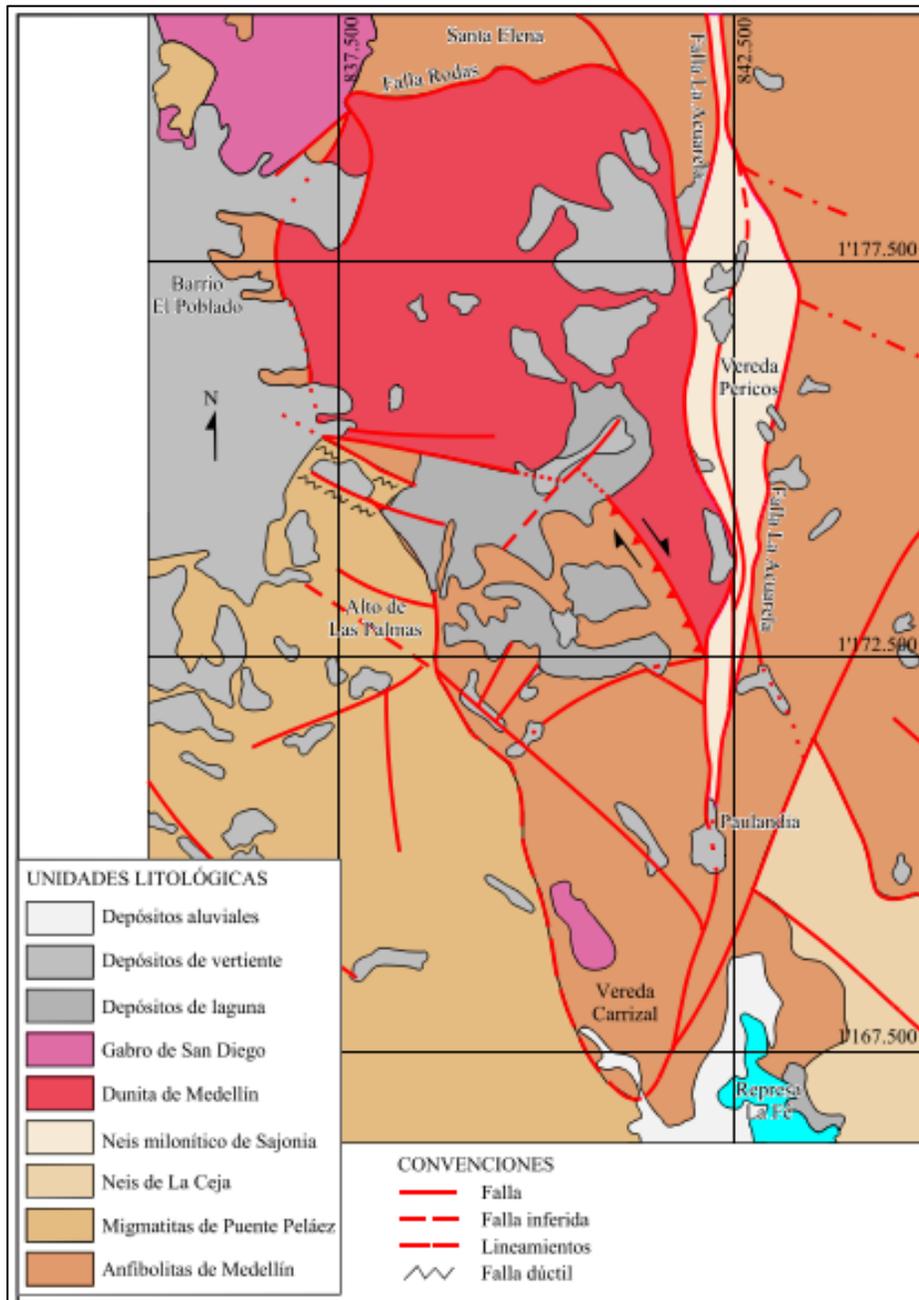


Figura 2. Unidades geológicas aflorantes cerca de la zona de estudio. Fuente: tomado de Rodríguez et al., (2005). Escala 1:100.000

Tabla 1 Geología del área de estudio. Se describen las principales características de las unidades aflorantes en cerca al área de estudio

Unidad	Descripción	Contactos	Protolito	Referencia	Edad
Complejo el Retiro (aflorante al oriente de Valle de Aburrá): dividido en 5 cuerpos.	Anfibolitas de Medellín: constituida por varios cuerpos de anfibolita con estructura que varía entre néisica y esquistosa. Estructuras migmatíticas se observan hacia el contacto con el Batolito Antioqueño.	Limita en su borde suroccidental con las Migmatitas de Puente Peláez y hacia el área de estudio se encuentra rodada en contacto fallado con la Anfibolita de Medellín y al oriente con el Neis Milonítico de Sajonia	Se definen como basaltos o gabros tipo MORB o formados en cuenca trasarco	Rodríguez, Gonzáles, Zapata al (2005)	Rodríguez et al. (2005) lo ponen como perteneciente al Proterozoico por relaciones de campo (?)
	Migmatitas de Puente Peláez: cuerpo rocoso alargado con dirección N-S La litología predominante corresponde a neises y granofels cuarzo feldespáticos con biotita intercalados con neises biotíticos. Macroscópicamente estructuras migmatíticas de tipo estromática, plegada, flebítica y augen. Se le conoce como Neis Augen Milonítico de Las Palmas a la sección milonitizada aflorante en el alto de Las Palmas.	Probablemente fallado con el Neis de La Ceja. Está limitada al oriente por las Anfibolitas de Medellín y la Dunita de Medellín y al occidente está cubierta por depósitos de vertiente	Roca sedimentaria con predominancia pelítica	Rodríguez et al. (2005)	
	Neis Milonítico de Sajonia: forma una franja delgada, con dirección Norte-Sur. Estructura bandeada esquistosa y néisica la roca está intensamente cizallada, deformada, localmente plegada y fallada	Al occidente limita con en el borde oriental de los bloques sur y central de la Dunita de Medellín, en contacto fallado (Falla Acuarela). Al oriente está en contacto fallado con la Anfibolita de Medellín (Falla de Normandía).	Semipelíticas	Rodríguez et al. (2005)	
	Neis de La Ceja: cuerpo con dirección predominante norte-sur, está compuesto por néises y granofels bandeados, localmente plegados y con estructura migmatítica e intercalaciones de néises miloníticos, cuarcitas y anfibolitas y asociado espacialmente a granulitas y migmatitas.	Contactos concordantes con la Anfibolita de Medellín, el contacto con las Migmatitas de Puente Peláez es fallado. Se evidencia un contacto intrusivo con el Batolito Antioqueño.	Sedimentario, relativamente más enriquecido en feldespatos y pobre en material pelítico que el de las Migmatitas de Puente	Rodríguez et al. (2005)	
	Granofels de Normandia: Esta unidad alcanzó la anatexia parcial y una homogenización avanzada del leucosoma y el melanosoma, pero conserva texturas y estructuras metamórficas y una mineralogía que permiten establecer un origen a partir de sedimentos sometidos a metamorfismo en facies anfibolita alta.	Los límites con las Migmatitas de Puente Peláez son complejos, localmente parecen transicionales, pero también existen inyecciones de granofels dentro de las migmatitas a lo largo de planos de debilidad y de la foliación.	Rocas cuarzo-feldespáticas a semipelíticas	Rodríguez et al. (2005)	

Esquistos de Ancón	Esquistos micáceos y cuarcitas de color gris plateado a negro, foliación bien definida por lo general no plana debido a microplegamientos, bandeamiento composicional local; porfiroblastos ocasionalmente de andalucita, estaurolita, cloritoide y granate. facies esquistos verde a anfibolita baja.	Hacia el borde oriental están en contacto fallado con el Granofels de Normandía (Falla La Estufa). Localmente descansan sobre las Migmatitas de Puente Peláez.	Sedimentos pelíticos con variaciones en el contenido de materia orgánica según Bustamante (2003).	Rodríguez et al. (2005)	Rodríguez et al. (2005) propone pertenece al Complejo Cajamarca de edad Devónica
Dunita de Medellín	Este cuerpo Rocoso se extiende por todo el flanco oriental del Valle de Aburrá, cruzando éste con una dirección N10°W hacia la parte norte del valle. Se encuentra segmentado en tres partes, la sur, central y norte. Entre el segmento sur (de interés en este trabajo) y central parece no existir continuidad. En cuanto a su composición litológica predominante es dunitica con una alteración en diversos grados a serpentina. Se ha descrito la ocurrencia de cromita podiforme en esta Unidad.	Los contactos de la dunita con anfibolitas y neises del Complejo El Retiro, en gran parte muestran evidencias claras de fallamiento y su posición es variable, entre posiblemente sub-horizontal hasta más o menos vertical.	N/A Roca Ígnea	Rodríguez et al. (2005)	Rodríguez et al. (2005) y Restrepo (2008) la consideran probablemente del Triásico.
Gabros de San Diego	Este cuerpo tiene forma irregular ligeramente alargada con su eje principal de dirección NW Las rocas predominantes corresponden a gabros y dioritas con plagioclasa, piroxenos y hornblenda como constituyentes principales a veces con cuarzo accesorio	El contacto con la Anfibolita de Medellín y néises del Complejo el Retiro es de carácter intrusivo. El contacto con la Dunita de Medellín es indefinido.	N/A Roca Ígnea	Rodríguez et al. (2005)	Edades radiométricas en el rango del Jurásico Superior - Cretácico Inferior (Restrepo et al., 1991).
Batolito Antioqueño	Una de las características fundamentales del Batolito Antioqueño es su homogeneidad litológica donde cerca del 92% está formado por tonalita granodiorita, en esta unidad es muy común la meteorización esférica.	Intruye las rocas metamórficas del Complejo el Retiro y en partes de la Dunita de Medellín.	N/A Roca Ígnea	Rodríguez et al. (2005)	Cretácico Superior
Depósitos aluviales	Ocupan las llanuras de inundación de los causes actuales están conformados por material suelto como bloques y gravas de rocas metamórficas, plutónicas y cuarzo en diferentes proporciones en una matriz de material arcillo – arenoso no coherente (Rodríguez et al., 2005).				
Depósitos de Vertiente	Los depósitos de vertiente identificados en la plancha 147 Medellín oriental se encuentran sobre la ladera oriental del Valle de Aburrá (zona de estudio) indicando alta inestabilidad por ocurrencia de procesos de remoción en masa. Están conformados por bloques y cantos de diferente tamaño y litología en una matriz arenosa - lodosa de colores pardo, gris y amarillo, con un grado de meteorización alto, predomina la fracción gruesa sobre la fracción fina (Rodríguez et al., 2005).				

3.3. Marco Estructural

El área de estudio se encuentra enmarcada dentro de la parte norte de la Cordillera Central de Colombia, la cual, como ya se mencionó, está acotada entre las fallas San Jerónimo al occidente y Otú-Pericos al oriente. Las rocas que se encuentran entre estas dos estructuras son principalmente un complejo poli-metamórfico compuesto por anfibolitas, néises, migmatitas, esquistos y el Batolito Antioqueño, sobre estas se encuentra cabalgada la Dunita de Medellín; un cuerpo generado hacia el Triásico tardío y cuya colisión y cabalgamiento sobre el terreno Tahamí debió darse ente el Triásico tardío y Cretácico temprano (Restrepo, 2008). Las rocas mencionadas se pueden ver Tabal 1 y Figura 2.

La configuración entre estas estructuras y su interacción con un cuerpo rígido como el Batolito Antioqueño y sus rocas encajantes ha sido interpretada por Rodríguez et al., (2005), por medio de una analogía, como una estructura dúctil de augen en milonitas, en donde el Batolito y sus rocas encajantes actúan como porfiroclasto rodeado de una matriz que correspondería a las rocas asociadas a cada sistema de fallas (Figura 3).

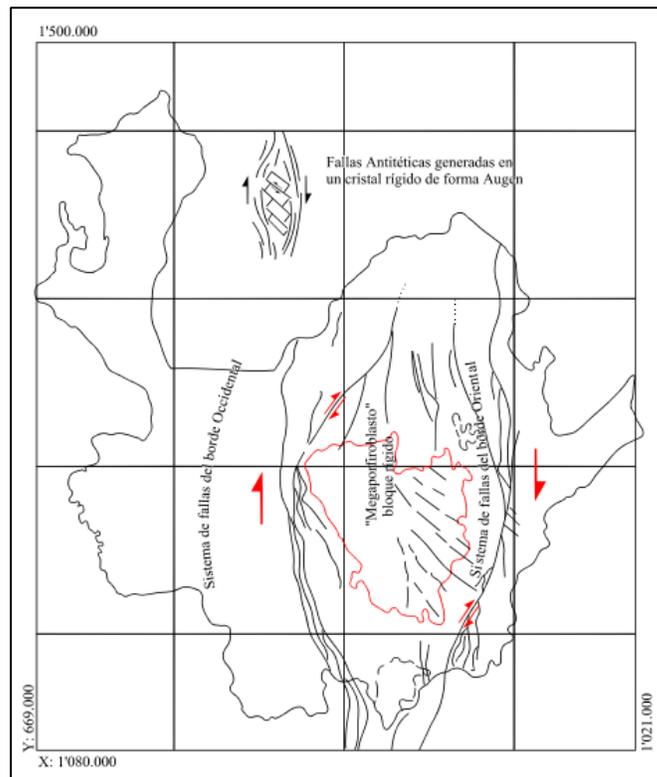


Figura 3. Analogía de “mega augen” utilizada por Rodríguez et al., (2005) para describir las estructuras presentes al norte de la cordillera central. Fuente: (Rodríguez et al. 2005).

La orientación del “mega augen”, como se observa en la Figura 3, es N-S con desvíos en la parte norte de los sistemas de fallas en dirección NNE y NNW. Al interior del “porfiroclasto” se forma un sistema de fallas antitéticas en sentido NW, con dirección general N45-60W que en la plancha 147 Medellín Oriental escala 1:100.000 realizada por Rodríguez et al., (2005), donde se encuentra la zona de estudio,

están evidenciadas en fallas, lineamientos, fajas delgadas de rocas metamórficas al interior del Batolito Antioqueño con orientación N55W y algunos ríos alineados (Rodríguez et al. 2005).

La Dunita de Medellín, para autores como Kammer (1991), Pereira et al., (2006) y Solingral (2011), presenta deformación dúctil (bandeamientos composicionales de la dunita), dúctil-frágil (zona de cizalla en el contacto con la Anfibolita subyacente) y frágil (con un fuerte fracturamiento).

En la zona de estudio se han identificado estructuras dúctiles con tendencia subhorizontal con buzamientos entre 20-35° SE y rumbos N30°-60°E (Solingral, 2011). En cuanto a las estructuras Frágil-Dúctil, estas presentan tendencias NW y NE (Solingral, 2011) y para las estructuras frágiles se han reportado hasta 5 familias de diaclasas.

4. Métodos

Para la obtención de los objetivos propuestos en este trabajo se siguió la metodología y métodos que se tratan a continuación y se resumen en la Figura 4.

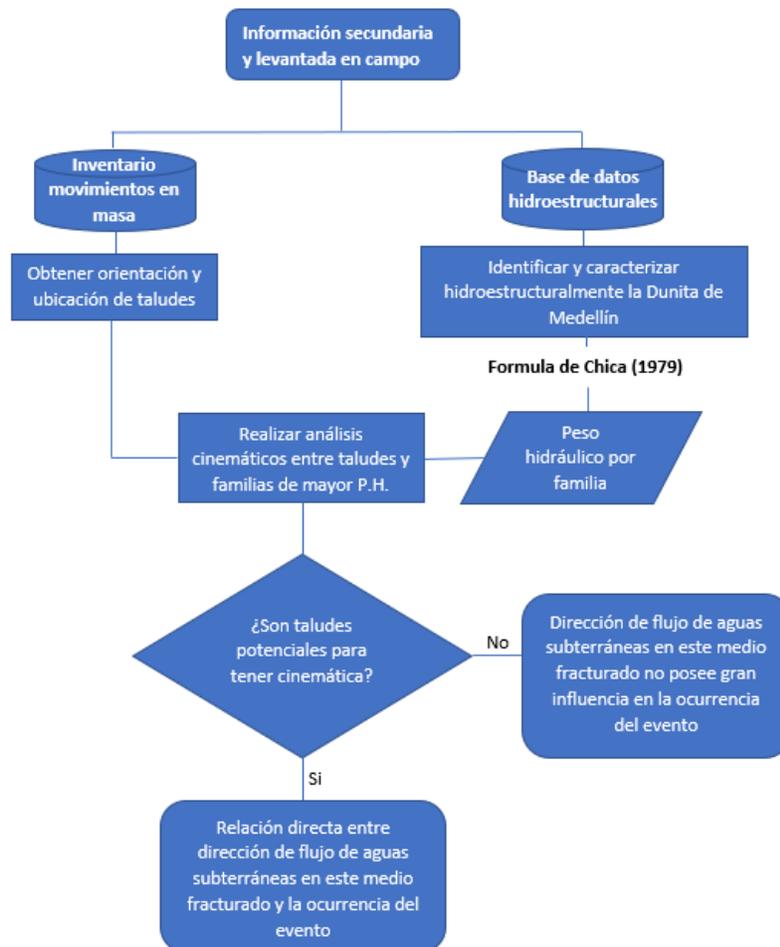


Figura 4 diagrama de flujo generalizado de la metodología empleada.

4.1. Inventario de movimientos en masa

Como principal fuente de información secundaria para la elaboración del inventario, se utilizó el sistema de inventarios de desastres (www.desinventar.org), una herramienta conceptual y metodológica para la construcción de bases de datos de pérdidas, daños o efectos ocasionados por emergencias o desastres; un proyecto concebido por la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED) (Desinventar, s.f.).

Para el Área Metropolitana de Medellín, la base de datos de desastres ocurridos es alimentada por la Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín con datos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), las oficinas de gestión del riesgo de los municipios del Valle de Aburrá y medios locales (Desinventar, s.f.). En este proyecto se trabajó con datos de eventos ocurridos entre el 2007 (después de construcción de la doble calzada Las Palmas) y mediados del 2019.

Cabe resaltar que la base de datos de Desinventar para los datos del Área Metropolitana, no presenta una ubicación georreferenciada del evento. Para localizarlos, se utilizaron las referencias espaciales, tales como el km de la vía en el que se reportó el evento y se tomaron las coordenadas a partir de Google Earth Pro versión 7.3.

4.2. Adquisición y análisis estadístico de base de datos hidro-estructurales

En cuanto a la toma de datos hidroestructurales en campo, se tuvieron en cuenta los parámetros mencionados en el trabajo de Chica (1979), tales como orientación del plano, abertura, continuidad, densidad de fracturas, rugosidad relativa y relleno. Además, se levantaron datos de fallas. La base de datos obtenida sirvió de insumo para el tratamiento estadístico de los datos, el cual se realizó por medio del Software DIPS y se calculó del peso hidráulico.

Otro análisis fue realizado sobre los diferentes lineamientos en la zona de estudio. Estos fueron identificados con la utilización de un DEM de 2m x 2m de la zona y por procesamiento en el software Geomática. Finalmente, se plotearon en un diagrama de rosas, como una forma de mostrar una estadística de la prevalencia relativa de tendencias direccionales de los datos.

Con respecto a la clasificación de principales familias de discontinuidades, fueron utilizadas proyecciones de igual área debido a que son las más convenientes a la hora de plotear densidades de direcciones (Lisle y Leyshon, 2004). Además, se emplearon densidades de polos dado que facilitan la representación de un gran número de datos (Wyllie y Mah, 2004).

Por último, el cálculo del peso hidráulico de las diferentes familias de discontinuidades identificadas se hizo con base en el trabajo de Chica (1979), a partir de la ecuación 1, donde: C = continuidad de la fractura [m]; A = Abertura [mm]; D = Densidad de fracturamiento [Fracturas/m]; $F_{r \times r}$ = Factor de corrección por rugosidad relativa en una escala de valores a juicio del investigador, entre 0.1 para fracturas muy rugosas y 1.0 para fracturas planas poco rugosas o lisas; X = número constante para cada área total de estudio, definido con el propósito de limitar la escala de valores del peso hidráulico. Los polos correspondientes a los pesos hidráulicos fueron ploteados dentro del estereograma en el sitio definido por la orientación de la discontinuidad.

$$(P.H.) = 1 + (C \times A \times D \times F_{r,xr}) / X, \quad (\text{Ecuación 1})$$

Los pesos hidráulicos definidos a partir de la ecuación anterior representan las fracturas como canales y su potencial relativo para transportar fluidos, con la continuidad como representativa del largo del canal, la densidad de fracturamiento del número de veces que hay que considerar la abertura y por tanto el ancho del canal y el $F_{r,xr}$ una corrección del ancho del canal por la rugosidad.

4.3. Análisis cinemático de estabilidad entre los planos de mayor peso hidráulico y taludes con ocurrencia de movimientos en masa

Una vez obtenido el inventario de movimientos en masa y el peso hidráulico por cada una de las familias de discontinuidades, se realizó un análisis cinemático de estabilidad de taludes de ruptura plana, tomando en cuenta la orientación del plano de la ladera con ocurrencia de movimiento en masa y los planos de mayor peso hidráulico.

La construcción del diagrama que indica la zona de planos potencialmente a tener cinemática se realizó en el Software Dips, con base en la descripción observada en Suárez-Burgoa (2016):

- Se delimita una zona inferior o interior con base en el ángulo de fricción interna de la roca en cuestión
- Se delimita una zona superior o externa con base en el ángulo de buzamiento del talud
- Estas zonas se delimitan lateralmente a 20 grados a la izquierda y 20 grados a la derecha del polo del plano del talud.

Una vez construido el diagrama (Figura 5), se establece la desfavorabilidad de los polos que caen dentro de la zona, entendiéndose aquí desfavorabilidad como potencial para producir deslizamiento.

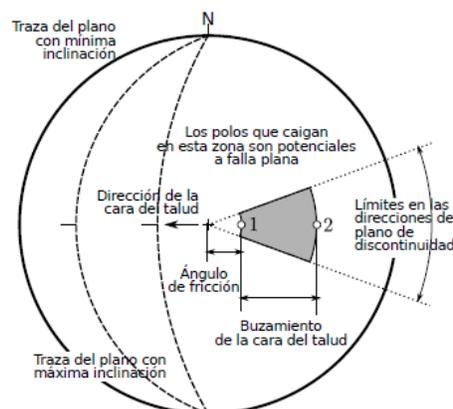


Figura 5. Construcción de un diagrama de análisis cinemático de estabilidad de taludes por ruptura plana.
Fuente: tomado de Suárez-Burgoa (2016)

Se debe tener en cuenta que los métodos cinemáticos no toman en consideración las fuerzas que se ejercen sobre determinado bloque y el peso de este, solo se considera la libertad que tenga la roca de moverse influenciada solo por su geometría y puntos de apoyo.

Finalmente, se revisó si había relaciones angulares entre los planos con ocurrencia de movimientos en masa y los planos de las familias de discontinuidades con mayor peso hidráulico que pudieran ser desfavorables y haber causado así un deslizamiento. Esto finalmente permite establecer alguna relación entre estos dos factores.

5. Resultados

5.1. Movimientos en masa Inventariados

Los movimientos en masa que se encontraron en la base de datos de Desinventar y que cumplieron con las condiciones de haberse presentado entre el año 2007 hasta mediados de 2019 sobre la vía Las Palmas fueron 4 y la ubicación de los taludes se resume en la Tabla 2 y se pueden observar en la Figura 1.

Tabla 2 Resumen taludes inventariados

ID Talud	Ubicación
km 6	6°12'50.10"N, 75°32'54.10"O
km 7	6°12'47.51"N, 75°32'48.47"O
La colegiatura	6°12'19.00"N, 75°32'40.30"O
Retorno #7	6°12'7.14"N, 75°32'38.79"O

5.2. Caracterización estructural

Se levantaron 820 datos estructurales con su respectiva información geomecánica, ver Anexo 1, de los cuales 450 fueron levantados por el equipo de Maestría en Ciencias de la Tierra de la universidad EAFIT que se encontraba trabajando en el proyecto Dunita de Medellín y los otros 370 dato con la colaboración de un grupo de estudiantes de octavo semestre del pregrado en Geología de EAFIT.

Los datos están distribuidos entre la zona oriental y occidental de la Dunita de Medellín. Hacia la zona oriental los afloramientos se encuentran en cercanías a la vía Las Palmas (condominios Cinturón Verde y Castellazzo), quebradas La Poblada, Sanín, La Aguacatala, La Marucha y Carrizal y otros sobre la vía. Los datos de orientaciones aquí presentados serán dados en notación Dip/Dipdirection, si se da otra notación, será especificado.

A partir de los datos para el total del área se logra observar la presencia de cinco familias principales de discontinuidades (Tabla 3) con rumbos preferenciales en dirección N60W, N-S, N30E y otros subordinados en dirección E-W (Figura 6). Se observan algunos "subgrupos" que en realidad corresponderían a polos de las mismas familias (mismas direcciones) pero ángulos de buzamiento más altos.

La Familia 1, con 174 de las 820 discontinuidades tomadas para este trabajo, tiene una orientación general de 78/035 con rumbos N60W. Esta familia posee inclinaciones altas de (65 a 89°) con una abertura promedio de 1.8 mm y valor máximo de 20 mm. La mayoría de sus fracturas varían entre lisas y poco rugosas, la continuidad posee un valor promedio de 85 cm y la densidad de fracturamiento de 4 y 5 fracturas/metro.

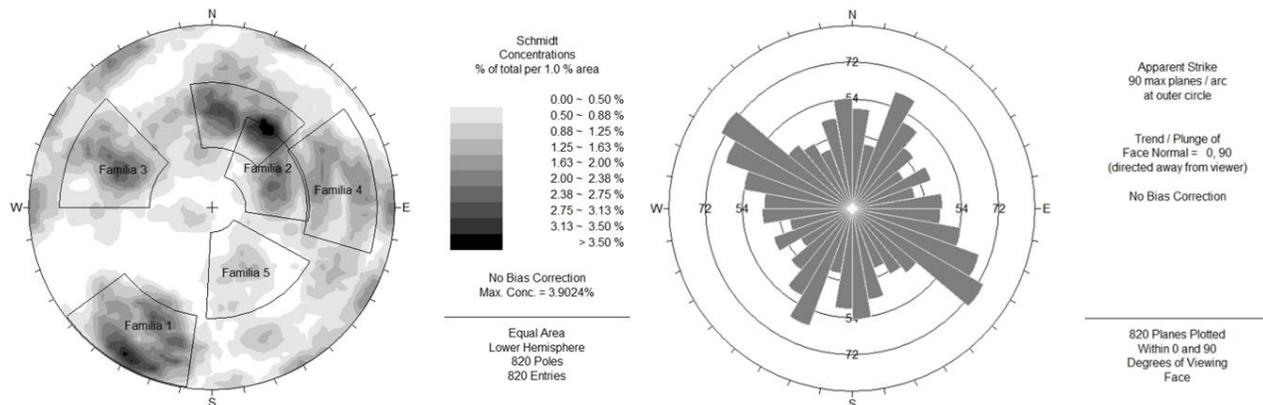


Figura 6. Diagrama de polos y de rosas que muestran la orientación de las familias de discontinuidades presentes en el área de estudio y el rumbo de estas respectivamente

La Familia 2 está definida por 225 polos, representado la familia más numerosa con el 27,4% de las fracturas en este trabajo. Tiene una dirección general de 37/211 con rumbo de N60W. Las discontinuidades poseen inclinaciones (30 a 65°) con un promedio de abertura de 2.86 mm y un valor máximo de 30 mm. Las fracturas se presentan generalmente poco rugosas, con una continuidad promedio de 120 cm y densidad de fracturamiento de 3 y 4 fracturas/metro.

Estas dos familias, a pesar de poseer diferentes orientaciones, con sus direcciones de buzamiento contrarias, tienen el mismo rumbo y, por tal razón, en el diagrama de rosas para toda la zona de estudio el rumbo con más predominancia es N60W. La intersección entre ambas discontinuidades forma un lineamiento con orientación 87/303, concordante con el rumbo de los planos.

Para la Familia 3, con 197 planos de discontinuidades, se tienen las siguientes características: posee una orientación general 51/115 con rumbo N25E, concordando con una de las direcciones predominantes que se observan en el diagrama de rosas para toda la zona de estudio (Figura 6). La abertura promedio es de 1.5 mm alcanzando un valor máximo de 50 mm, en su mayoría lisas y con continuidades y densidades de fracturamiento en promedio de 90 cm y 4 fracturas/metro, respectivamente.

La Familia 4, representada por 124 polos, tiene una orientación general 60/259, unas inclinaciones de medias a altas hacia el SW, casi en dirección al W, y rumbos cercanos a la dirección N. Las fracturas de esta familia presentan aberturas promedio de 2.1 mm con valores máximos de 20 mm y se presentan generalmente entre lisas y poco rugosas. En cuanto a la continuidad y densidad de fracturamiento tiene valores promedio de 70 cm y 4 fracturas/metro, respectivamente.

Finalmente, la Familia 5, representada por 114 polos, es la menos frecuente con el 13.9% de los datos y tiene una orientación general 34/333 con rumbo N60E. La abertura tiene un valor promedio de 2.6 mm y máximos de 30 mm. También se presentan rugosidades que varían entre lisas y poco rugosas, continuidades con un valor promedio de 65 cm y densidades medias de 3 a 4 fracturas/metro.

Tabla 3 Familia de diaclasas presentes en el segmento sur de la Dunita de Medellín y su orientación general

Orientación/ #Familia	Dip	Dip Direction	%	Abertura prom(mm)	Continuidad Prom(cm)	Densidad (Fr/m)
Familia 1	70	29	20.7	1.8	85	4 y 5
Familia 2	37	211	27.4	2.86	120	3 y 4
Familia 3	51	115	23	1.5	90	4
Familia 4	60	259	15	2.1	70	4
Familia 5	34	333	13.9	2.6	65	3 a 4

A continuación, se muestra un análisis sectorizado (de W a E) del fracturamiento en la Dunita de Medellín, con el fin de encontrar variaciones en tendencias direccionales en el fracturamiento y en la distribución de los pesos hidráulicos y poder hacer un análisis más detallado.

De las 820 discontinuidades levantadas en campo, 580 se ubican en el costado W de la Dunita y 240 al costado E. A su vez, el sector W se analiza en la parte norte y sur por aparte conformándose así 4 análisis por sectores: Sector W, NW, SW, E. Al sector E no se le analiza en su parte N y S por separado debido a que allí los controles en campo no se encuentran homogéneamente distribuidos.

5.2.1. Sector W

El sector W (ladera SW del Valle de Aburrá) se encuentra caracterizado por 26 estaciones de las 41 realizadas en este trabajo y representa cerca del 70% de los datos recolectados. Este sector muestra una distribución similar a la del total del área de estudio, con las 5 familias identificadas y en proporciones similares (Figura 7).

Este sector está controlando el patrón de fracturamiento observado en el diagrama de polos para el total de la Dunita de Medellín en este trabajo. Para tratar de identificar variaciones espaciales en el fracturamiento se hace una subdivisión en una parte N y otra S.

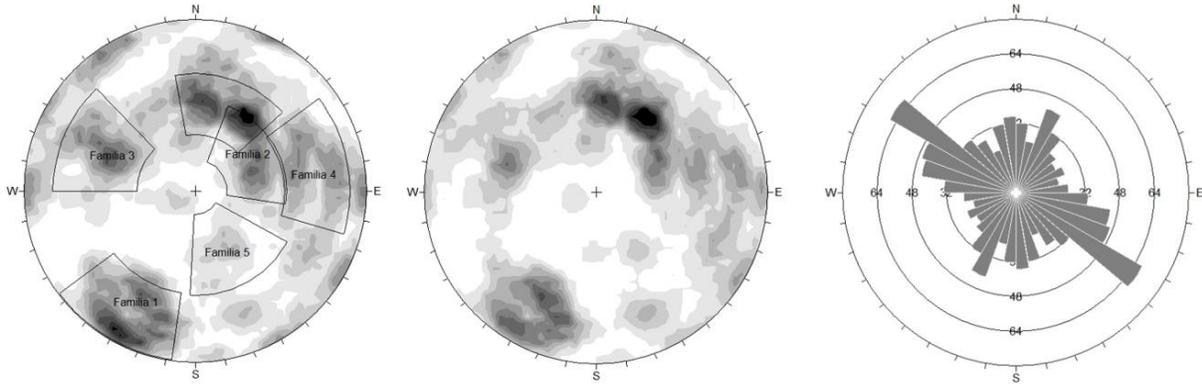


Figura 7. Muestra diagrama de polos de la zona de estudio (izquierda), polos del sector W (centro) y diagrama de rosas del sector W (derecha).

5.2.2. Sector NW

El sector NW está definido entre las quebradas Sanín y el km 6 de la vía Las Palmas en donde se encuentran 12 estaciones. En este sector se observa una predominancia en la presencia de fracturas de la Familia 2, con dirección general 37/211. También se encuentran polos representativos de las Familias 1 y 4 y en menor proporción de la 3 y 5. Aquí predominan los rumbos E-W y NW-SE con otro grupo menor hacia el NE (Figura 8).

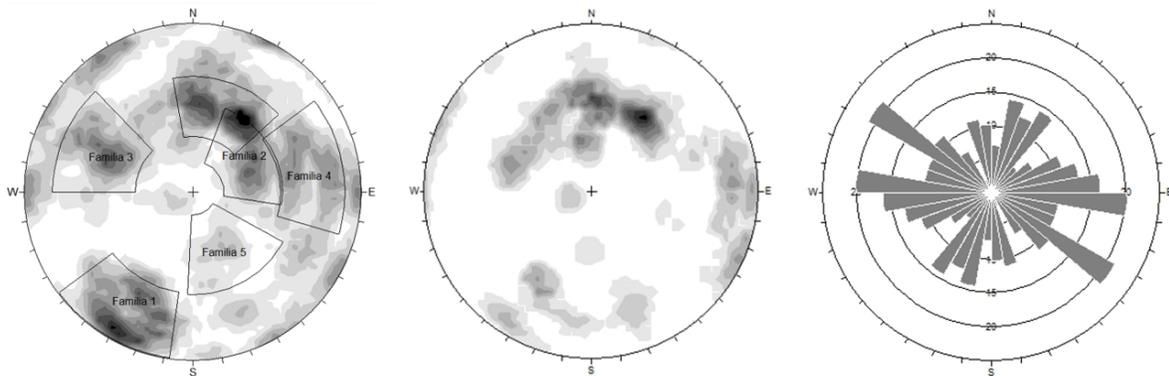


Figura 8. Muestra diagrama de polos de la zona de estudio (izquierda), polos del sector NW (centro) y diagrama de rosas del sector NW (derecha).

5.2.3. Sector SW

Este sector está definido entre el condominio Cinturón Verde y la quebrada La Aguacatala. En él se encuentran 14 estaciones y, como se puede observar en la Figura 9 (centro), las fracturas presentan una distribución similar a la del total del área de estudio, con mayores concentraciones relativas de polos en los rangos de la Familia 1 y 2, evidenciado igualmente en la predominancia de rumbos al NW (Figura 9, izquierda).

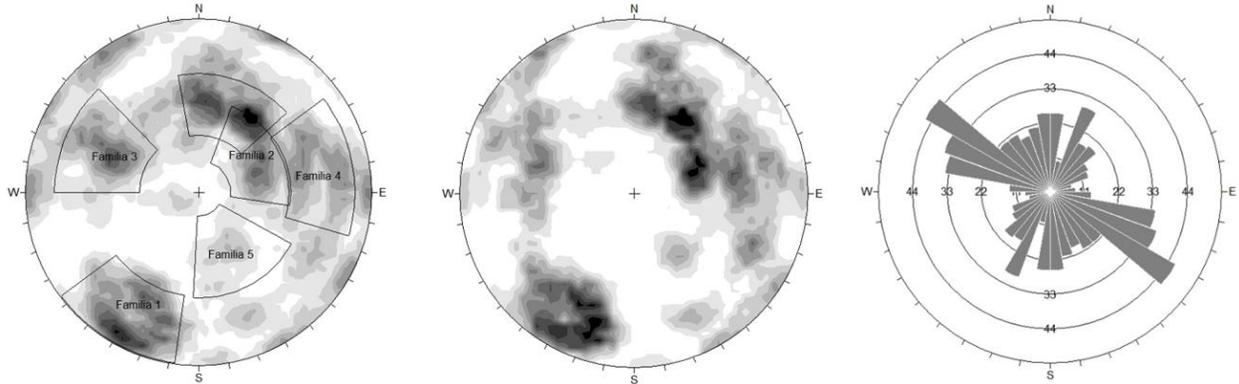


Figura 9. Muestra diagrama de polos de la zona de estudio (izquierda), polos del sector SW (centro) y diagrama de rosas del sector SW (derecha)

5.2.4. Sector E

El sector E (Vereda Santa Elena) se encuentra caracterizado por 15 de las 41 estaciones realizadas en este trabajo y representa cerca del 30% de los datos recolectados. Este sector muestra una alta dispersión en la distribución de los polos, con concentraciones mayores correspondiendo a planos de alto ángulo de las Familias 1 y 3 (Figura 10, centro).

Este sector es el único en el cual no hay predominancia de la Familia 2, como sí ocurre en los sectores anteriores. Aquí la Familia predominante es la 3 y hay una presencia importante de la Familia 4 y 5, según el diagrama de polos y el diagrama de rosas (Figura 10, derecha) que muestra rumbos dominantes hacia el NNE.

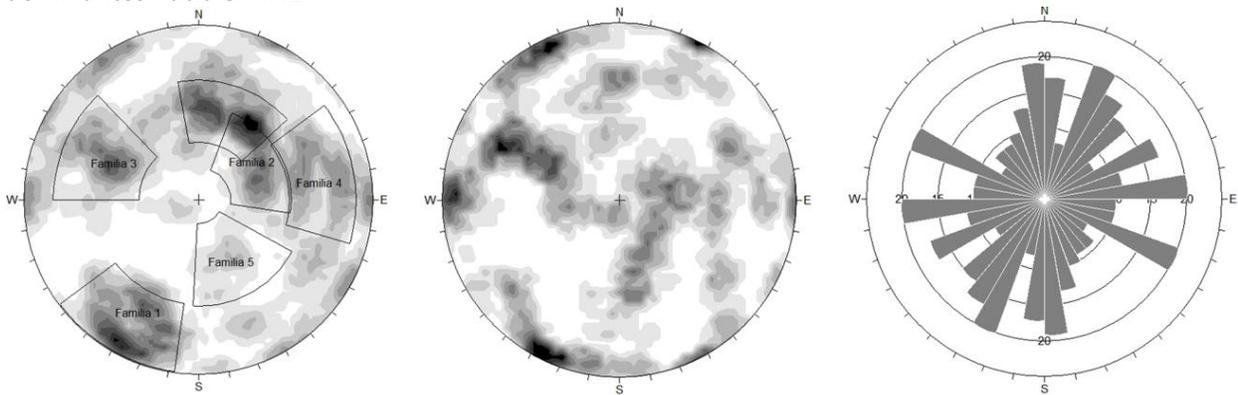


Figura 10. Muestra diagrama de polos de la zona de estudio (izquierda), polos del sector E (centro) y diagrama de rosas del sector E (derecha).

La Figura 11 Muestra un resumen de la distribución del fracturamiento en cada sector y la distribución de los pesos hidráulicos altos asociados

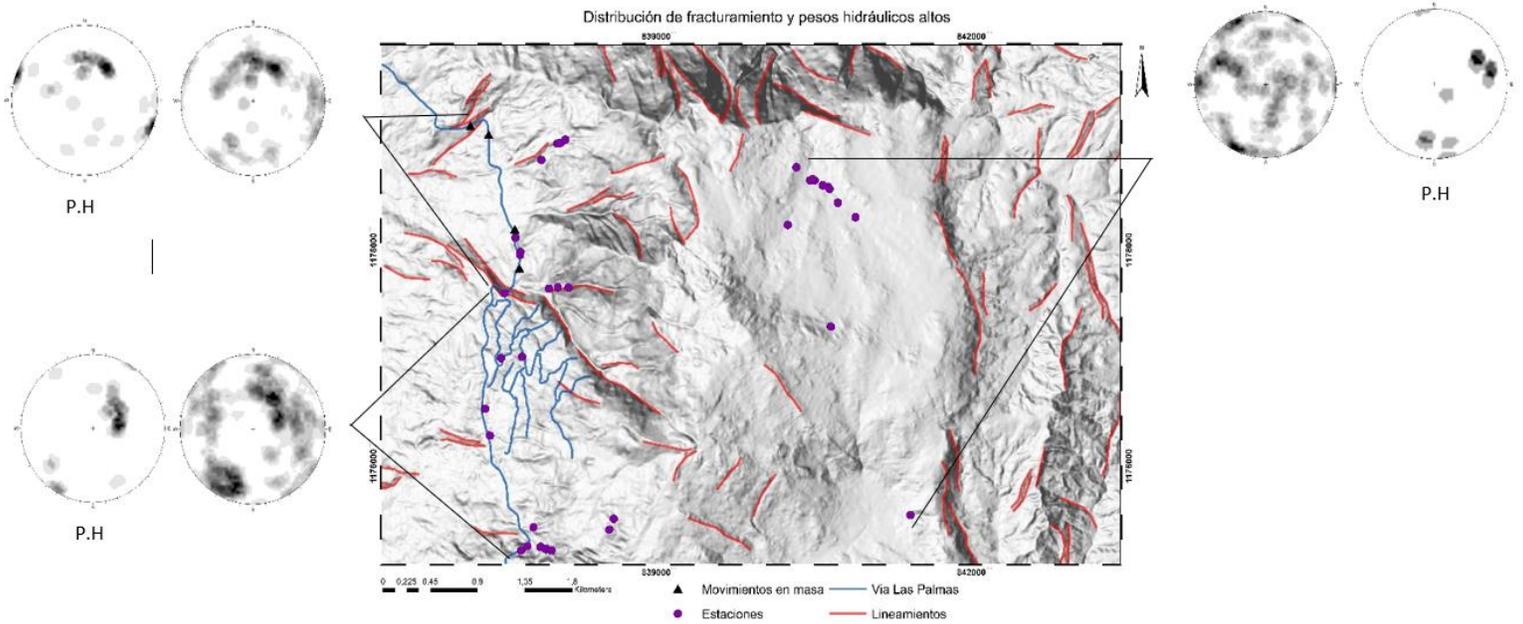


Figura 11. Distribución por sectores del fracturamiento y Pesos hidráulicos altos en la Dunita de Medellín.

Para el análisis de lineamientos se tuvieron en cuenta características lineares con longitudes mayores a 350 metros, debido que a partir de esta longitud es cuando el software generó lineamientos que se ajustaban a los observados en ortofotos partiendo de un DEM de 2m x 2m. Resultaron un total de 92 lineamientos para los cuales el diagrama de rosas de las direcciones muestra rumbos predominantes al N60W, N10W y N20E (Figura 12).

En términos generales se puede observar una predominancia de lineamientos hacia el NNW con respecto a los que tienen rumbos hacia el NE (Figura12). Los lineamientos muestran un comportamiento muy similar al fracturamiento medido en campo, en este caso dominando la dirección al N10W, que como se puede observar en la Figura 11, son lineamientos persistentes en el costado E y N de la Dunita.

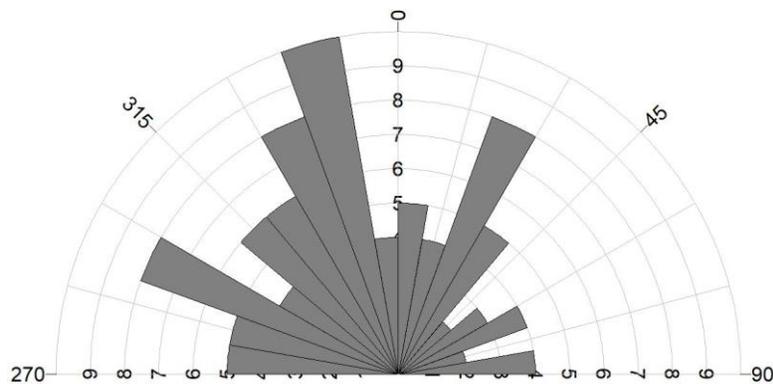


Figura 12. Diagrama de rosas de las direcciones de lineamientos en el área de estudio. Fuente: Este trabajo

5.3. Peso hidráulico

El valor de X en la fórmula de Chica (1979), cuya función es normalizar los valores de pesos hidráulicos, en este trabajo fue de 20, ya que como mostró la figura de distribución de frecuencias (Figura 13) es a partir de este valor de los pesos hidráulicos que se forma la cola (valores más extremos) de la distribución. Quedaron así normalizados entre valores de 0 a 1 los pesos hidráulicos entre 1 y 20, y los valores de pesos hidráulicos más extremos quedaron normalizados como valores >1 . Una vez normalizados los valores del peso hidráulico se conformaron cinco rangos para facilitar el análisis de flujo de agua en la Dunita de Medellín. Los rangos de valores junto con los porcentajes que estos representan del total de datos se resumen en la Tabla 4.

Los pesos hidráulicos calculados para este trabajo varían entre valores mínimos de 1 y un valor máximo 236,2. Una vez normalizados, de la forma en que se especificó anteriormente, el 92.5 % de los datos quedaron entre los valores de 0 y 1 y el otro 7.5% corresponde a valores mayores a 1. Se asignaron rangos de acuerdo con la distribución de los valores de pesos hidráulicos normalizados, quedando así los 5 rangos que se observan en la Figura 14.

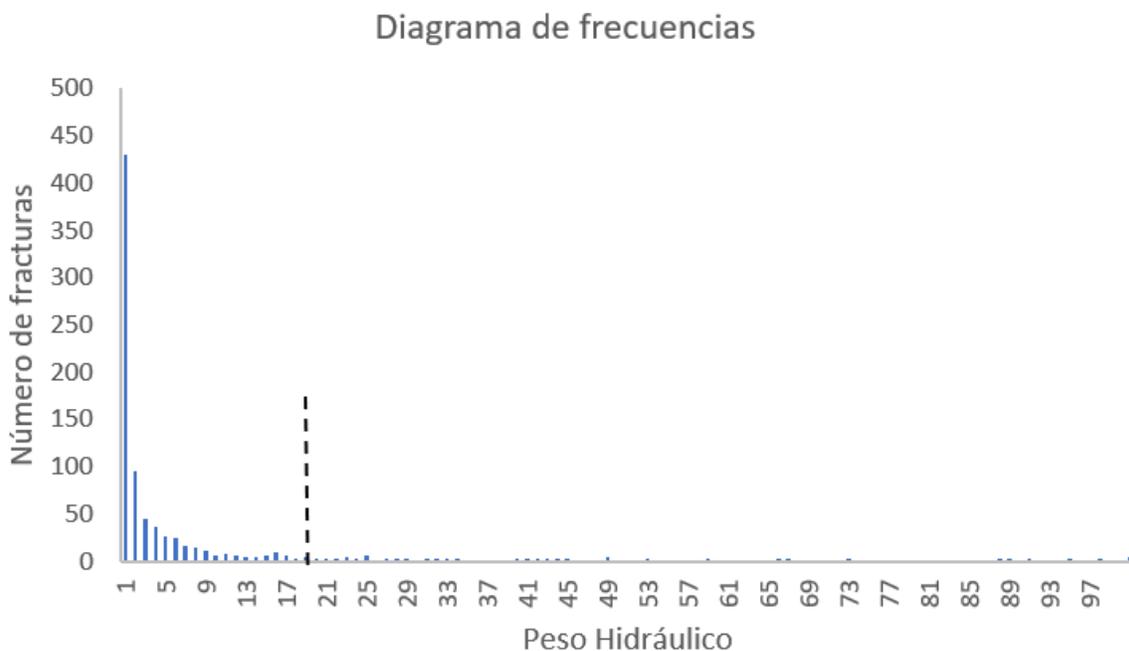


Figura 13. Frecuencia de pesos hidráulicos para el total de discontinuidades del área de estudio, se muestra el valor de $x=20$ (línea punteada negra)

Tabla 4 Rangos de valores normalizados del peso hidráulico para la zona de estudio

Rango	% representativo	orientación Predominante
0 - 0.02	28.8%	Familia 1
0.02 - 0.05	26.7%	Familia 3 y 4
0.05 - 0.2	21.7%	Familia 2 y 4
0.2 - 1	15.3%	Familia 1, 2 y 5
>1	7.5%	Familia 2

El rango de 0 - 0.02 representa el 28.78% de pesos hidráulicos y como se observa en la figura de pesos hidráulicos para toda la zona de estudio (Figura 14) la mayor concentración de polos se encuentra en el rango de fracturas de alto ángulo pertenecientes a la Familia 1 con dirección de buzamiento al 030. El resto de los datos se observan uniformemente distribuidos entre las otras familias.

En el caso del rango 0.02 - 0.05, éste representa el 26.67% de los datos de pesos hidráulicos en zona de estudio y se observa una alta dispersión de los polos que caen dentro de este rango. Una leve predominancia se logra ver en la densidad de polos dentro de la Familia 3 y 4 con rumbos hacia el NNE.

Para el rango 0.05 – 0.2, dentro del cual cae el 21.70% de los valores de pesos hidráulicos en la zona de estudio, se observa una alta dispersión en los polos con una leve predominancia en la densidad de los polos que caen en los rangos de buzamientos altos a medios de la Familia 2 y dentro de los rangos de la Familia 4.

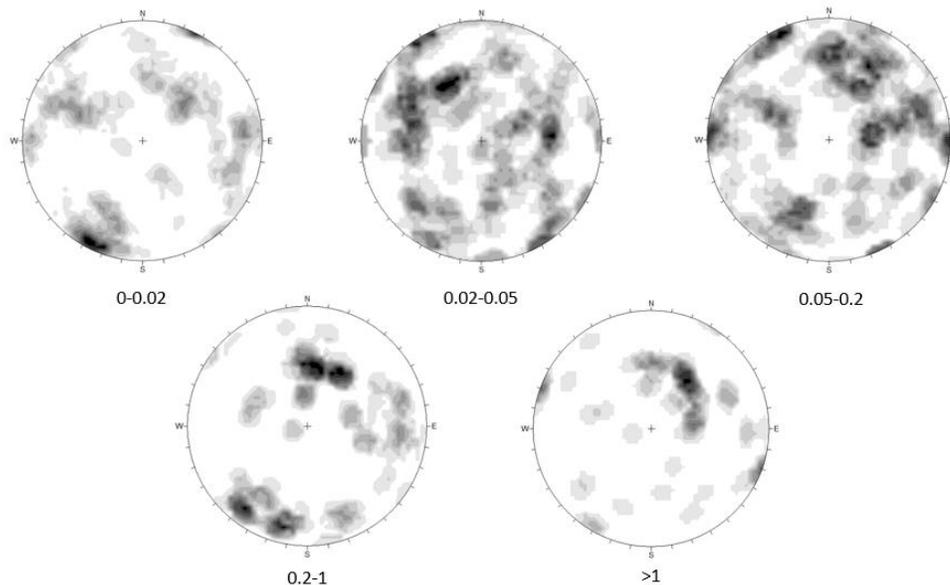


Figura 14. Distribución de los pesos hidráulicos por cada uno de los 5 rangos definidos en este trabajo. *Fuente:* este trabajo

En el rango 0.2 – 1, dentro del cual está el 15.35% de los valores de pesos hidráulicos de la zona de estudio, se logra observar una densidad de polos alta dentro de la Familia 1 y 2, y en menor proporción

de las familias 5 y 4. Finalmente para el rango de valores >1 se observa que la mayoría de los polos caen dentro de la Familia 2.

A continuación, al igual que como se hizo para dar una aproximación de la distribución espacial del fracturamiento, se mostrará un análisis sectorizado de los rangos con mayor peso hidráulico ($0.2 - 1$ y >1) en la zona de estudio. Además, se muestra un diagrama con el ploteo de los planos resultantes de la concentración de polos de peso hidráulico y el lineamiento (tubificación) resultante de la intersección de estos planos.

5.3.1. Sector W

Para el sector W de la zona de estudio, se observa que las fracturas con mayor peso hidráulico están en la Familia 2 (37/211) y Familia 1 (70/029) (Figura 15). En esta figura también se grafican las dos familias y el lineamiento (tubificación) resultante con dirección y leve inclinación al 305, el cual puede ser un conducto potencialmente transportador de agua.

En este caso se puede observar que la distribución de los pesos hidráulicos con valores altos en la zona de estudio está caracterizada y determinada por este sector al igual que la distribución espacial de las fracturas como ya se había descrito anteriormente.

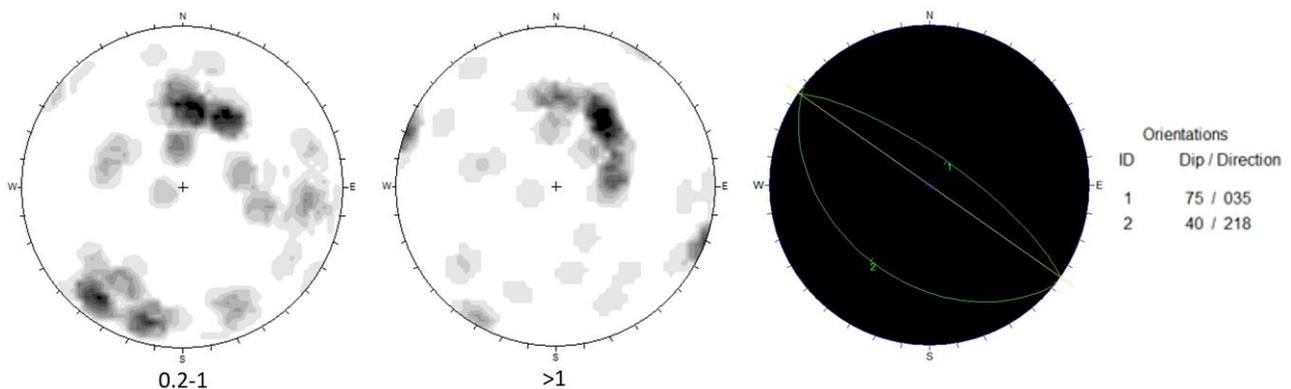


Figura 15. Densidad de polos de los mayores valores de peso hidráulico en el sector W (izquierda y centro) y ploteo del plano general de concentraciones de polos y sus respectivos lineamientos (tubificación) resultantes.

5.3.2. Sector NW

Los pesos hidráulicos con valores altos en este sector se encuentran distribuidos entre las Familias 1 (70/029), 2 (37/211) y 3 (51/115) formándose el mismo lineamiento mencionado en el análisis anterior y otro nuevo con dirección al 163. No se analiza la intersección entre el plano de la Familia 1 y 3 dado a que comparándose con la Familia 2 los pesos hidráulicos aquí son menores, ver Figura 16.

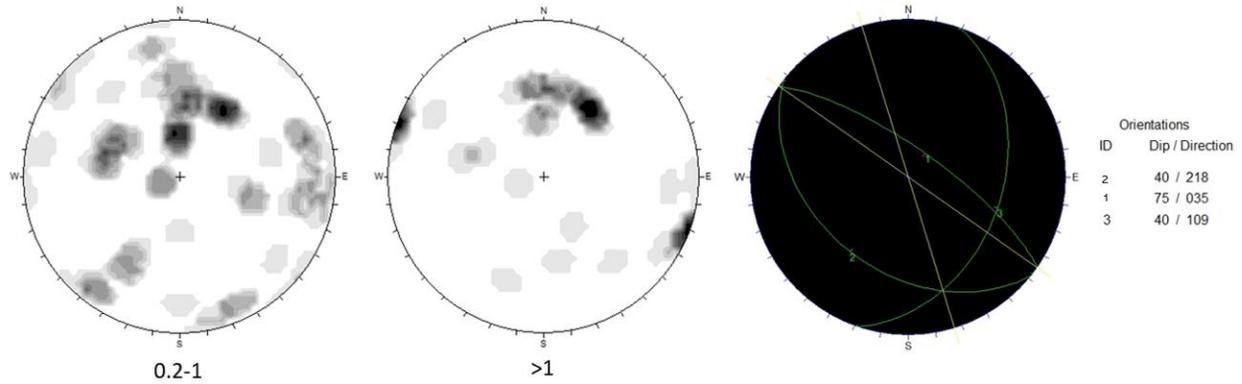


Figura 16 .Densidad de polos de los mayores valores de peso hidráulico en el sector NW (izquierda y centro) y ploteo del plano general de concentraciones de polos y sus respectivos lineamientos (tubificación) resultantes.

5.3.3. Sector SW

Los pesos hidráulicos altos en este sector se encuentran distribuidos entre las Familias 1 (70/029), 2 (37/211) y 4 (60/259). La intersección entre los planos generales de estas familias forman los siguientes lineamientos (tubificaciones): uno con una inclinación hacia el 242 formado por la intersección del plano general de Familia 2 y 4, otra con una inclinación al 290 resultante de la intersección del plano general de la Familias 1 y 2 y finalmente un lineamiento con inclinación al 296 producido por la intersección entre el plano genera de la Familias 1 y 4.

En este caso se tienen en cuenta las tres intersecciones dado que la importancia relativa de los pesos hidráulicos de las fracturas pertenecientes a las Familias 1 y 2 es similar (ver Figura 17).

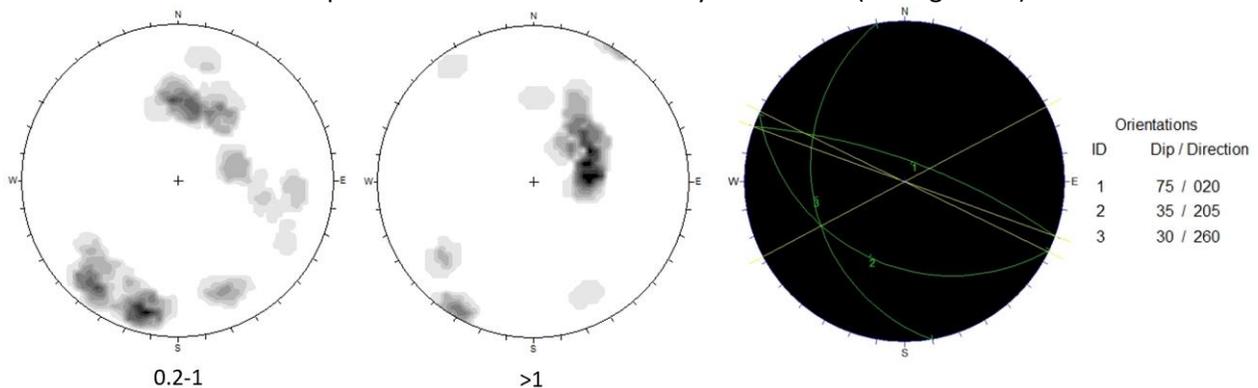


Figura 17 Densidad de polos de los mayores valores de peso hidráulico en el sector SW (izquierda y centro) y ploteo del plano general de concentraciones de polos y sus respectivos lineamientos (tubificación) resultantes.

5.3.4. Sector E

Los pesos hidráulicos altos en este sector (Figura 18) se encuentran representados por 11 polos cuyas concentraciones son claras en la zona de la Familia 4 y Familia 1. Los planos que representan estas fracturas con alto peso hidráulico en su intersección generan un lineamiento con dirección 302 con una inclinación media.

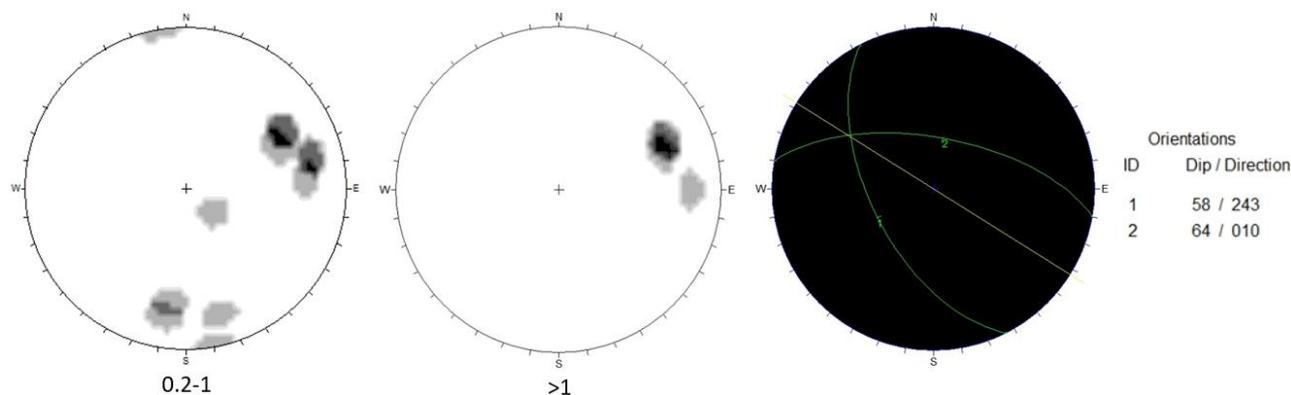


Figura 18. Densidad de polos de los mayores valores de peso hidráulico en el sector E (izquierda y centro) y ploteo del plano general de concentraciones de polos y sus respectivos lineamientos (tubificación) resultantes

5.4. Análisis cinemático de estabilidad de taludes

En este trabajo se analizó el modo de ruptura plana dado a la simplicidad con que se puede representar en un estereograma. La ruptura plana puede ocurrir cuando una discontinuidad buza en una dirección cercana a aquella de la cara del talud y la magnitud del buzamiento es mayor a la del ángulo de fricción interna del material (Suarez-Burgoa, 2016). Las discontinuidades con las que se hizo el análisis son las que mayor peso hidráulico tienen dentro del sector en que están los taludes a analizar.

Para el valor del ángulo de fricción interna se utilizó un valor de 27° , intermedio entre los presentados por Solingral (2010) y Carmenates y Lacaba (2003) los cuales corresponden a saprolitos de dunitas de la Dunita de Medellín y dunitas serpentinizadas en Cuba, respectivamente.

Los taludes a los cuales se le realizó el análisis corresponden a laderas con ocurrencia de movimientos en masa inventariados en la base de datos de Desinventar y que cumplían con las condiciones de haberse presentado desde el año 2007 hasta mediados del 2019 sobre la vía Las Palmas. Las orientaciones de estos taludes son resumidas en la Tabla 5.

Tabla 5. Orientación de los taludes con ocurrencia de movimientos en masa inventariados para este trabajo

Orientación (Dip/Dip Direction)	Descripción
37/167	km 6
40/297	km 7
50/302	La Colegiatura
45/313	Retorno #7

5.4.1. Talud km 6

Este es el talud más septentrional del área de estudio, tiene una orientación 37/167 y es el único de los 4 incluidos en este trabajo que buza al SE. El análisis cinemático fue llevado a cabo con respecto a las fracturas con mayor peso hidráulico del sector NW debido a que es en éste donde se encuentra el talud.

Dentro de la zona de planos potenciales a tener cinemática (recuadro negro) en la Figura 19, caen 3 de los 98 polos ploteados en el estereograma. Estos polos son de planos pertenecientes a la Familia 2. Para los análisis cinemáticos también se tuvieron en cuenta los lineamientos (tubificaciones) identificados anteriormente. En este caso la tubificación con inclinación al 163 que se forma en el sector NW pasa dentro del rango lateral de direcciones de inclinaciones potenciales a tener cinemática.

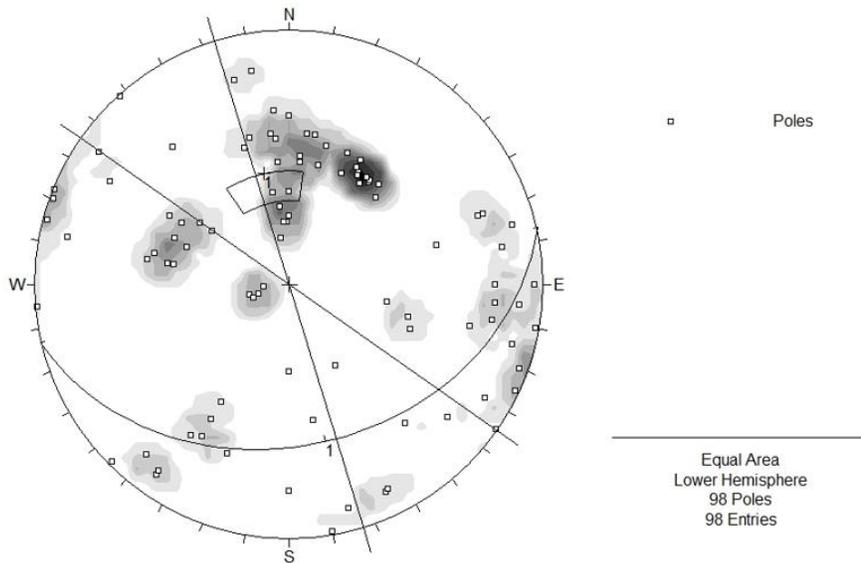


Figura 19. Análisis cinemático de estabilidad del talud km6

5.4.2. Talud km 7

Talud con una orientación de 40/297 ubicado en el km 7 de la vía Las Palmas. Este talud se encuentra dentro del Sector NW y en cuanto a las discontinuidades dentro de la zona de planos potenciales a tener cinemática (recuadro negro) en la Figura 20 se encuentran 2 de los 98 polos con mayores valores de peso hidráulico del área.

Los polos dentro de la zona con potencial de tener cinemática son pertenecientes a la Familia 4. Además, se puede observar que la tubificación con inclinación al 305 pasa dentro del rango lateral de direcciones de inclinaciones potenciales a tener cinemática.

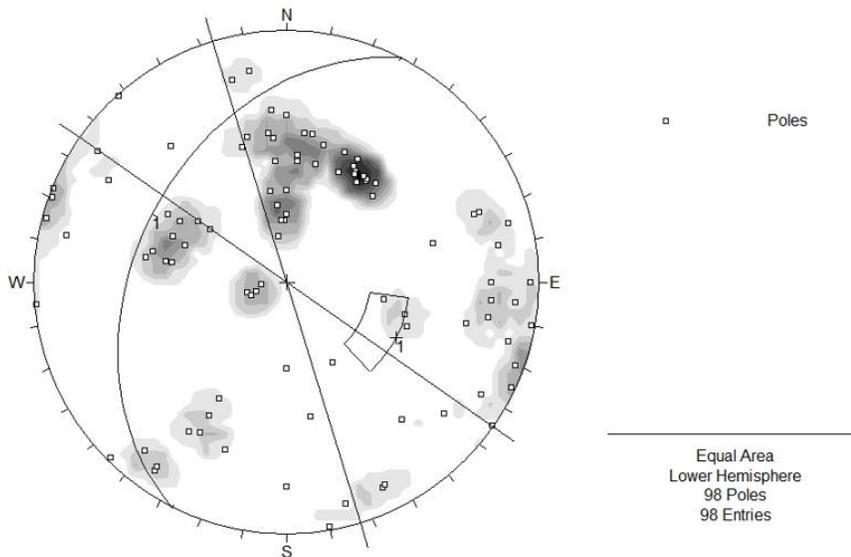


Figura 20. Análisis cinemático de estabilidad del talud km7

5.4.3. Talud La Colegiatura

Talud sobre el cual se presentó un movimiento en masa a la altura de La Colegiatura. La orientación de este es 50/302, se ubica en el sector NW y es el talud con mayor inclinación de los 4 considerados en este trabajo. En cuanto a las discontinuidades dentro de la zona de planos potenciales a tener cinemática (recuadro negro en la Figura 21) se encuentran 2 de los 98 polos con mayores valores de peso hidráulico del sector NW. Estos planos pertenecen a la Familia 4 y se puede observar que la tubificación con inclinación al 305 pasa dentro del rango lateral de direcciones de inclinaciones potenciales a tener cinemática.

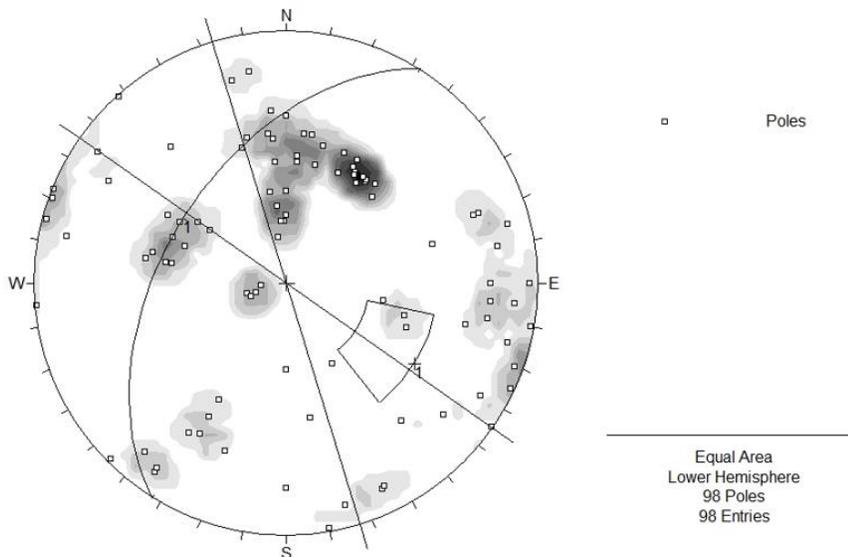


Figura 21. Análisis cinemático de estabilidad del talud La Colegiatura

5.4.4. Talud Retorno #7

Este es el talud más meridional del área de estudio. A pesar de esto, aún sigue ubicado en sector NW y, por tanto, se hace el análisis con los mismos 98 polos de los valores de peso hidráulicos más altos para este sector. El talud tiene una orientación 45/313 y en cuanto a las discontinuidades dentro de la zona de taludes potenciales a tener cinemática (recuadro negro) en la Figura 22 se encuentra 1 de los 98 del área.

El polo planteado dentro de la zona con potencial de tener cinemática es perteneciente a la Familia 5 y se puede observar que la tubificación con inclinación al 305 también pasa dentro del rango lateral de direcciones de inclinaciones potenciales a tener cinemática

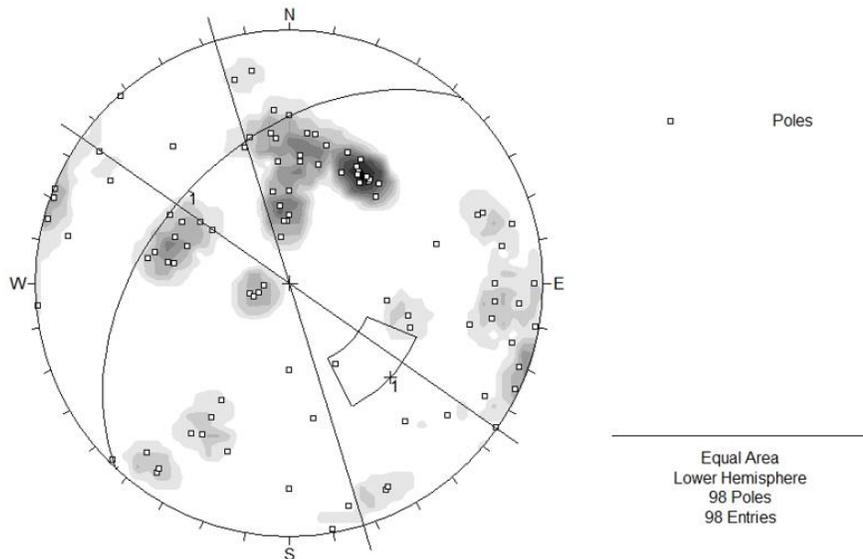


Figura 22. Análisis cinemático de estabilidad del talud Retorno #7

En los análisis anteriores se puede observar que en las zonas que indican planos potenciales a tener cinemática (recuadros negros) caen un máximo de 3 planos por cada talud analizado, y en cuanto a las tubificaciones, de las 2 presentes en el sector NW, siempre hay una que pasa dentro del rango lateral de direcciones de inclinaciones potenciales a tener cinemática.

Los planos con potencial a tener cinemática (desfavorables) en los taludes buzando al NW, son pertenecientes a la Familia 4 y 5, mientras que para el talud con dirección de buzamiento al SE son planos pertenecientes a la Familia 2.

6. Discusión

El flujo subsuperficial de agua a treves del medio fracturado y carsificado del segmento sur de la Dunita de Medellín es influenciado por la distribución y configuración de sus discontinuidades, esto le impéreme un carácter anisotrópico a la dirección del flujo, al que en este trabajo se le intenta relacionar con la distribución y ocurrencia de movimientos en masa en la ladera sobre la vía las Palmas.

6.1. Flujo Potencial en la Dunita de Medellín y su relación con los Movimientos en Masa

A partir del análisis de los resultados de este trabajo, se puede establecer que las fracturas que tienen mayor potencial de ser conductoras de agua a través de la Dunita de Medellín buzcan **hacia el 030, 220 y 320** para el sector W y al 010 y 245 en el sector E. De lo anterior se podría afirmar que los flujos generales para la Dunita de Medellín tienen tendencias: al NW, al NE - SW. También se analizó la configuración de sistemas de “tubificaciones”, formados por la intersección de los planos mencionados. Se identificaron 3 lineamientos (tubificaciones) importantes para la Dunita, dos con dirección al NW (305 y 295) y otro al SE (165).

Hencher (2010) menciona que gran parte del flujo a través de suelos y rocas es generalmente transportado en tubificaciones. Estas estructuras mejoran la conductividad hidráulica y pueden tener una fuerte influencia sobre la ocurrencia de deslizamientos. Las conductividades hidráulicas son incrementadas en magnitud en la Dunita de Medellín gracias a la presencia estas tubificaciones y de canales cárnicos con direcciones NW como es reportado en otros trabajos como el de Vásquez (1993) y Herrera et al., (2004).

El análisis cinemático de estabilidad de taludes realizado en este trabajo concuerda desde un punto de vista muy cualitativo con la relación mencionada por Hencher (2010), pues a pesar de que se presentaron planos con potencial a tener cinemática, pertenecientes a las Familias cuyos valores promedio de abertura fueron medios y altos (Familia 4 y 2), la cantidad de planos ploteados en estas zonas (7 de 98) no son tan representativos como para establecer algún tipo de relación. Sin embargo, en el caso de las tubificaciones, 2 de 3 mostraron pasar dentro del rango lateral de direcciones de inclinaciones potenciales a tener cinemática con respecto a los 4 taludes analizados.

De lo anterior se puede confirmar que, desde el punto de vista del análisis cinemático de estabilidad, existe una mejor relación entre la orientación de las tubificaciones y la ocurrencia de movimientos en masa en comparación con el análisis de orientación de planos de discontinuidades con altos pesos hidráulicos.

En el caso de las tubificaciones, estas no son características planares a través de las cuales pudieran ocurrir deslizamientos desde el punto de vista de un análisis cinemático por ruptura plana, es entonces, el flujo asociado a estas tubificaciones, que al causar erosión en laderas y saturaciones en perfiles de suelos en los que se descargan en un corto lapso, el potencial causante de varios de los movimientos en masa en esta ladera Suroriental del Valle de Aburrá.

Las tubificaciones entonces como uno de los mayores conductos de agua junto con las características cárnicas en el segmento sur de la Dunita de Medellín, a su vez definidas y relacionadas con la orientación y características geomecánicas del fracturamiento, determinan flujos potenciales subterráneos del agua en direcciones 305, 295 y 165 (Figura 25).

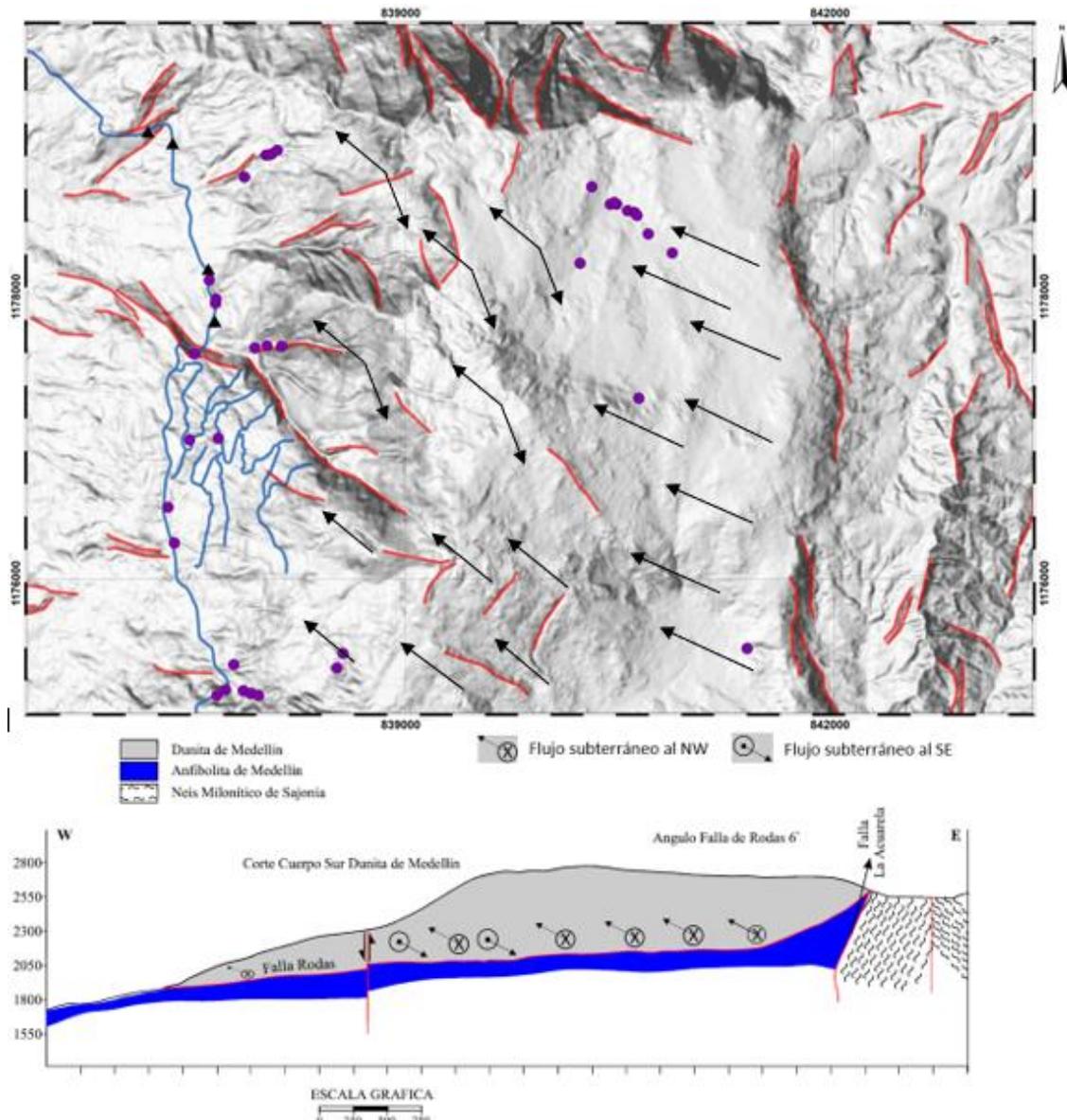


Figura 23. Flujos potenciales a través de las fracturas en la Dunita de Medellín. Vista en superficie (arriba), vista a profundidad (abajo). Fuente: (corte tomado y modificado Rodríguez et al., (2005))

A pesar de que no es uno de los objetivos de este trabajo tratar con implicaciones tectónicas a las que pudo estar sometida la Dunita de Medellín, se ve la necesidad de hacer un pequeño apartado para tratar este tema sin mucha profundidad, pues varios autores resaltan la importancia de la tectónica sobre el flujo de fluidos a través de las diferentes estructuras y deformaciones relacionadas (Mailloux et al., 1999; Singhal y Grupta, 2010; Saffer y Tobin, 2011).

Singhal y Grupta (2010) muestran idealmente como se forman cuatro sets (familias) de fracturas en un cuerpo de roca con respecto a un sistema regional de esfuerzos (Figura 24). Se muestran dos sets de fracturas ortogonales entre sí, unas fracturas tensionales paralelas a σ_1 y otras perpendiculares a estas

de cizalla; y otros dos sets conjugados que corresponden a fracturas de cizalla, formando entre si un ángulo aproximado de 60° bisectado por σ_1 .

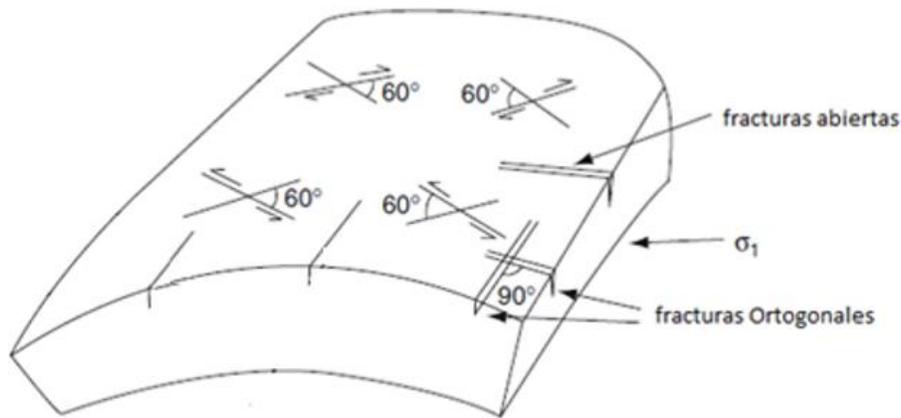


Figura 24. Sistemas de fracturas ideales bajo un sistema de esfuerzos (σ_1). Fuente: Tomado y Modificado de Singhal y Grupta (2010).

El número de familias de fracturas que fueron encontradas en este trabajo (5 Familias) junto con algunos “subgrupos” con las mismas orientaciones, pero mayores inclinaciones, indican que el fracturamiento observado en la Dunita de Medellín corresponde a la superposición de más de un evento tectónico

6.2. Deformación Dúctil

Deformación dúctil en la Dunita de Medellín es evidenciada en la orientación preferencial de granos y agregados de cromitas con alargamientos en sentido N-S (Kammer, 1992) y bandeamientos composicionales definidos en planos diferencialmente serpentinizados con buzamientos bajos hacia el NW y SE encontrados por (Solingal, 2011).

La deformación dúctil estaría relacionada con el cabalgamiento de la Dunita sobre las rocas del Complejo El Retiro hacia el Triásico tardío (Restrepo, 2008), pues es paralela y concordante con el plano de cabalgamiento y el movimiento relativo de la Dunita que proponen Rodríguez et al., (2005). Estos autores indican una dirección de cabalgamiento en sentido NW - SE (para la ubicación actual del continente suramericano), al evidenciar que el plano de deslizamiento de la falla Rodas (contacto entre la Dunita y las rocas del Complejo el Retiro) en el segmento Central y Sur de la Dunita de Medellín buza hacia el Occidente y el Norte, además de encontrar estructuras cinemáticas en los contactos con las Anfibolitas de Medellín y el Neis Milonítico de Sajonia que corroboran el sentido del movimiento.

6.3. Deformación Dúctil-Frágil

Los subgrupos de discontinuidades con altos buzamientos que se presentan en el área pueden estar relacionados con una deformación dúctil-frágil que estaría vinculada a la activación y aparición de estructuras con dirección N-S y N15W de alto ángulo del borde occidental de la cordillera central en

especial la zona de falla de San Jerónimo (Ordóñez-Carmona et al., 2005) durante el Cretácico Medio hasta el Mioceno, cuando ocurren una serie de acreciones secuenciales destrales oblicuas de terrenos contra el borde occidental del norte de Suramérica (Cediel et al., 2003).

Solingral (2011) reporta dentro de este tipo de deformación en la Dunita de Medellín una serie de fallas con dirección N60E subverticales con evidencias de movimiento de rumbo sinistral. Dentro de las discontinuidades que se encontraron en este trabajo, concuerdan con estas observaciones el fracturamiento de alto ángulo que se presenta en las Familias 3 y 4 con rumbos N50E y N10W con importante aparición en el sector E (ver Figura 9 y 22).

6.4. Deformación Frágil

La deformación frágil en la Dunita es observada en este trabajo en una serie de planos generales correspondientes a las familias de discontinuidades definidas (Figura 24). Las propiedades geomecánicas de éstas, las cuales determinan directamente su peso hidráulico como fue calculado, también permiten realizar un análisis de esfuerzos, los cuales en este caso se acomodan a un sistema compresivo con σ_1 en dirección N60W. El análisis de la relación entre la distribución de las discontinuidades y sus propiedades geomecánicas con σ_1 es descrito a continuación e ilustrado en la Figura 22.

Las familias con mayores concentraciones de pesos hidráulicos altos, como lo mostraron los resultados para este trabajo, son las Familias 1 y 2, lo que indica que las fracturas tensionales (con mayores aberturas) tienen rumbos N50-60W. Los valores promedios de abertura para éstas son de 1.8 y 2.86 mm, respectivamente.

Las Familias 4 y 5 con rumbos N10W y N50E y aberturas promedio de 2.1 mm y 2.6 mm, respectivamente, tiene una distribución que se ajusta al set de fracturas conjugadas de cizalla con σ_1 como bisectriz. El valor promedio de las aberturas de alto a medio que se presentan para estas familias se discutirá más adelante. Finalmente, la Familia 3 con rumbo N30E y el promedio de aberturas más bajo de las cinco familias (1.5 mm) se ajusta a las fracturas de que se forman ortogonales a σ_1 .

La configuración de esfuerzos que generó el sistema de fracturas descrito se le atribuye en este trabajo a la acreción del Bloque Chocó sobre el flanco noroccidental de la Cordillera Occidental durante el Mioceno medio (Duque-Caro, 1989) pues la cronología de eventos y su posible deformación asociada concuerda con un σ_1 como el descrito arriba.

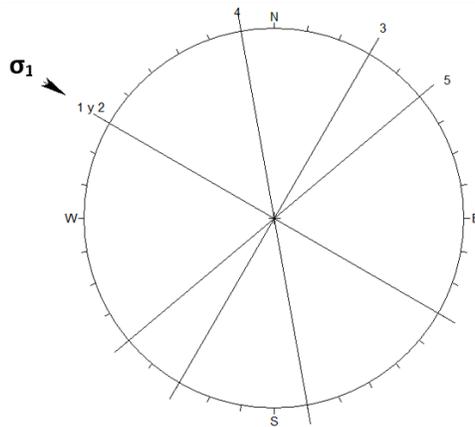


Figura 25 Disposición general de las familias de discontinuidades definidas en este trabajo y el esfuerzo que se infirió pudo haberlas generado

Finalmente, en este análisis se le atribuyen las aberturas relativamente altas de las Familias 4 y 5, que bajo un σ_1 con dirección N60W tendrían una naturaleza más de cizalla, al movimiento relativo del Bloque Norte Andino con respecto a la placa Sur América en dirección al N60E (Mora-Páez et al. 2019), dado que esto puede suponer un σ_1 actual con esa dirección, guardando un paralelismo entre estas familias y el supuesto σ_1 . Esto concuerda igualmente con la presencia de fracturas muy cerradas dentro de un “subgrupo” de fracturas de alto ángulo de la Familia 1, perpendiculares al supuesto σ_1

7. Conclusiones y Recomendaciones

El flujo de agua subterránea a través de la Dunita de Medellín se daría potencialmente en dirección NW. Desde el sector E de la Dunita y en su recorrido hacia el W de la Dunita el flujo se daría por una serie de conductos o tubificaciones con dirección de inclinación al NW (305 y 295) y otros subordinados en dirección SE (165). Este último es más notable hacia el Sector NW de la Dunita.

Desde el punto de vista hidro-estructural las discontinuidades que mayor influencia tienen en el flujo son las perteneciente a la Familia 2 con orientación general 37/211, con los valores promedio de abertura y continuidad mas altos de todas las familias, además de ser la más numerosa y su interacción con otras discontinuidades son determinantes para la dirección de flujo resultante del agua en la Dunita de Medellín.

Se pone en evidencia la existencia de una predisposición tectónica al curso en la Dunita de Medellín, en especial tomando en cuenta las deformaciones frágiles impuestas en este cuerpo, cuya principal tendencia es en dirección NW correspondiente a los rumbos de las Familias de discontinuidades más numerosas, las Familias 1 y 2, y que son los escenarios tectónicos durante el Mioceno y el actual en el borde Noroccidental de Suramérica los que determinan el comportamiento hidroestructural en la Dunita de Medellín.

Se propone en este caso que la naturaleza del flujo de aguas subterráneas en la Dunita de Medellín si está relacionada con la ocurrencia de movimientos en masa sobre la vía las palmas. La repartición de presiones sobre el talud y su relación con los movimientos en masa se debe a las tubificaciones con sus

direcciones preferenciales al NW y SE, esto dado a la erosión y saturación de suelos sobre el material rocoso causados por la descarga de agua de estas estructuras en superficie.

Por la forma en que se configuran los lineamientos (tubificaciones) aquí nombradas, se recomienda hacer un análisis cinemático de estabilidad de taludes en cuña, pues estas estructuras se forman por la intersección de planos, en cuanto a la determinación del flujo, se deben corroborar con estudios de conductividad hidráulica en campo.

Con el fin de entender de mejor forma estos canales y tubificaciones mencionadas, se deben hacer reconocimientos de nacimientos y manantiales a lo largo de toda la ladera Suroriental del valle de Aburrá y hacer un seguimiento de esos canales subterráneos por medio de métodos geofísicos. En cuanto a las laderas con presencia de inestabilidad, corroborar en tiempo real durante eventos de precipitación intensa si el nivel de saturación en los suelos sobre la ladera corresponde con una saturación por infiltración directa en el área o por un rápido aporte desde agua subterráneas.

El reconocimiento de estas estructuras potencialmente conductora de agua se hace indispensable a la hora de planeación y ejecución de proyectos ingenieriles en esta ladera ya que es aquí en donde se incurre realmente en un riesgo por pérdidas de vidas y económicas.

Bibliografía

- Aristizábal, E., & Gómez, J. (2007). Inventario de Emergencias y Desastres en el Valle de Aburrá Originados por Fenómenos Naturales y Antropicos en el Periodo 1880-2007. *Gestion y Ambiente*(2), 17-30.
- Binet, S., Mudry, J., Scavia, C., Campus, S., Bertrand, C., & Guglielmi, Y. (2007). In situ characterization of flows in a fractured unstable slope. *Geomorphology*, 86, 193-203.
- Carmenates, Y., & Lacaba, R. (2003). *Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo serpentinitico del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Cuba*.
- Cediel, F., Shaw, P., & Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. *AAPG Memoir*, 79, 815-848.
- Chica, A. (1979). *Aspectos mecánicos e hidraulicos de las rocas*. Medellín: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Croizer, M. J. (1986). *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. London: Croom Helm.
- Departamento Administrativo de Planeación. (Diciembre de 2007). Resolución Numero 273. Medellín.
- Desinventar. (s.f.). Recuperado el 2 de Agosto de 2019, de <https://www.desinventar.org/es/desinventar.html>
- Duque-Caro, H. (1990). The Choco Block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1), 71-84.

- Flórez, C., Ramírez, M., & Monsalve, G. (s.f.). *Metodología para el Tratamiento de Datos Estructurales para la Definición de Modelos Hidrogeológicos Conceptuales en Medios Fracturados*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Hencher, R. (2010). Preferential flow paths through soil and rock and their association with landslides. *Hydrol. Process.*, 24, 1640 - 1630.
- Herrera, J., Hoyos, F., & Vélez, J. (2004). El acuífero cársico de las Dunitas de Medellín. *Congreso Colombiano de Hidrogeología*. Obtenido de https://www.academia.edu/1415839/EL_ACUÍFERO_CÁRSICO_DE_LAS_DUNITAS_DE_MEDELLÍN
- Hoyos, F. (s.f.). *Hidrogeología de la Zona Central de Antioquia*. Academia.edu.
- Kammer, A. (1991). La Dunita de Medellín y sus relaciones estructurales con el basamento metamórfico e intrusivo de la corillera Central, Departamento de Antioquia. *Bol. Geología*, 20(35), 65-106.
- Lisle, R., & Leyshon, P. (2004). *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers* (Segunda ed.). New York: Cambridge University Press.
- Mailloux, B., Person, M., Kelley, S., Dunbar, N., Cather, S., Straye, L., & Hudleston, P. (1999). Tectonic controls on the hydrogeology of the Rio Grande Rift, New Mexico. *Water Resources Research*, 35(9), 2641-2659.
- Mora-Paez, H., Kellogg, J., Freymueller, J., Mencin, D., Fernandes, R., Diederix, H., . . . Corchuelo-Cuervo, Y. (2019). Crustal deformation in the northern Andes – A new GPS velocity field. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 76-91.
- Ordóñez-Carmona, O., Marín, M., Canola, E., Ruiz, M., Rendon, A., & Rios, C. (2005). *GENERALIDADES DEL SISTEMA DE FALLAS DE ROMERAL EN LAS CERCANÍAS A MEDELLÍN*. doi:10.13140/2.1.5110.5285
- Pereira, E., Ortiz, F., & Prichard, H. (2006). Contribucion al Conocimiento de las Anfibolitas y las Dunitas de Medellín (Complejo Ofiolítico de Aburrá). *DYNA*, 149, 17-30.
- Restrepo, J. (2008). Obducción y Metamorfismo de Ofiolitas Triásicas en el Flanco Occidental del Terreno Tahamí, Cordillera Central Central de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*(22), 49 - 100.
- Restrepo, J., Ordóñez-Carmona, O., Martens, U., & Correa, A. (2009). Terrenos, Complejos y Provincias en la Cordillera Central de Colombia. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 9(2), 49-56.
- Rodríguez, G., Gonzáles, H., & Zapata, G. (2005). *Geología de la plancha 147 Medellín Oriental*. Medellín: INGEOMINAS.
- Saffer, D., & Tobin, H. (2011). Hydrogeology and Mechanics of Subduction Zone Forearcs: Fluid Flow and Pore Pressure. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 39, 157-180.

- Salvá, M., & Velásquez, A. (2013). *Mecanismo de Falla en Deslizamientos Profundos en Laderas de Alta Pendiente del Valle de Aburrá*. Envigado: Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Servicio Geológico Colombiano y Universidad Nacional de Colombia. (2016). *Guía Metodológica para Estudios de Amanaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa*. Bogota.
- Singhal, S., & Gupta, P. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks* (Segunda ed.). New York: Springer.
- Solingral. (2011). *Medidas de mitigación de la ladera oriental del valle de Aburrá entre las quebradas La Poblada y La Sanín*. Medellín: Alcaldía de Medellín.
- Suárez, D. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos .
- Suárez-Burgoa, L. (2016). *Análisis de estabilidad de taludes con aplicaciones en MATLAB*. Medellín: independiente, por el autor.
- Vásquez, A. (1993). *Geomorfología Cársica en Santa Helena (Vereda el Plan)*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Wyllie, D., & Mah, C. (2004). *Rock Slope Engineering Civil and Mining*. Taylor & Francis Group.