

RELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y LA ESCORRENTÍA EN DOS TALUDES
COMPUESTOS POR SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS, Y SU
INFLUENCIA EN DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES.



Auxiliares de investigación

MICHAEL BRANDON BETANCUR BETANCUR
ANDRÉS FELIPE GRANDA CASTAÑO
JOSÉ DAVID RAMÍREZ PERDOMO

UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA
FACULTAD INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
PEREIRA
2015

RELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y LA ESCORRENTÍA EN DOS TALUDES
COMPUESTOS POR SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS, Y SU
INFLUENCIA EN DESLIZAMIENTOS SUPERFICIALES

Auxiliares de investigación

MICHAEL BRANDON BETANCUR BETANCUR
ANDRÉS FELIPE GRANDA CASTAÑO
JOSÉ DAVID RAMÍREZ PERDOMO

Proyecto para optar el título de Ingeniero civil

Investigadora principal
ING. GLORIA MILENA MOLINA VINASCO

UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA
FACULTAD INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
PEREIRA
2015

NOTA DE ACEPTACIÓN.

JURADO

JURADO

Pereira, Diciembre del 2015

DEDICATORIA

A nuestros seres queridos especialmente nuestros padres, que fueron el motor de motivación y de crecimiento personal para nuestro desarrollo como seres humanos de bien y de utilidad para una mejor sociedad.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios por darnos la vida, a nuestros seres queridos por el apoyo incondicional, a la Universidad LIBRE y al grupo de docentes por poner a nuestro servicio toda su capacidad académica para engrandecer nuestra vida profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. JUSTIFICACIÓN.....	17
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	20
2.1.1 Climatología de la ciudad de Pereira.....	21
2.2 CLIMATOLOGÍA DE LA CIUDAD DE DOSQUEBRADAS.....	22
2.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	24
3. OBJETIVOS.....	25
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
4. MARCO REFERENCIAL.....	26
4.1 ANTECEDENTES.....	26
4.2 MARCO TEÓRICO.....	30
4.2.1 Resistencia y agua en los suelos.....	31
4.2.1.1 Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.....	38
4.2.2 Conceptos sobre erosión y deslizamientos de suelos.....	42
4.3 MARCO LEGAL.....	48
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	50
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	50
5.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....	51
5.3 MARCO GEOGRÁFICO DE PEREIRA Y DOSQUEBRADAS.....	52
5.4 CONSTRUCCIÓN DEL PUNTO DE ESTUDIO.....	55
5.5 ENSAYOS LABORATORIO.....	61
5.5.1 Ensayo para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas, con base en la masa.....	63
5.5.1.1 Norma Técnica Colombiana (NTC) 1495.....	63
5.5.2 Ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos cohesivos.....	64
5.5.2.1 Norma Técnica Colombiana (NTC) 4630.....	64

5.5.3	Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 μ m en agregados minerales.....	64
5.5.3.1	Norma Técnica Colombiana (NTC) 78.....	64
5.5.4	Determinación de la gravedad específica de los suelos.....	65
5.5.4.1	Norma Técnica Colombiana (NTC) 1974.....	65
5.5.5	Método de ensayo para determinar el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas y drenadas.....	66
5.5.5.1	Norma Técnica Colombiana (NTC) 1917.....	66
5.5.6	Método de ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos.....	68
5.5.6.1	Norma Técnica Colombiana (NTC) 1967.....	68
5.6	ANÁLISIS DE LA LLUVIA.....	69
5.7	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PERFIL ESTRATIGRÁFICO	70
6.	RESULTADOS.....	73
6.1	RESULTADOS INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA.....	73
6.2	TABLAS DE REGISTROS DE LLUVIAS ESTACIÓN MATECAÑA.....	80
6.3	Tablas de evapotranspiración.....	84
6.4	RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS.....	85
6.4.1	Resultados de consolidación.....	86
6.5	Resultados de factor de seguridad.....	88
	CONCLUSIONES.....	98
	BIBLIOGRAFÍA.....	101
	ANEXOS.....	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Porcentajes suelos erosionados en Colombia según diferentes fuentes de información (período 1977 – 2000).	44
Tabla 2. Variables de investigación	51
Tabla 3. Datos de infiltración y escorrentía mes de marzo Milan (Dosquebradas).	73
Tabla 4. Datos de infiltración y escorrentía mes de abril Milan (Dosquebradas).	74
Tabla 5. Datos de infiltración y escorrentía mes de mayo Milan (Dosquebradas).	75
Tabla 6. Datos de infiltración y escorrentía mes de junio Milan (Dosquebradas).	75
Tabla 7. Datos de infiltración y escorrentía mes de julio Milán (Dosquebradas).	76
Tabla 8. Datos de infiltración y escorrentía mes de agosto Milan (Dosquebradas).	77
Tabla 9. Datos de infiltración y escorrentía mes de marzo Combia (Pereira).	77
Tabla 10. Datos de infiltración y escorrentía mes de abril Combia (Pereira).	78
Tabla 11. Datos de infiltración y escorrentía mes de Mayo Combia (Pereira).	79
Tabla 12. Datos de infiltración y escorrentía mes de junio Combia (Pereira).	80
Tabla 13. Valores estimados de evapotranspiración de referencia (ET _o) y la evaporación de tanque A (mm) para algunas estaciones de la región cafetera de Colombia.	84
Tabla 14. Clasificación del suelo	85
Tabla 15. Características físicas de los suelos	85
Tabla 16. Características mecánicas de los suelos	86
Tabla 17. Ensayo de consolidación Combia	86
Tabla 18. Ensayos de consolidación Milán	87
Tabla 19. Parámetros para el cálculo de factor de seguridad para suelo parcialmente saturado con succión en Combia.	88
Tabla 20. Factor de seguridad para una succión de -91.78 cm de agua en Combia	89
Tabla 21. Factor de seguridad para una succión de -101.97 cm de agua en Combia.	89
Tabla 22. Factor de seguridad para una succión de -112.17 cm de agua en Combia.	90
Tabla 23. Factor de seguridad para una succión de -122.37 cm de agua en Combia.	90
Tabla 24. Factor de seguridad para una succión de -132.57 cm de agua en Combia.	91
Tabla 25. Factor de seguridad para una succión de -142.76 cm de agua en Combia.	92

Tabla 26. Parámetros para el cálculo de factor de seguridad para suelo parcialmente saturado con succión en Milán.....	94
Tabla 27. Factor de seguridad para una succión de -28.55 cm de agua en Milan.	94
Tabla 28. Factor de seguridad para una succión de -20.39 cm de agua en Milan.	95
Tabla 29. Factor de seguridad para una succión de -21.41 cm de agua en Milán.	96
Tabla 30. Factor de seguridad para una succión de -17.34 cm de agua en Milan.	96
Tabla 31. Porcentaje contenido de humedad Combia	105
Tabla 32. Porcentaje contenido de humedad Milán	105
Tabla 33. Peso unitario Milán	106
Tabla 34. Peso unitario Combia.....	106
Tabla 35. Lavado por tamiz 200	106
Tabla 36. Límites de Atterberg Milán	107
Tabla 37. Límites de Atterberg Combia	108
Tabla 38. Gravedad especifica Milán.....	109
Tabla 39. Gravedad especifica Combia	109
Tabla 40. Datos de la muestra ensayo 1 Combia	110
Tabla 41. Datos de muestra ensayo 2 Combia	111
Tabla 42. Datos de la muestra ensayo 3 combia	112
Tabla 43. Datos de la muestra ensayo 1 Dosquebradas	114
Tabla 44. Datos de la muestra ensayo 2 Dosquebradas	115
Tabla 45. Datos de la muestra ensayo 3 Dosquebradas	116

LISTA DE GRAFICAS

Pág.

Grafico 1. Perfil del talud en Milán (Dosquebradas).	71
Grafico 2. Perfil del talud en Combia (Pereira).	72
Grafico 3. Registro de lluvia en Pereira mes de marzo.....	81
Grafico 4. Registro de lluvia en Pereira mes de abril.....	81
Grafico 5. Registro de lluvia en Pereira mes de mayo.....	82
Grafico 6. Registro de lluvia en Pereira mes de junio	82
Grafico 7. Registro de lluvia en Pereira mes de julio	83
Grafico 8. Registro de lluvia en Pereira mes de agosto.....	83
Grafico 9. Curvas características de retención de agua para suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia	93
Grafico 10. Limite líquido Milán.....	107
Grafico 11. Limite Liquido Combia.....	108
Grafico 12. Deformación unitaria Vs esfuerzo cortante combia	113
Grafico 13. Cohesión y fricción combia.....	113
Grafico 14. Deformación unitaria Vs esfuerzo cortante Dosquebradas	117
Grafico 15. Cohesión y fricción Dosquebradas.....	117
Grafico 16. Consolidacion a 2 Kgrms Combia	118
Grafico 17. Consolidación a 4 Kgrms Combia	118
Grafico 18. Consolidación a 8 Kgrms Combia	119
Grafico 19. Consolidación a 16 Kgrms Combia	119
Grafico 20. Consolidación a 2 Kgrms Milán	120
Grafico 21. Consolidación a 4 Kgrms Milán	120
Grafico 22. Consolidación a 8 Kgrms Milán	121
Grafico 23. Consolidación a 8 Kgrms Milán	121

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Mapa de Isoyetas de Pereira	22
Figura 2. Mapa de Isoyetas de Dosquebradas	23
Figura 3. Velocidad de infiltración.....	35
Figura 4. Erosión de suelo	43
Figura 5. Tipos de deslizamientos	45
Figura 6. Localización de Dosquebradas en el departamento de Risaralda	53
Figura 7. Punto de ubicación aérea barrio Milán	53
Figura 8. Localización de Pereira en el departamento de Risaralda.....	54
Figura 9. fotografía aérea combia baja	55
Figura 10. Predio talud Milan (Dosquebradas)	55
Figura 11. Lamina de zinc.....	56
Figura 12. Cerramientos de talud con zinc de 2 m x 2 m, Milán (Dosquebradas)..	56
Figura 13. Cerramientos de talud con zinc de 2 m x 3 m, Combia (Pereira.....	57
Figura 14. Codo 90 grados, tubería pvc 2`	57
Figura 15. Talud Milan(Dosquebradas). Vista en planta de la tubería	58
Figura 16. Talud Combia (Pereira). Vista en planta de la tubería	58
Figura 17. Pluviómetro Milán (Dosquebradas) diámetro=15 cm, volumen=4400 ml.	59
Figura 18. Talud Milán (Dosquebradas). Vista en planta de la tubería y recipiente para la recolección de agua, diámetro= 14 cm, volumen= 3078.7 ml.	59
Figura 19. Piezómetro, ubicado en Combia (Pereira).....	60
Figura 20. Construcción terminada del predio de escorrentía ubicado en Milán (Dosquebradas).....	61
Figura 21. Construcción terminada del predio de escorrentía ubicado en Combia (Pereira)	61
Figura 22. Instrumentos utilizados para extracción de muestra de suelo con tubo shelby	62
Figura 23. Extracción de muestra de suelo con tubo shelby, utilizando un tornillo sin fin para así llegar a una mayor profundidad.....	62
Figura 24. Aforo para la elaboración del perfil transversal del talud en Milán (Dosquebradas).....	70
Figura 25. Aforo para la elaboración del perfil transversal del talud en Combia (Pereira).	71
Figura 26. Porcentaje contenido de humedad Milán.....	122
Figura 27. Porcentaje contenido de humedad Combia	122
Figura 28. Pesos unitarios Combia	123
Figura 29. Limite líquido Milán	123
Figura 30. Limite plástico Milan	124

Figura 31. Limite líquido Combia	124
Figura 32. Limite plástico Combia.....	125
Figura 33. Lavado tamiz 200 Milán	125
Figura 34. Picnómetro con muestra de suelo para ensayo de gravedad específica Milán.....	126
Figura 35. Muestra lista para el horno para ensayo de gravedad específica Milan	126
Figura 36. Picnómetro con muestra de suelo para ensayo de gravedad específica Combia.....	126
Figura 37. Muestra lista para el horno para ensayo de gravedad específica Combia	127
Figura 38. Corte directo Milán.....	127
Figura 39. Corte directo Combia.....	127
Figura 40. Muestra lista para ensayo de consolidación Milán.....	128
Figura 41. Muestra lista para ensayo de consolidación Combia.....	128

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Esfuerzo efectivo.....	32
Ecuación 2. Coeficiente de reposo del suelo	33
Ecuación 3. Caudal diferencial	35
Ecuación 4. velocidad de escurrimiento.....	36
Ecuación 5. Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica [m/s]	37
Ecuación 6. Tiempo mínimo requerido desde el principio del ensayo hasta la ruptura.....	68

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Porcentaje contenido de humedad.....	105
Anexo B. Pesos unitarios.....	106
Anexo C. Lavado por Tamiz 200	106
Anexo D. Límites de Atterberg.....	107
Anexo E. Gravedad específica.....	109
Anexo F. Corte directo	110
Anexo G. Consolidación	117
Anexo H. Registro fotográfico laboratorios	122

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación hace referencia a un análisis del comportamiento de un predio de escorrentía en dos taludes compuestos por ceniza volcánica, en los municipios de Pereira y Dosquebradas para determinar qué efecto tiene la infiltración de las lluvias en el factor de seguridad frente a deslizamientos.

La caracterización y textura propia de los terrenos superficiales de Risaralda se debe a la cercanía de la región cafetera a la actividad de los Nevado del Ruiz y el Nevado de Santa Isabel, que ha generado suelos con grandes composición de cenizas. El objetivo de esta investigación es la magnitud de la infiltración y escorrentía en suelos derivados de cenizas volcánicas; para ello se escogieron dos predios de escorrentía uno en el Municipio de Dosquebradas en el sector del barrio Milán y el otro en la Vereda de Combia en el Municipio de Pereira.

La situación planteada propia de la región hace que se requiera el análisis de los taludes que por las características de los suelos, tienen un comportamiento diferencial a otros taludes con suelos de características diferentes frente a su desempeño en épocas de lluvias.

Los suelos de los municipios de Pereira y Dosquebradas están conformados por: cenizas volcánicas, depósitos aluviales, rellenos antrópicos, conglomerados y suelos residuales arcillosos. El estudio va a determinar la relación entre la precipitación y la escorrentía para conocer como esta relación afecta la estabilidad de un talud, además de la correlación entre los patrones de lluvia y fallas de pendientes en Milán (Dosquebradas) y Combia (Pereira). En los escritos se ha documentado extensamente los deslizamientos someros o superficiales que son aquellos causados principalmente por las lluvias locales, los procesos erosivos y la infiltración.

Para abordar esta problemática se planteó un estudio de carácter descriptivo que a través del uso de ensayos de laboratorio y toma de datos en campo, logrará identificar características como humedad de suelos, límite líquido, plástico y el índice de plasticidad; igualmente se estableció la gravedad específica de los suelos, el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas y drenadas, propiedades de consolidación unidimensional de los mismos, y la magnitud de la infiltración y escorrentía de los suelos analizados.

Estas pruebas, acompañadas de un análisis descriptivo del comportamiento de las lluvias en la zona de estudio permitieron realizar el análisis de estabilidad de taludes perfil estratigráfico. El estudio entrega un análisis completo de cada una de las pruebas, para lo que se empleó el uso de herramientas estadísticas como gráficas y tablas, con un soporte completo fotográfico del trabajo de campo realizado.

Esta investigación se ejecutó como un aporte a los procesos de diseños de obras civiles que se ejecuten dentro de la región, para que sean óptimos y de gran desempeño a la hora de construir taludes como medidas preventivas; ya que estos deben ser asumidos con esta condición y no como medida correctiva, pues los efectos climatológicos hacen que en época de lluvias estos taludes se reacomoden y sus propiedades varíen dañando el equilibrio del talud, generando deslizamientos afectando a la población mediante la obstrucción de vías y daños en las edificaciones.

El informe final contiene una recopilación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, que pudieron establecer las diferentes características de los suelos tanto físicas, como químicas; las cuales se ejecutaron bajo los protocolos de las respectiva Norma Técnica Colombiana NTC. Igualmente los resultados se respaldan por evidencia fotográfica, organización sistemática de los resultados en gráficas y tablas para su mejor comprensión.

El documento hace un cierre con conclusiones y recomendaciones como aporte a profesionales y estudiantes que harán consulta de los resultados obtenidos de esta investigación.

1. JUSTIFICACIÓN

Los problemas relacionados con la estabilidad de las laderas ya sean por condiciones naturales del terreno o por la intervención de obras de ingeniería contemplan diferentes problemáticas como lo son la naturaleza de los materiales de los suelos, construcción del talud, historia geológica del terreno, condiciones climáticas; características que en conjunto permiten conocer su comportamiento frente a la estabilidad del terreno y su impacto en la prevención de deslizamientos y derrumbes.

Los taludes son el mecanismo que se contempla como la obra, normalmente en tierra, que se construye, en las laderas con una inclinación tal que garantice la estabilidad del terreno, en zonas inclinadas. Pero no es desconocido que a pesar de estas obras preventivas, el almacenamiento de las agua lluvias en las laderas ocasionan el colapso de estos taludes, ocasionando deslizamientos y derrumbes.

Generalmente los fenómenos de remoción en masa están asociados a los períodos lluviosos, ya que la precipitación es uno de los factores detonantes principales de los deslizamientos. La intensidad y la duración de la lluvia necesaria para disparar el movimiento depende en cada caso de las condiciones iniciales de humedad y de la posición del nivel freático en la zona; estas variables guardan una estrecha relación con la precipitación precedente a que está sometido el talud¹

Cuando la precipitación cae sobre una ladera o talud, un porcentaje de ella es interceptado por la vegetación, otro se infiltra en el suelo o se almacena en las depresiones para luego infiltrarse en él. El proceso de infiltración continúa aún después de que cesa la lluvia y en algún momento pueden crearse condiciones críticas para la ladera o el talud, ya que la humedad del suelo y la posición del nivel freático han aumentado, generando presiones de poros, disminuyendo los esfuerzos efectivos y por consiguiente la resistencia al cortante Entonces se pueden alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o de toda la ladera².

¹ Cifuentes, Leidy D., Toro, Nhora M y Alzate, Alejandro. 2012. Relación entre el comportamiento de variables climáticas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catastróficos (Deslizamientos). [En línea] Disponible en < www.unilibrepereira.edu.co/publicaciones/index.php/espiritu/article/.../89> [Citado el: 25 de Octubre de 2015.]

² González G., Alvaro J. et al. (1990) Relaciones de Precipitación Crítica-Duración de Lluvias que disparan movimientos de masa en Santafé de Bogotá. Bogotá. 1990. Retomado en Cifuentes, Leidy D., Toro, Nhora M y Alzate, Alejandro. 2012. Relación entre el comportamiento de variables

Ante este panorama y al identificar que no existe un estudio y análisis del comportamientos de los taludes en suelos con altos contenidos de cenizas como lo son los de la región cafetera específicamente los de los municipios de Pereira y Dosquebradas, debido a la absorción de los suelos por las emisiones de cenizas de los volcanes de Santa Isabel y Nevado del Ruiz a través de los años. Se hizo necesario hacer un estudio detallado sobre el manejo de taludes y sobre la infiltración de las aguas lluvias sobre el suelo presente en la ciudad de Pereira y Dosquebradas.

Es importante entonces, estudiar el tema para tratar de brindar información, y poder disminuir el número de deslizamientos o el impacto que generan estos procesos en época de lluvia, que van desde: cambiar el terreno natural a tener impactos sociales complejos como pérdidas materiales y muchas veces pérdidas humanas.

El municipio de Pereira, cuenta con un historial de ocurrencia de deslizamientos que han impactado su desarrollo local y ocasionado cuantiosas pérdidas sociales y económicas, no cuenta con herramientas que le permitan generar sistemas de alerta temprana contra la ocurrencia de estos eventos. Tal situación se agudiza debido a la ausencia de investigaciones que aborden la problemática, dados los altos costos que demanda, también por la complejidad del tema y la ausencia de series climatológicas y de registros históricos de desastres, que permitan establecer correlaciones entre las variables de manera confiable y garantizando que sus resultado tengan aplicación local. Según la Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres del municipio de Pereira (OMPAD), en la ciudad en el periodo comprendido entre los años 1970 y el año 2000 habían ocurrido 348 posiblemente causados por lluvia³.

Ante las situaciones expuestas realizar un estudio que contenga la relación entre la precipitación y la escorrentía en dos taludes compuestos por suelos derivados de cenizas volcánicas y su influencia en su estabilidad, en los municipios de Pereira y Dosquebradas, no solo es una herramienta para ingenieros en el diseño de futuras obras civiles; es una opción para mitigar el impacto de las lluvias, sobre las ladera y disminuir así futuros deslizamientos catastróficos para la zona de estudio.

climáticas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catastróficos (Deslizamientos). [En línea] Disponible en .< www.unilibrepereira.edu.co/publicaciones/index.php/espiritu/article/.../89> [Citado el: 25 de Octubre de 2015.]

³ Cifuentes, Leidy D., Toro, Nhora M y Alzate, Alejandro. 2012. Relación entre el comportamiento de variables climáticas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catastróficos (Deslizamientos). [En línea] Disponible en. <<www.unilibrepereira.edu.co/publicaciones/index.php/espiritu/article/.../89> [Citado el: 25 de Octubre de 2015.]

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es el factor que más influye en la inestabilidad de los suelos ocasionando deslizamientos de tierra; y su acción se verifica a través de varios mecanismos, que en el caso de los taludes puede potenciarse a partir de la lluvia que cae sobre los mismos⁴. Frente a esta problemática se han realizado diferentes estudios que tienen como finalidad correlacionar la estabilidad de un talud con la pluviometría. Así la misma puede servir como indicador del riesgo de inestabilidad⁵.

La precipitación es el volumen o altura de agua lluvia que cae sobre un área en un período de tiempo, la cual tiene una influencia directa en la infiltración y en el régimen del agua subterránea, que debido a las características de los suelos y terrenos pueden llegar a afectar la estabilidad de taludes o laderas⁶.

La relación agua - deslizamientos y sus efectos es el planteamiento que se hicieron los proponentes de la presente investigación, donde la problemática abordada fue determinar la relación entre la precipitación y la escorrentía; que afectan directamente la estabilidad de los taludes. En la zona específica de los Municipios de Pereira y Dosquebradas.

Aunque se considera que las lluvias intensas constituyen un factor externo que altera el equilibrio de los taludes y laderas, se debe profundizar en su estudio e investigar cómo cambian algunas propiedades del suelo disminuyendo la resistencia de los taludes cuando son infiltrados por el agua proveniente de las lluvias.

Centrándose en las inestabilidades superficiales de taludes en suelo, éstas se refieren a taludes que presentan una zona superficial de reducido espesor, que se

⁴ ESTALRICH, E., HERNÁNDEZ, A., ARANDA, L., & PASTOR, J. (Sf.). Estudio de factores edáficos relacionados con la erosión y escorrentía en taludes de fuerte pendiente; ensayos de revegetación; Boletín de la Sociedad Española de la ciencia de suelos. [En línea] Disponible en, <<http://www.edafologia.net/revista/tomo2/articulo161.pdf>> [citado el 23 de Octubre de 2015].

⁵ ROMANA, M. 1992. El problema de la precisión de la rotura de un talud en función de la pluviometría. [En línea] Disponible en < <http://www.edafologia.net/revista/tomo2/articulo161.pdf>>. [Citado el: 23 de Octubre de 2015.]

⁶ GAFARO D., Mayra Alejandra. 2015. Escenario de riesgo, a partir de factores de amenaza (deslizamiento) y vulnerabilidad (uso del suelo). [En línea] Disponible en <[repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/6262/3/ESCENARIO%20DE%20RIESGO,%20A%20PARTIR%20DE%20FACTORES%20DE%20AMENAZA%20\(DESLIZAMIENTO\)%20Y%20VULNERABILIDAD%20\(USO%20DEL%20SUELO\)%20.pdf](http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/6262/3/ESCENARIO%20DE%20RIESGO,%20A%20PARTIR%20DE%20FACTORES%20DE%20AMENAZA%20(DESLIZAMIENTO)%20Y%20VULNERABILIDAD%20(USO%20DEL%20SUELO)%20.pdf)>. [Citado el: 13 de Noviembre de 2015.]

puede cifrar en torno al 10-20% de su altura (lo que en taludes de 10 - 20 m. de altura corresponde a 2 a 3 metros de espesor). Dicha zona superficial puede ser inestable, o llegar a serlo, debido a una menor resistencia del terreno con respecto a la resistencia en el resto del talud⁷.

La lluvia induce deslizamientos en suelos de áreas tropicales, como es el caso de Pereira, el cual tiene diversos tipos de suelos como son: cenizas volcánicas, depósitos aluviales, rellenos antrópicos, conglomerados y suelos residuales arcillosos. Pereira presenta dos períodos lluviosos al año con máximos en abril-mayo y octubre-noviembre, en este municipio varía entre 1700 y 2800 mm/año, presentando las mayores pluviosidades en la franja central del municipio con valores entre 2300 y 2800 mm/año⁸.

Con relación a la problemática se tienen registros de 62 deslizamientos a lo largo de la década del 2000, mientras que Dosquebradas tuvo un total de 18 deslizamientos en esa misma década⁹.

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Identificando que el agua es el factor que más comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes en zonas tropicales, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes o durante periodos lluviosos y el control del agua subterránea es uno de los sistemas más efectivos para la estabilización de deslizamientos. Se hace descripción de las condiciones climáticas de la zona de influencia del estudio como antecedente de la problemática.

⁷ Gafaro D., Mayra Alejandra. 2015. Escenario de riesgo, a partir de factores de amenaza (deslizamiento) y vulnerabilidad (uso del suelo). [En línea] 2015. [Citado el: 13 de Noviembre de 2015.] [epository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/6262/3/ESCENARIO%20DE%20RIESGO,%20A%20PARTIR%20DE%20FACTORES%20DE%20AMENAZA%20\(DESLIZAMIENTO\)%20Y%20VULNERABILIDAD%20\(USO%20DEL%20SUELO\)%20%20.pdf](http://epository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/6262/3/ESCENARIO%20DE%20RIESGO,%20A%20PARTIR%20DE%20FACTORES%20DE%20AMENAZA%20(DESLIZAMIENTO)%20Y%20VULNERABILIDAD%20(USO%20DEL%20SUELO)%20%20.pdf). p.9

⁸ CARDER. Diagnóstico de riesgos ambientales Municipio de Dosquebradas Risaralda. [En línea] Disponible en www.carder.gov.co/.../diagn-stico-de-riesgos-ambientales-pereira [Citado el: 10 de Octubre de 2015.]

⁹ CARDER. Diagnóstico de riesgos ambientales Municipio de Dosquebradas Risaralda. [En línea] Disponible en www.carder.gov.co/.../diagn-stico-de-riesgos-ambientales-dosquebradas [Citado el: 10 de Octubre de 2015.]

2.1.1 Climatología de la ciudad de Pereira.

Las lluvias, tienen una distribución de tipo bimodal con lluvias máximas que van de abril a mayo y octubre a noviembre, con valores promedio 79%, y mínimos en enero con 71% y febrero con 72%, Considerando los datos de la estación aeropuerto Matecaña¹⁰.

La temperatura media anual de Pereira varía de los 24°C a una altura de 940 m.s.n.m. a los 8°C a una elevación sobre el nivel del mar superior a los 3.600 metros, presentando cuatro (4) pisos térmicos a saber:

- Cálido con temperatura media mayor de 22°C
- Medio con temperatura media entre 17 y 22°C.
- Frío con temperatura media entre 12 y 17°C.
- Páramo con temperatura media inferior a 12°C.

Pereira presenta dos períodos lluviosos al año con máximos en abril- mayo y octubre- noviembre.

En Mapa de Isoyetas de Pereira, desarrollado en el Estudio de Oferta y Demanda Hídrica en la Subregión 1 del departamento, se puede ver que la precipitación en este municipio, varía entre 1.700 y 2.800 mm/año, presentando las mayores pluviosidades en la franja central del municipio con valores entre 2.300 y 2.800 mm/año. (Figura 1.)

La precipitación tiende a disminuir hacia el occidente en proximidades del Río Cauca, llegando a los 1.800 mm/año; y en la parte oriental hacia el Parque Nacional Natural de los Nevados con precipitaciones cercanas a los 2.000 mm/año. La precipitación promedia anual del municipio es de 2.1083 mm.

¹⁰ Murillo M., Mónica M. 2012. Propuesta de educación ambiental para la policía ambiental y ecológica del AMCO. [En línea] Disponible en <<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/33372M977.pdf>> [Citado el: 21 de Octubre de 2015.].

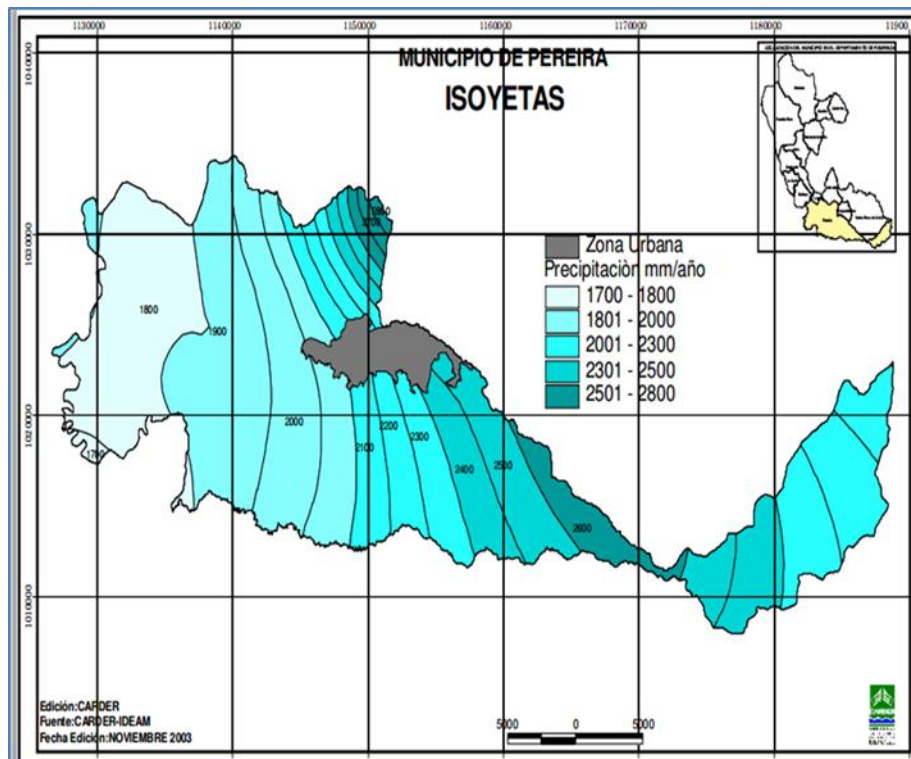


Figura 1. Mapa de Isoyetas de Pereira
Fuente: Diagnóstico de riesgos ambientales Pereira

2.1.2 Climatología de la ciudad de Dosquebradas

Al igual que para las lluvias se tiene una distribución de tipo bimodal con máximos en mayo y noviembre con valores promedio de 79% y mínimos en enero con 71% y febrero con 72%, según datos de las estaciones de apoyo: Aeropuerto Matecaña y La Bohemia.

En el área el porcentaje más alto de humedad relativa se presentan en los meses más lluviosos y los registros más bajos en los meses más secos. En la tarde cuando la temperatura inicia su descenso, la humedad relativa aumenta y a la media noche alcanza su registro cercano a la saturación, el cual se mantiene hasta las primeras horas de la mañana.

A partir de las primeras horas del día cuando la temperatura comienza a aumentar, la humedad relativa disminuye hasta llegar a sus valores mínimos al medio día. La humedad relativa en promedio anual es de 75%.

La temperatura media anual presenta un cambio poco significativo dado las diferencias de alturas presentadas dentro del área municipal. En el sector Nor-occidental, en los nacimientos del Río San Francisco, la temperatura media anual es de 20°C y hacia la parte oriental en límites con el Municipio de Santa Rosa de Cabal el promedio de temperatura es de 18° C.

Por lo anterior, en el municipio de Dosquebradas sólo se presenta el Piso Térmico Medio, que para la zona andina está definido entre los 17 y 22 °C.

En el Mapa de Isoyetas de Dosquebradas (Figura 2), se puede apreciar que la precipitación en este municipio, varía entre 2.300 y 3.100 mm/año, presentando las mayores pluviosidades en la zona norte. La precipitación tiende a disminuir hacia el sur y suroccidente (límites con el Municipio de Pereira).

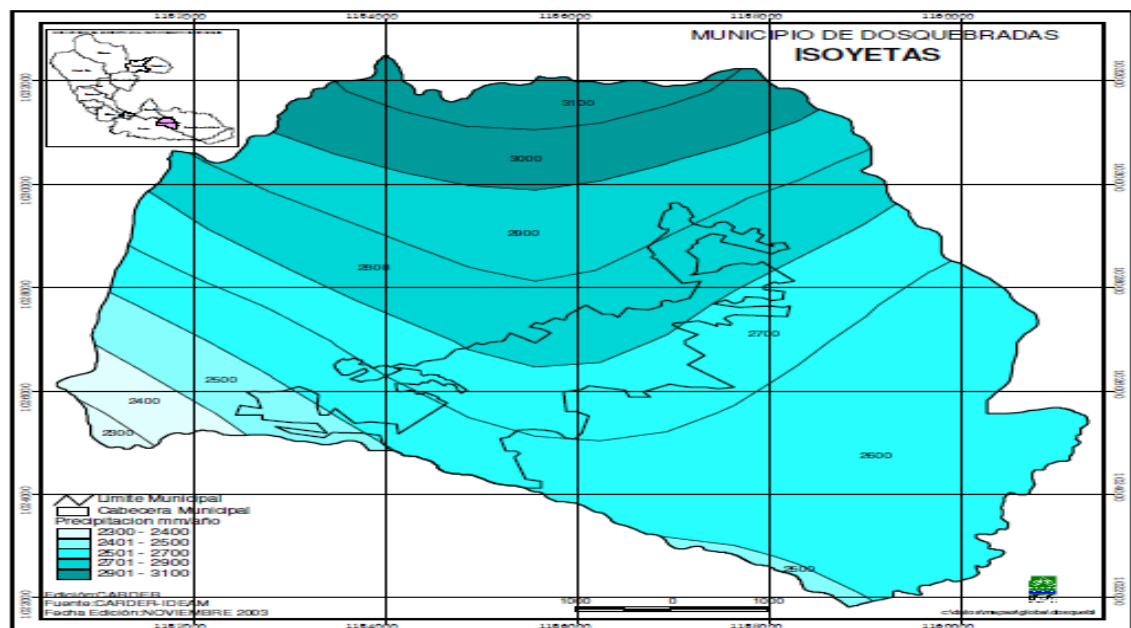


Figura 2. Mapa de Isoyetas de Dosquebradas

Fuente: Diagnostico de riesgos ambientales Dosquebradas.

2.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Retomando los diferentes autores analizados y dadas las características climatológicas de los municipios de Pereira y Dosquebradas, y ante la inexistencia de un estudio que permita identificar la relación entre la precipitación y la escorrentía; y así se pueda determinar cómo esta relación afecta la estabilidad de los taludes para esta zona geográfica específica, además de la correlación entre los patrones de lluvia y fallas de pendientes; se hace necesario hacer el siguiente planteamiento de estudio.

¿Existe una relación entre la precipitación y la escorrentía en taludes compuestos por suelos derivados de cenizas volcánicas y su influencia en su estabilidad?

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la relación entre la precipitación y la escorrentía en dos taludes compuestos por suelos derivados de cenizas volcánicas y su influencia en su estabilidad.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar la precipitación como un factor que contribuye al deslizamiento del terreno
- Determinar el factor de seguridad crítico de un talud no saturado, cuando se encuentre sometido a precipitación
- Recomendar métodos de análisis para los diseños de estabilidad en suelos no saturados expuestos a precipitación
- Comparar la infiltración y escorrentía en dos puntos de análisis

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

Cuando se inicia un proceso investigativo, es de importancia consultar estudios hechos con anterioridad y que estén fuertemente relacionados con el tema a tratar, ya sea de tipo mundial, nacional o local, para así llegar a las conclusiones y recomendaciones que fueron planteadas, y poder encaminar la investigación de una mejor manera, y no elaborar estudios redundantes que no generan nuevos conocimientos.

Se encontró un estudio de tipo internacional realizado en la universidad de Singapur Nanyang technological university (NTU), según el trabajo de investigación de Tsaparas,H,D,T,E,C “las precipitaciones inducen a la falla de taludes” debido a que en algunos de estos no hay una buena escorrentía para que el agua fluya sino que al contrario se queda en el terreno y este la absorbe causando que su humedad aumente y se puedan presentar fallas en el talud como deslizamientos¹¹.

Otro estudio que hace referencia a la problemática planteada es el de Mora Ortiz R.S. y Rojas González E. que en su estudio “Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas”, donde se analiza la estabilidad de un talud en la comunidad San Juan de Grijalva, municipio de Ostucán, Chiapas, (México) el cual presentó un deslizamiento durante un período de lluvias intensas. Estudio que avalo la Facultad de Ingeniería, de la UNAM.¹²

El volumen de este deslizamiento fue de más de 5 millones de metros cúbicos de suelo y ocasionó la obstrucción del cauce del río Grijalva. De este talud se obtuvieron sus características estratigráficas y geométricas y se realizó un muestreo inalterado para determinar las características mecánicas del material del talud. En el análisis de estabilidad se consideró la variación de la cohesión provocada por el humedecimiento y con ello se pudo observar cómo el factor de

¹¹ ILLIAS, Y OTROS. 2003. Canadá : s.n., 2003, Can. Geotech. J., Vol. 40, págs. 1012-1032. NRC Canada.

¹² ROJAS G. , E. y MORA O., R.S. 2012. Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. [En línea] Disponible en < <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405->> [Citado en octubre 25 del 2015]

seguridad del talud evoluciona con el contenido de agua del cuerpo del talud. Mediante el análisis de la infiltración de agua de lluvia y de la estabilidad del talud ha sido posible reproducir el proceso de falla.

Se empleó como metodología la extracción de dos muestras inalteradas representativas del suelo que conformaba el cuerpo del talud. De este material se obtuvieron las propiedades índice, peso específico de sólidos, relación de vacíos, contenido de agua, grado de saturación, conductividad hidráulica, granulometría por vía seca y húmeda, esfuerzo de preconsolidación y parámetros de resistencias (ángulo de fricción (ϕ), cohesión (c)) mediante pruebas triaxiales realizadas en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Por las características del estudio, la metodología utilizada, fue un estudio de gran aporte a la investigación planteada, que permitió validar las pruebas de ensayos y laboratorios empelados.

Pero es de anotar que en este estudio se hizo uso de varios software que apoyaron los resultados, como fueron: El Geo-Slope (1995) de uso internacional con el que se puede analizar la estabilidad de taludes de suelo e incluso de roca. Permite entre otras cosas incluir en el cálculo varias capas de diversos materiales, la presencia del nivel freático y diversas condiciones de carga, además de que toma en cuenta la presión de poro. Todo lo anterior hace de este programa uno de los mejores para este análisis.

También se empleo el programa de cómputo PlaxFlow (2003), es un programa de cómputo que utiliza el método de elementos finitos para modelar el flujo de agua establecido o transitorio en suelos no saturados utilizando la ecuación de Van Genuchten para calcular la conductividad a partir de la curva de retención, la cual juega un rol esencial en la determinación de las características hidráulicas del suelo.

Además el software toma en cuenta la relación entre la presión de poro, el grado de saturación, el tamaño de las partículas y el coeficiente de permeabilidad, lo que hace que dentro de los programas comerciales PlaxFlow sea uno de los más completos para este análisis, que simuló el flujo de agua en el cuerpo del talud, con lo cual, se pudieron observar las zonas en donde se infiltra el agua, así como la profundidad de la infiltración. Para la simulación del flujo de agua en el cuerpo del talud, además de los parámetros físicos y mecánicos, se determinaron las propiedades hidráulicas básicas de suelos, con los que se alimentó el software:

Coeficiente de permeabilidad saturado (k_s); Grado de Saturación (G_w); Succión (ψ)¹³.

Otros resultados que se obtuvo fueron la geometría del talud antes del deslizamiento, con información proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Una vez que se obtuvieron las propiedades mecánicas e hidráulicas del material, se realizó una modelación del comportamiento mecánico del talud antes y durante el periodo de lluvias utilizando dos programas de cómputo especializados. El primero para simular el flujo de agua en suelos no saturados (PlaxFlow, 2003a) y el segundo en el análisis de la estabilidad de taludes (Geo, 1995).

Otro estudio de interés de tipo internacional fue el realizado en el año 2009 en México sobre la autopista Cuernavaca en la ciudad de Acapulco. Según Ortiz y Gonzales, "Algunos taludes que permanecieron estables durante muchos años presentaron deslizamientos cuando ocurrió un periodo de lluvia extraordinaria. En este fenómeno intervienen no solo las características litológicas, geométricas y mecánicas del talud, sino también el régimen de lluvia- evaporación- infiltración del sitio. En este artículo se analiza la estabilidad de un talud en el km 240+000 del cuerpo A, de la autopista Cuernavaca – Acapulco, el cual presento un deslizamiento durante un periodo de lluvias intensas.

De este talud se obtuvieron sus características estratigráficas y geométricas y se realizó un muestreo inalterado para determinar las características mecánicas del material del talud. El análisis de estabilidad involucro la reducción de la cohesión provocada por el humedecimiento y con ello se pudo observar como el factor de seguridad del talud disminuye con el contenido de agua del cuerpo del talud.

Mediante el análisis de la infiltración de agua lluvia con el software Plaxflow y de la estabilidad del talud con el programa geo-slope fue posible reducir el proceso de falla, con lo que se confirmó que el humedecimiento es un factor fundamental en el deslizamiento de taludes."

En la revista internacional de desastres, accidentes e infraestructura, se planteó de manera general que puede decirse que la estructura, el estado de esfuerzos y flujo del agua en cualquier tipo de suelo, cambian cuando este es expuesto a los

¹³ ROJAS G. , E. y MORA O., R.S. 2012. Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. [En línea] Disponible en < <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405->> [Citado en octubre 25 del 2015]

ciclos intensos de secado y humedecimiento propios de las condiciones climáticas del trópico. Estos cambios afectan las propiedades físicas y el comportamiento mecánico del suelo, lo cual puede conducir a problemas de tipo geotécnico¹⁴.

A nivel nacional se encontraron diferentes estudios y documentación que han hecho seguimiento a la problemática de los deslizamientos en el país, dado que en los últimos 30 años, Colombia ha sido uno de los países más afectados y expuestos a las amenazas por desastres naturales en América. Un informe presentado en septiembre del año 2008 por la Dirección Nacional de Planeación DNP, revela que en promedio cada año ocurren 597 desastres en Colombia, superando a Perú (585), México (241) y Argentina (213)¹⁵.

Un estudio de interés por las características con respecto a los depósitos de ceniza volcánica que cubren los suelos residuales del área de estudio y que son característicos de la zona de influencia del presente estudio es el realizado en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Y que analiza la estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín - Bogotá en el tramo de vía entre Marinilla y Santuario¹⁶.

A nivel local se encontraron diferentes estudios unos que afrontan la problemáticas de los deslizamientos y derrumbes desde un óptica social evidenciando los efectos de estos en cuanto a las pérdidas materiales y humanas que pueden ocasionar y otros que enfrentan la problemáticas desde lo técnico; en cuanto a la ocurrencia de los mismo asociados a los umbrales de lluvias acumulados que afectan la capacidad de los taludes. Se hace un análisis de los estudios más relevantes con respecto a las características del estudio planteado.

Un primer estudio analizado es “Relación entre el comportamiento de algunas variables climatológicas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catastróficos (deslizamientos), en el perímetro urbano del municipio de Pereira, período 1964-2004.”¹⁷

¹⁴ SOCIEDAD COLOMBIANA DE ARQUITECTOS, 2002 Bienal colombiana de arquitectura. Bogotá. Memorias de la XVIII Bienal Colombiana de Arquitectura.

¹⁵ DNP, 2008, Retomado en HERNÁNDEZ A., PÉREZ C., LA TORRE D., & PAPAMIJA M., 2014 [En línea] Disponible en < <http://es.slideshare.net/AlejandroHernandez17/principales-emergencias-y-desastres-de-colombia-y-el-huila>> [Recuperado en Octubre 24 del 2015]. p.47

¹⁶ ESCOBAR T., Luis J. 2012. Análisis de la estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín - Bogotá en el tramo de vía Marinilla y Santuario. [En línea] Disponible en <<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31253/43364>>. [Citado el: 18 de Octubre de 2015.].

¹⁷ CIFUENTES, Leidy D., TORO, Nhora M y ALZATE, Alejandro. 2012. Relación entre el comportamiento de variables climáticas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catastróficos (Deslizamientos). [En línea]

En este estudio se analizaron los eventos catastróficos por deslizamientos en el municipio de Pereira entre el periodo 1964-2004, y se estableció la relación entre el comportamiento de algunas variables climatológicas y la susceptibilidad de ocurrencia de deslizamientos en el perímetro urbano, a partir de la evaluación y correlación entre los registros históricos de precipitaciones, temperatura, humedad relativa y brillo solar de la Estación Meteorológica Aeropuerto Internacional Matecaña, y precipitación de la Estación Planta de Tratamiento (Empresa Aguas y Aguas de Pereira), con los registros históricos de deslizamientos del municipio de Pereira aportados por la Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres (DOPAD). Se geo referenciaron 348 deslizamientos asociados a la ocurrencia de lluvias, con el objeto de determinar la posible relación entre deslizamientos y precipitaciones¹⁸.

El estudio tuvo como objetivo construir un modelo de acercamiento a la relación lluvias-deslizamientos, razón por la cual sus resultados contribuyeron al fortalecimiento de la política local de prevención y atención de desastres, en lo que hace referencia a los planes de emergencia y sistemas de alerta temprana.

Entre los resultados más importantes de este estudio se destacan: Evaluación de la base de datos del registro histórico de desastres del municipio de Pereira, Síntesis de los registros climatológicos de series históricas de 30-40 años, según datos IDEAM, Determinación de los umbrales de lluvia críticos como agentes detonantes de deslizamientos.

4.2 MARCO TEÓRICO

En este aparte se abordan los distintos conceptos teóricos que dieron una mayor comprensión de lo que abarca este proyecto de investigación. Este capítulo se enfocó en dos aspectos principales: resistencia y agua en los suelos, y erosión y deslizamientos de suelo.

Disponible en < <www.unilibrepereira.edu.co/publicaciones/index.php/espiritu/article/.../89>. [Citado el: 25 de Octubre de 2015.]

¹⁸ CIFUENTES, Leidy D., TORO, Nhora M y ALZATE, Alejandro. 2012. Relación entre el comportamiento de variables climáticas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catastróficos (Deslizamientos). [En línea] Disponible en < <www.unilibrepereira.edu.co/publicaciones/index.php/espiritu/article/.../89>. [Citado el: 25 de Octubre de 2015.]

Esta investigación se enfocó en estos dos aspectos entendiendo el alcance que fue como los patrones de lluvia afecta el suelo, generando esfuerzos, que dependiendo del tipo de terreno terminara en un deslizamiento.

4.2.1 Resistencia y agua en los suelos.

Si un sólido continuo en equilibrio con una sistema de cargas externas es cortado a través de un plano imaginario, se requiere aplicar una fuerza f sobre la superficie de corte S para mantener en equilibrio cada una de las partes. El vector esfuerzo σ en un punto arbitrario sobre la superficie S es por definición el límite entre la fuerza diferencial (df) sobre la superficie infinitesimal (ds), cuando esta última tiende a cero¹⁹.

El esfuerzo efectivo en cualquier dirección está definido como la diferencia entre el esfuerzo total en dicha dirección y la presión del agua que existe en los vacíos del suelo. El esfuerzo efectivo es por lo tanto una diferencia de esfuerzos.

El suelo es una estructura semejante a un esqueleto de partículas sólidas en contacto, formando un sistema intersticial de vacíos intercomunicados. Los vacíos del suelo están total o parcialmente llenos de agua. La interacción entre la estructura del suelo y el fluido de los vacíos determina el comportamiento, desde el punto de vista de la ingeniería, único y dependiente del tiempo, de la masa del suelo.

La compresibilidad de un suelo sujeto a carga o descarga, es principalmente su capacidad de deformación de vacíos, usualmente por desplazamiento de agua. La resistencia de un suelo es su capacidad última de resistencia a tal carga.

Los esfuerzos cortantes sólo pueden ser resistidos por la estructura de las partículas sólidas, pues el agua no tiene resistencia cortante. Por otro lado, el esfuerzo normal en cualquier plano es la suma de dos componentes: una debida a la carga transmitida por las partículas sólidas de la estructura del suelo, y la otra, una presión del fluido en los espacios vacíos.

¹⁹ SÁEZ, Esteban. Fundamentos de geotecnia. Capítulo 3 p. 28

El principio de los esfuerzos efectivos tienen un comportamiento mecánico en suelos saturados está definido por tres campos de esfuerzos. Cada uno de ellos cumple un rol específico en la modelación del comportamiento del suelo:

- El campo de esfuerzos totales σ se define considerando el suelo como un material homogéneo de una sola fase. Verifica las ecuaciones de equilibrio de la mecánica.
- El campo de presiones de poros uw es un tensor isotrópico que representa la presión del agua que ocupa el espacio continuo de los poros del suelo.
- El campo de esfuerzos efectivos σ' es por definición la diferencia entre los dos campos precedentes:

$$\sigma' = \sigma - uw \quad (1)$$

Ecuación 1. Esfuerzo efectivo

σ' = esfuerzo efectivo
 σ = esfuerzo total
 uw = presión de poros

Los esfuerzos efectivos controlan el comportamiento mecánico de masivos de suelos saturados. Las deformaciones y la estabilidad del suelo dependerán entonces de los esfuerzos totales y de la presión de poros. Existen en la literatura diversas demostraciones del principio de esfuerzos efectivos, sin embargo, quizás la mejor prueba de su validez ha sido su aplicación exitosa los últimos 80 años en geotecnia. Si bien la validez del principio es sólo aproximada, las diferencias observadas entre los cálculos y las observaciones en terreno están más bien relacionadas a la falta de información sobre las propiedades reales de los suelos. Por lo tanto, no existen evidencias que permitan poner en duda la aplicación de este principio en la práctica para problemas de suelos saturados.

Los esfuerzos en los suelos no saturados están conformados por definición por una fase sólida, una líquida y una gaseosa. Las proporciones entre las fases gaseosas y líquidas en los vacíos pueden ser medidas por el grado de saturación. Si se comienza de un estado saturado y se aumenta homogéneamente en forma progresiva el gas al interior del suelo, el gas se reparte inicialmente en forma de burbujas de aire aisladas. Luego, las burbujas entran en contacto para formar una fase prácticamente continua al interior del suelo. Si el volumen de gas sigue

aumentando, el agua pasa a ser discontinua antes de desaparecer completamente. Para que sea factible definir esfuerzos al interior de cada una de las fases del suelo, se requiere que cada una de ellas puede ser considerada como continua.

En términos generales, la fase gaseosa puede ser considerada como continua para grados de saturación del orden de 0,85. La fase liquida deja de funcionar como un medio continuo a partir del límite de contracción. En el rango de S_r para los cuales las tres fases son razonablemente continuas, se puede definir en el suelo tres campos de esfuerzos:

- El campo de esfuerzos totales σ , que tal como en el caso de suelo saturados se asume como el correspondiente a un medio homogéneo de una fase.
- El campo de presiones de poros u_w (isotrópico).
- El campo de presiones de aire (u otro gas) u_a (isotrópico).

Las primeras investigaciones relativas al comportamiento de suelos parcialmente saturados, extendieron el principio de suelos saturados²⁰: En general los esfuerzos geo estáticos están en estados tensionales en suelos naturales pueden ser muy diversos dependiendo de las condiciones de formación y de las condiciones geológicas. En efecto, la orientación de los esfuerzos principales puede variar de un sitio a otro, así como entre las distintas capas de terreno. Sin embargo, existen ciertos casos simples donde la distribución de los esfuerzos puede ser determinada a partir de las ecuaciones de equilibrio.

La ecuaciones de equilibrio no permiten calcular explícitamente los esfuerzos horizontales σ_h en el caso de depósitos naturales de superficie horizontal. Sin embargo, la experiencia ha mostrado que los esfuerzos horizontales son en general proporcionales al esfuerzo vertical efectivo σ'_z . El cociente entre ambas cantidades se conoce como coeficiente lateral de empuje geoestatico o coeficiente en reposo del suelo K_0 :

$$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_z \quad (2)$$

Ecuación 2. Coeficiente de reposo del suelo

²⁰ SÁEZ, Esteban. Fundamentos de geotecnia. Capítulo 3 p. 28

K_0 = coeficiente de reposo del suelo
 σ'_z = esfuerzo vertical efectivo
 σ'_h = esfuerzo horizontal

Este coeficiente se aplica sólo a esfuerzos efectivos. El valor de K_0 varía en función de la naturaleza del suelo y de la historia geológica del sitio. En general, oscila entre 0,4 y 0,6 para arenas y gravas y entre 0,5 a 1 para arcillas

En las tensiones inducidas cuando se aplican un sistema de cargas sobre el suelo, se desarrollan en su interior esfuerzos adicionales que generaran deformaciones. Los desplazamientos verticales hacia abajo se denominan asentamientos. En la mayor parte de los casos, las cargas aplicadas son verticales y la superficie del suelo es razonablemente horizontal. Por lo tanto, los asentamientos pueden tener gran influencia sobre la superestructura. Una parte clave del cálculo de asentamientos consiste en la determinación de los esfuerzos inducidos en el suelo por la superestructura. Para calcular estos esfuerzos o tensiones inducidas, se utiliza en general la teoría de elasticidad lineal.

Esta aproximación es razonable en el caso de esfuerzos normales verticales, que suelen ser poco sensibles al comportamiento del suelo. Sin embargo, el cálculo de las otras tensiones mediante aproximaciones elásticas puede entregar resultados muy irreales, especialmente en el caso de las tensiones horizontales.

En hidráulica de suelos para problemas de flujo de agua en suelos, el suelo se caracteriza por medio de la porosidad n . Este parámetro se asume en general constante en el tiempo. En términos más rigurosos, desde el punto de vista del flujo interesa la porosidad eficaz, definida como el cociente entre el volumen de vacíos efectivo por donde el agua puede circular y el volumen total. Por simplicidad, supondremos que el suelo se encuentra completamente saturado en la zona donde se produce el escurrimiento de agua y que es homogéneo e isotrópico²¹.

La ley de Darcy dice que la velocidad de infiltración en suelos, como en cualquier otro medio poroso, los poros por donde el fluido puede circular son de tamaño y forma muy variables. Por lo tanto, las partículas de agua siguen una trayectoria sinuosa e irregular a través del medio. Ya que no resulta practico describir la velocidad real de las partículas a través de dicho tipo de trayectoria, se define una velocidad promedio o velocidad de infiltración como el límite del cociente entre el

²¹ SÁEZ, Esteban. Fundamentos de geotecnia. Capítulo 3 p. 41

caudal diferencial dQ que pasa a través de una superficie diferencial dS orientada por la normal n . en la (Figura 3) se puede apreciar la trayectoria del agua al interior del suelo debido a la velocidad de infiltración. En el caso de un fluido incompresible, la definición de la velocidad de infiltración queda²²:

$$dQ/dS = vn \quad (3)$$

Ecuación 3. Caudal diferencial

dQ = caudal diferencial
 dS = superficie diferencial
 n = superficie normal
 v = velocidad media aparente

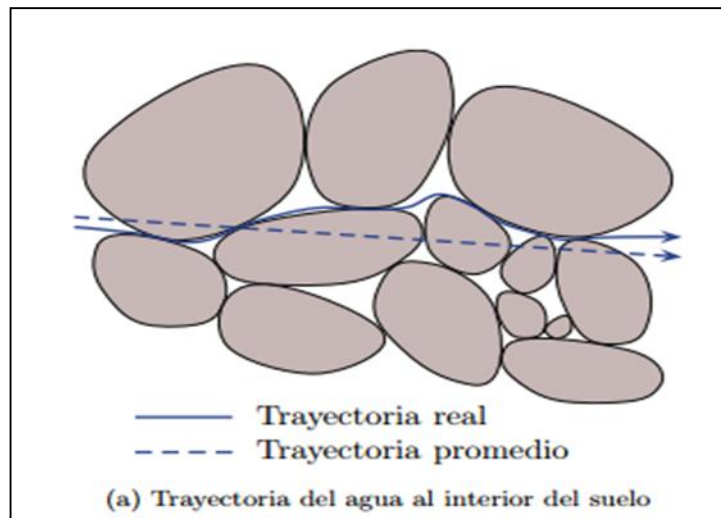


Figura 3. Velocidad de infiltración.
 Fuente: Fundamentos de geotecnia, 2010

La velocidad de infiltración el agua al interior de un suelo depende fundamentalmente de los vacíos disponibles para su circulación y de los gradientes de carga hidráulica. La relación entre la velocidad de infiltración y la carga hidráulica para flujos unidimensionales, fue determinada en 1856 por Darcy empíricamente a partir de ensayos sobre un tubo lleno de arena. Dicha relación se escribe:

²² SÁEZ, Esteban. Fundamentos de geotecnia. Capítulo 3 p. 50

$$v = k i \quad (4)$$

Ecuación 4. velocidad de escurrimiento

v= velocidad de escurrimiento
k= coeficiente de permeabilidad
i= gradiente hidráulico

Donde v es la velocidad del escurrimiento 1D, i el gradiente hidráulico 1D a través del eje x y k es un coeficiente de proporcionalidad conocido como coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

La expresión unidimensional de Darcy fue generalizada por Schlichter para el caso de un flujo tridimensional al interior de un suelo homogéneo e isotrópico. Donde K es el tensor de permeabilidad del suelo, constante para el caso homogéneo y ademan el caso isotrópico.

En dichas condiciones, la velocidad de infiltración es colineal al gradiente hidráulico que a su vez es normal a las superficies equipotenciales. Luego, v también es normal a las superficies $h = \text{cte}$. La Ley de Darcy es válida para fluidos viscosos newtonianos en flujo laminar, es decir, cuando las fuerzas viscosas dominan a las fuerzas de inercia. En general, se acepta su aplicación si el número de Reynolds Re_1 es inferior a 10^{23}

La zona en que los poros están llenos tanto de agua como de gas es la zona no saturada del suelo. Aquí, el espacio de poro efectivo para conducción es mucho menor que cuando el medio se satura y el espacio de los poros se llena normalmente con ambas fases de gas y líquida. También, dado que los poros saturados más grandes se vacían primero, la conductividad hidráulica no saturada disminuye rápidamente con la disminución del contenido volumétrico de agua.

Esto se debe a que el fluido está restringido a canales de flujo más pequeños cuando el contenido de agua disminuye. Los canales no sólo se vuelven más estrechos, sino que la trayectoria de flujo se vuelve más tortuosa (tiene abundantes curvas, vueltas y rodeos) y el fluido puede fluir literalmente como una película de hidratación de una posición a la siguiente. El flujo en la zona no

²³ SÁEZ, Esteban. Fundamentos de geotecnia. Capítulo 3 p.52

saturada es principalmente debido al contenido de agua, gradiente de potencial de matriz (potencial capilar), y potencial gravitatorio. A diferencia de la zona saturada que se mueve por una carga hidráulica positiva, el flujo en la zona no saturada es por lo general por un gradiente negativo²⁴.

Se define permeabilidad como la capacidad de un cuerpo (en términos particulares, un suelo) para permitir en su seno el paso de un fluido (en términos particulares, el agua) sin que dicho tránsito altere la estructura interna del cuerpo. Dicha propiedad se determina objetivamente mediante la imposición de un gradiente hidráulico en una sección del cuerpo, y a lo largo de una trayectoria determinada.

El concepto permeabilidad puede recibir también las acepciones de conductividad o transmisividad hidráulica, dependiendo del contexto en el cual sea empleado.

La permeabilidad se cuantifica en base al coeficiente de permeabilidad, definido como la velocidad de traslación del agua en el seno del terreno y para un gradiente unitario. El coeficiente de permeabilidad puede ser expresado según la siguiente función²⁵:

$$k = Q / I A \quad (5)$$

Ecuación 5. Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica [m/s]

Dónde:

k: coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica [m/s]

Q: caudal [m³/s]

I: gradiente [m/m]

A: sección [m²]

²⁴ GIDAHATARI, flujo en zona no saturada. [En línea] Disponible en <gidahatari.com/ih-es/flujo-zona-no-saturada>. [citado el 2 de agosto de 2015]

²⁵ FRANKIE, 2014. Permeabilidad de los suelos: concepto y determinación (“in situ” y en laboratorio). [En línea] Disponible en <www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>. [citado el 3 de agosto de 2015]

4.2.1.1 Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica

La infiltración ocurre cuando aguas procedentes de las precipitaciones o de almacenes superficiales (deshielo, ríos, lagos), inicia un movimiento descendente adentrándose en el subsuelo, pudiendo alcanzar diferentes profundidades en función de las condiciones.

En términos generales el valor de la infiltración no es constante, sino que, en los primeros momentos de las precipitaciones suele ser más alto, y disminuye con rapidez hasta alcanzar un valor constante más bajo que el inicial. Este descenso está motivado por diferentes factores²⁶:

- La progresiva saturación de los poros.
- La compactación, sobre todo en el caso de que el suelo esté desprovisto de vegetación.
- Cierre o disminución de tamaño de las grietas de los suelos, cuando estos están formados por arcillas que aumentan de tamaño al hidratarse.

Los métodos para medir la infiltración se dividen en métodos directos e indirectos. Los métodos directos buscan valorar la cantidad de agua infiltrada sobre una superficie de suelo, entre ellos se pueden citar los siguientes:

- Lisímetros: Es un depósito enterrado, de paredes verticales, abierto en su parte superior y relleno del terreno que se quiere estudiar. La superficie del suelo está sometida a los agentes atmosféricos y recibe las precipitaciones naturales. El agua de drenaje es medida, al igual que la humedad y la temperatura del suelo a diferentes profundidades. Los inconvenientes son la necesidad de períodos largos, la reconstrucción del suelo no es adecuada ya que no se reproduce exactamente igual el proceso que el mismo sufrió debido al accionar de la naturaleza y el hombre.
- Simuladores de lluvia: Aplican agua en forma constante reproduciendo lo más fielmente el acontecer de la precipitación. Las gotas son del tamaño de las de la lluvia y tienen una energía de impacto similar, comparándose los efectos. Varían en tamaño, cantidad de agua necesaria y método de

²⁶ UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, Escorrentía subterránea.[En línea] Disponible en: <pendientedemigracion.ucm.es/info/diciex/.../esc_sub_infiltracion.html> [citado el 3 de agosto de 2015]

medición. El área de lluvia es variable entre 0,1 m² y 40 m² . La diferencia entre precipitación y escorrentía representa la valoración del volumen infiltrado.

- **Infiltrómetros:** Para realizar el ensayo de infiltración en el campo se utiliza el infiltrómetro. Es un aparato sencillo, de uno o dos tubos de chapa de diámetro fijo. Se clava en el suelo a una profundidad variable, se le agrega una cierta cantidad de agua y se observa el tiempo que tarda en infiltrarse.
- **Tubos:** Es un tubo de cilíndrico de 0,20 a 0,25 cm de diámetro y un alto de 0,60 m, que se hinca en el suelo, midiéndose el descenso del agua, con el principal inconveniente que el agua infiltrada por el círculo del fondo, en las zonas del suelo a los lados del aparato participan también en la infiltración; dando medidas superiores a la realidad.
- **Infiltrómetros:** Son dos anillos concéntricos, usándose el interior, de 23 cm. de diámetro para determinar la velocidad de infiltración, mientras que el exterior de 35 cm se inunda a las mismas profundidades para disminuir los efectos de frontera en el anillo interior. Los anillos se insertan en el suelo a la profundidad mínima necesaria para evitar las fugas de los mismos. La medición es menor que la anterior y más concordante con la capacidad real del suelo. El método de Muntz trabaja con los mismos anillos pero cambia la forma de medir: junto al cilindro interior se entierra una punta, colocándose una determinada cantidad de agua por encima y repitiendo la medición en intervalos de tiempo y descenso del agua. Los principales inconvenientes, aparte del carácter local de la experiencia, son que el suelo se modifica al clavar el tubo, y no hay efectos de compactación, ni de arrastre de finos, ni del aire. Se aclara que el terreno no es preparado para el ensayo de infiltración, si no que se hace sobre el terreno natural. Como la medición varía según el estado de humedad inicial existente al momento del ensayo, deben realizarse una serie de ensayos para distintos grados de humedad.

Los Métodos indirectos determinan la capacidad de infiltración considerando una cuenca perfectamente controlada, con datos precisos de precipitación, evaporación y escorrentía, se puede determinar la infiltración mediante los siguientes métodos:

- Ensayo de infiltración: Los ensayos de infiltración permiten conocer la variación de la capacidad de infiltración en función del tiempo, decreciente a medida que transcurre el mismo. Los ensayos más simples y difundidos son los que se desarrollan con los anillos concéntricos. Los datos obtenidos de campo se vuelcan en una planilla registrándose las distintas alturas de agua y los tiempos correspondientes. Los intervalos de tiempo dependen del suelo donde se hace la medición. Con los datos de altura y tiempo se obtienen los deltas de ambos. La capacidad de infiltración se obtiene haciendo el cociente entre cantidad de agua infiltrada y el intervalo de tiempo: $f = \text{Variación altura} / \text{Variación de tiempo}$ ²⁷.

La escorrentía se puede definir como la cantidad de agua de una tormenta que drena o escurre sobre la superficie del suelo. Cuando se produce, fluye a los cauces incrementando su volumen; a medida que llega agua de las partes más lejanas comienza suavemente a decrecer el caudal al poco tiempo de terminada la lluvia.

La erosión hídrica del suelo es un proceso producido por la escorrentía que ocasiona el empobrecimiento de los mismos y grandes pérdidas económicas. El agua de las lluvias que no alcanza a infiltrar en el suelo y escurre sobre la superficie de la tierra corre a velocidades diferentes ocasionando los mayores problemas en el manejo de cuencas. Es en esta parte del ciclo hidrológico en la cual se debe intervenir activamente para evitar que el agua ocasione graves daños; se pueden prescribir y aplicar diferentes prácticas de conservación de suelos que controlen el agua para evitar sus efectos negativos²⁸.

La escorrentía superficial describe el flujo del agua, lluvia, nieve, u otras fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo del agua. A la escorrentía que ocurre en la superficie antes de alcanzar un canal se le llama fuente no puntual. Si una fuente no puntual contiene contaminantes artificiales, se le llama polución de fuente no puntual. Al área de tierra que produce el drenaje de la escorrentía a un punto común se la conoce como línea divisoria de aguas. Cuando la escorrentía fluye a lo largo de la tierra, puede recoger contaminantes del suelo, como petróleo, pesticidas (en especial herbicidas e insecticidas), o fertilizantes.

²⁷HERAS, Rafael. "Manual de Hidrología". Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid, 1970[En línea] Disponible en < ing.unne.edu.ar/pub/infi.pdf> [citado el 29 de septiembre de 2015].

²⁸ GASPARI, Fernanda J., SENISTERRA, Gabriela E. y MARLATS, Raúl M. 2006. Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. [En línea] Disponible en <http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1521/gaspariagrarias39-1.pdf>. [Citado el: 29 de Septiembre de 2015.]

La escorrentía superficial puede generarse por precipitación o por fundición de nieve o glaciares.

La fundición de nieve y glaciares se da sólo en áreas lo bastante frías como para que se formen permanentemente. La escorrentía de nieve suele alcanzar su punto máximo en primavera, y los glaciares se derriten en verano, lo que produce máximos de flujo pronunciados en los ríos afectados por ellos. El factor determinante de la tasa de fundición de nieve o glaciares es la temperatura del aire y la duración de la luz solar. En las regiones de alta montaña, las corrientes se elevan durante los días soleados y disminuyen en los nublados debido a la razón anterior²⁹.

La escorrentía superficial es el agua de precipitación que, habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve sub horizontalmente por los horizontes superiores para reaparecer súbitamente al aire libre como manantial e incorporarse a microsurcos superficiales que la conducirán a la red de drenaje³⁰.

La escorrentía subterránea es la precipitación que se infiltra hasta el nivel freático, desde donde circula hasta alcanzar la red de drenaje. La Escorrentía Superficial es la más rápida de todas y la Escorrentía Subterránea la más lenta (del orden del m/h).

A parte de las tres formas referidas, la Escorrentía de un curso de agua está además constituida por la precipitación que cae directamente sobre su superficie de nivel, fracción que en la mayor parte de los casos reviste importancia muy escasa en relación con las otras aportaciones³¹.

La saturación de los materiales subsuperficiales puede convertir el suelo en un fluido viscoso. Algunos suelos como los materiales volcánicos, absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación puede conducir a la formación de un flujo. (Figura 1.37). Para que ocurra un flujo se puede requerir un determinado volumen de agua presente. Se han realizado estudios para cuantificar el nivel de lluvias que se requieren para producir flujos y es frecuente la ocurrencia de flujos

²⁹ PÉREZ, Guillermo. Escorrentía superficial. 2013 [En línea] Disponible en: <http://www.ciclohidrologico.com/escorrenta_superficial> [Citado el: 29 de Julio de 2015].

³⁰ UNIVERSIDAD DE CORUÑA, [En Línea] Disponible en <caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/.../Capitulo%205.pdf> [Citado el 14 de julio de 2015].

³¹ Ibíd.

(simultáneamente en sitios diferentes) dentro de una misma formación en el momento de una lluvia de gran intensidad o de un evento sísmico³².

La precipitación se mide en milímetros de agua, o litros caídos por unidad de superficie (m²), es decir, la altura de la lámina de agua recogida en una superficie plana es medida en mm o L/m² (1 milímetro de agua de lluvia equivale a 1 L de agua por m²).

La presión de poros está definida como la presión que ejerce un fluido en los espacios porosos de la roca. También es llamada presión de formación o presión poral, está en función de los fluidos de formación y de las cargas que están soportando. La presión de poros está clasificada por dos categorías: Presión normal: es la presión hidrostática de una columna de fluido de la formación que se extiende desde la superficie hasta una profundidad dada. Presión anormal: es definida como la presión mayor o menor a la presión de poros hidrostática, las causas de estas presiones anormales están relacionadas a diferentes eventos geológicos, geoquímicos, geotérmicos y mecánicos³³.

4.2.2 Conceptos sobre erosión y deslizamientos de suelos.

La erosión es el conjunto de procesos en la superficie de la corteza terrestre que producen pérdida física del suelo cultivable en grado variable. Ocurre naturalmente cuando se manifiestan las fuerzas de la gravedad en zonas montañosas o cuando el suelo queda expuesto a la acción del agua o del viento. No obstante, el hombre es el agente causal de mayor importancia en la erosión de suelos puesto que, a través de sus actividades, incide directamente en las coberturas vegetales, cambia la dinámica hídrica o modifica drásticamente las condiciones de manejo del recurso suelo, bien sea por prácticas agronómicas o construcción de infraestructura.(Figura 4).

³² SUAREZ, Jaime. Lluvias, Presión de Poros y sus Efectos. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Capítulo 1. p.22

³³ URP. Presión de poros, [En Línea] Disponible en <http://cybertesis.urp.edu.pe/urp/2010/cavero_c/pdf/cavero_c-TH.3.pdf>. [citado el 12 de septiembre de 2015]



Figura 4. Erosión de suelo
Fuente: Tomas Leon Sicard 1989

Las proyecciones mundiales sobre el fenómeno erosivo son preocupantes: se calcula que, al actual ritmo de degradación de suelos, la superficie cultivable del planeta pasará de los 1.500 millones de hectáreas que se poseían en 1.975 a 1.000 millones en el año 2025, es decir que la pérdida de suelos afectará posiblemente a una tercera parte de la superficie arable de la tierra (Myers, 1987).

En Colombia, las previsiones pueden ser del mismo orden, aunque el país todavía no tiene claro cuál es el volumen de suelos que se pierde por año debido al conjunto de actividades agropecuarias. Las estimaciones de las diferentes entidades encargadas de suministrar esta información son muy variables entre sí. En la tabla siguiente se puede apreciar que, mientras el IDEAM reporta que en el año 2000 el país tenía cerca del 25% de sus tierras con procesos erosivos severos o muy severos, el IGAC reportaba para esa misma época solamente alrededor del 4% con estos grados de erosión, en la (Tabla 1) se muestra el porcentaje de suelos erosionados en Colombia en los años de 1977 al 2000³⁴.

Es decir, que una entidad estatal reporta que Colombia posee una cuarta parte de sus tierras agrícolas con problemas muy graves de erosión, en tanto que otra, igualmente calificada, presenta datos en los que la erosión casi no sería un problema serio a tomar en cuenta.

³⁴ IDEA.S. sf. La erosión de suelos. [En línea] Disponible en <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2007223/lecciones/lect8/lect8_2.html> [citado el 13 de septiembre de 2015]

Tabla 1. Porcentajes suelos erosionados en Colombia según diferentes fuentes de información (período 1977 – 2000).

Evaluación de la erosión	INDERENA 1977	IGAC 1987	IDEAM 1998	IGAC 1998	IDEAM 2000
Sin erosión	24.8	48.5	0	14.7	52
No apreciable				44.9	4.6
Ligera	36.4	28.0	45.5	19.5	9.5
Moderada	12.8	12.9	11.1	11.3	8.9
Severa	0.6	7.8	7.8	3.3	10.8
Muy severa	1.6	0.7		0.5	14.2
Otros	23.8	2.1	35.6	5.8	
TOTALES	100	100	100	100	100

Fuente: Carlos Gómez, IDEAM. 2001

Es un desplazamiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, que tiene lugar predominantemente sobre una o más superficies de rotura, o zonas relativamente delgadas con intensa deformación de cizalla. Elementos característicos de este tipo de movimiento son la presencia de superficies de rotura definidas y la preservación a grandes rasgos de la forma de la masa desplazada

La distinción entre deslizamientos rotacionales y translacionales es importante en lo que se refiere a los análisis de estabilidad y el diseño de medidas de control y estabilización. Este tipo de movimientos es el que dispone de métodos de análisis y modelización más desarrollados. En la (Figura 5) se puede apreciar los tipos de deslizamientos

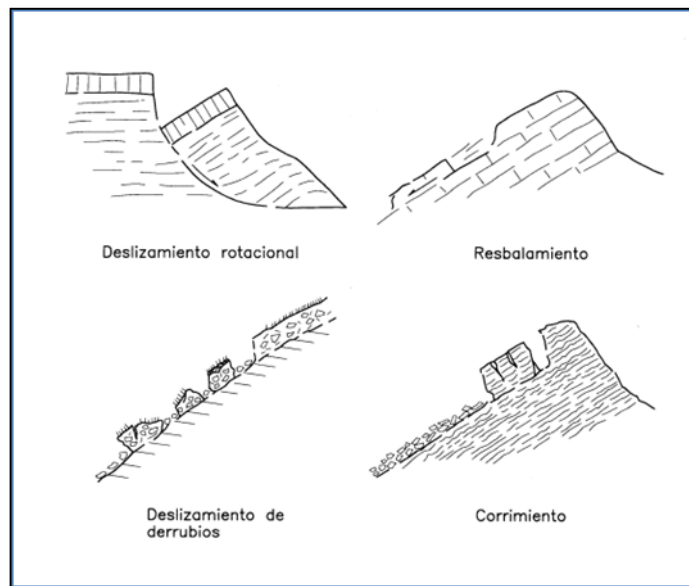


Figura 5. Tipos de deslizamientos
Fuente: Corominas y García Yaque 1997

En los deslizamientos rotacionales la rotura se produce a lo largo de una superficie curvilínea y cóncava. El terreno experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa deslizada. El material de cabezera efectúa una inclinación contra ladera, generando depresiones donde se acumula el agua e induce nuevas reactivaciones. Este tipo de mecanismo es característico de suelos cohesivos homogéneos y de macizos rocosos intensamente fracturados. En materiales arcillosos, especialmente si hay presencia de agua, el pie puede evolucionar hacia un deslizamiento de tierras o colada de tierras.

Los deslizamientos rotacionales, una vez producidos, son susceptibles de reactivación. El movimiento tiende a estabilizarse por disminución del momento de giro y aumento del momento estabilizador, no obstante, cualquier cambio en las condiciones piezométricas o la remoción del pie pueden dar lugar a una nueva inestabilidad. Un diagnóstico equivocado de la geometría puede llevar a la adopción de medidas de estabilizaciones ineficaces e incluso contraproducentes³⁵.

Los deslizamientos traslacionales Tiene lugar a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada. La masa deslizada puede proseguir por la ladera. Los

³⁵ COROMINAS, Jordi. Sf.. Tipos de roturas en laderas y taludes. [En línea] Disponible en <<http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>>. [Citado el: 20 de Septiembre de 2015.] p.8

componentes de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad y siguen trayectorias paralelas. A medida que un deslizamiento traslacional progresa puede romperse, en particular si aumenta la velocidad. Entonces, la masa disgregada deviene un flujo.

Deslizamientos traslacionales de bloques de suelo o roca sin apenas trocearse, sobre superficies únicas en macizos rocosos se han denominado resbalamientos (García Yagüe, 1966) o deslizamientos planos (Hoek y Bray, 1981). Cuando la superficie de rotura está formada por dos planos que obligan a la masa rocosa contenida a desplazarse según la línea de intersección, se forma un deslizamiento en cuña. Las roturas de cuñas no suelen alcanzar grandes dimensiones debido a que la intersección de planos de gran penetración en el macizo rocoso es infrecuente.

Deslizamientos en los que la masa desplazada se trocea en su movimiento descendente y resulta una acumulación caótica de bloques al pie de la ladera, se denominan corrimientos (García Yagüe, 1966). Cuando la rotura por cizalla tiene lugar en suelos no cohesivos constituidos por partículas gruesas, se denominan deslizamientos de derrubios (debris slides).

Mientras que la rotación tiende a restablecer el equilibrio en la masa desplazada, el deslizamiento traslacional puede mantenerse indefinidamente si la superficie de rotura es lo suficientemente inclinada y continua³⁶.

Los flujos son movimientos espacialmente continuos en los que las superficies de cizalla tienen corta vida, se encuentran muy próximas y generalmente no se conservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada se parece a la que se presenta en un fluido viscoso. Por este motivo, la masa movida no conserva la forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo, formas lobuladas cuando interesan a materiales cohesivos y desparramándose por la ladera o formando conos de deyección cuando afectan a materiales granulares. Existe una gradación desde los deslizamientos a los flujos dependiendo del contenido de agua, movilidad y evolución del movimiento. Un deslizamiento de derrubios puede convertirse en una corriente o avalancha de derrubios a medida que el material pierde cohesión, incorpora agua y discurre por pendientes más empinadas.

³⁶ Ibíd. p.8

La reptación es un movimiento extremadamente lento que es imperceptible excepto para largos períodos de tiempo (Sharpe, 1938). No muestra superficies de cizalla definidas. El término reptación se ha utilizado en diversos sentidos en estudios sobre la estabilidad de las laderas:

- Desplazamiento estacional de partículas aisladas o delgadas capas de suelo por efecto de la gravedad con la ayuda de ciclos de hielo-deshielo o humectación-desección. Al helarse el suelo se expande para contraerse durante la fase de deshielo generando el desplazamiento neto de las partículas según la pendiente de la ladera. Los movimientos disminuyen progresivamente con la profundidad.
- Desplazamientos muy lentos pero continuos a gran profundidad. Está relacionado con el concepto ingenieril de fluencia, que ocurre esencialmente a tensión constante por debajo de la resistencia límite del material involucrado. Zischinsky (1966) considera que la reptación por fluencia es un mecanismo importante en la deformación de laderas de alta montaña.
- Desplazamientos, inicialmente muy lentos, que se aceleran progresivamente y que preceden a la rotura de la ladera. Este tipo de reptación ha sido incluido dentro del grupo de deformaciones previas a la rotura.

Unas formas atribuidas a los fenómenos de reptación son las terracillas que aparecen en las vertientes de alta montaña en ambientes periglaciares. La velocidad de desplazamiento del suelo es lo suficientemente lenta para que la vegetación de los prados alpinos resista y crezca al mismo tiempo que el avance de las partículas, dando lugar a guirnaldas herbáceas paralelas a las curvas de nivel³⁷.

³⁷ COROMINAS, Jordi. Sf.. Tipos de roturas en laderas y taludes. [En línea] Disponible en <<http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>>. [Citado el: 20 de Septiembre de 2015.] p.11

4.3 MARCO LEGAL

En este capítulo se incluirá las normas técnicas colombianas para la elaboración de los distintos ensayos que se llevaron a cabo en esta investigación. Cabe resaltar que en este numeral se incluye el código de la norma para facilitar su consulta, y una breve explicación de lo que trata cada norma allí presente.

NTC 2121. Obtención de muestras con tubos de pared delgada. Esta norma presenta un método para la obtención de muestras de suelo relativamente inalteradas para ensayos de propiedades estructurales en el laboratorio, utilizando un tubo metálico de pared delgada.

NTC 1495 - Ensayo para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas, con base en la masa. Esta norma cubre la determinación en el laboratorio, del contenido de agua (humedad), de suelos, rocas y materiales similares con base en la masa, en donde la reducción de la masa por secado, se debe a la pérdida de agua.

NTC 4630 - Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. Esta norma describe el método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos.

NTC 78- Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 μm en agregados minerales. Esta norma establece el procedimiento para determinar por lavado, la cantidad de material fino que el tamiz 75 μm (No. 200) en agregados. Las partículas de arcilla y otras partículas del agregado que se dispersan por el lavado con agua, así como los materiales solubles en el agua, se separan del agregado durante el ensayo).

NTC 1974. Métodos de ensayos para peso específico de sólidos de suelo con picnómetro de agua. Estos métodos de ensayo cubre la determinación del peso específico de sólidos, por medio de un picnómetro de agua.

NTC 1917 - Método de ensayo para determinar el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas y drenadas. Esta norma describe el método de ensayo

para la determinación de la resistencia al corte de una muestra de suelo drenada y consolidada cuando es sometida a un esfuerzo de corte directo.

NTC1967- Método de ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos. Esta norma establece procedimientos para determinar la magnitud y la velocidad de consolidación de un suelo, cuando este se confina, mientras se somete a carga con esfuerzo controlado, aplicada en incrementos graduales.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que se llevara a cabo es de tipo explorativa, descriptiva y correlacional, a continuación se describirá cada una de estas y su aplicación en la investigación y de los procesos que se llevaran a cabo:

Los estudios explicativos pretenden conducir a un sentido de comprensión o entendimiento de un fenómeno. Apuntan a las causas de los eventos físicos o sociales. Por lo tanto, están orientados a la comprobación de hipótesis; esto es, identificación y análisis de las variables independientes y sus resultados, los que se expresan en hechos verificables³⁸.

Se hace una revisión documental, se construye el marco teórico y se inicia un acercamiento con al tema a tratar a través de observaciones generales, sistemáticas y controladas sobre lo que antecede a la investigación en torno a la infiltración de taludes.

En un estudio descriptivo, se seleccionan una serie de conceptos o variables y se mide cada una de ellas independientemente de las otras, con el fin, precisamente, de describirlas. Estos estudios buscan especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno³⁹.

El énfasis está en el estudio independiente de cada característica, es posible que de alguna manera se integren las mediciones de dos o más características con el fin de determinar cómo es o cómo se manifiesta el fenómeno. Pero en ningún momento se pretende establecer la forma de relación entre estas características.

Se realiza una contextualización del caso de estudio, se seleccionan los taludes de acuerdo a criterios técnicos, de pendiente, geometría , ubicación y tipo del

³⁸ UNAD. Lección 6: Investigación Exploratoria, Descriptiva, Correlacional y Explicativa. [En Línea] Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/100104/100104_EXE/leccin_6_investigacin__exploratoria_descriptiva_correlacional_y_explicativa.htm. [Citado en Septiembre 15 del 2015]

³⁹ *Ibíd.*

suelo del talud , se procede a la caracterización geotécnica y se organiza la información.

Los estudios correlacionales pretenden medir el grado de relación y la manera cómo interactúan dos o más variables entre sí. En la (tabla 2) se pueden apreciar algunas de las variables que se tuvo en cuenta para la investigación. Estas relaciones se establecen Dentro de un mismo contexto, y a partir de los mismos sujetos en la mayoría de los casos.⁴⁰

Tabla 2. Variables de investigación

VARIABLES	INDICADORES	TIPO
Lluvia	Milímetros x m ²	independiente
Contenido de Humedad	%	independiente
Cohesión	Ton/ m ²	independiente
Angulo de fricción	Grados	independiente

Fuente: Elaboración de los autores

Se relacionaran los datos obtenidos de lluvia y de escorrentía en los taludes de Combia y Dosquebradas para así determinar cómo los distintos patrones de lluvia afectan el terreno dependiendo del suelo de lo conforme.

5.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo incorpora técnicas desde el enfoque experimental, aportadas por la geotecnia que incluyen:

- La observación que facilita la interacción del investigador con el talud observando sus cambios físicos y para mirar la integridad del talud, además de poder tomar datos.

⁴⁰ UNAD. Lección 6: Investigación Exploratoria, Descriptiva, Correlacional y Explicativa.[En Línea] Disponible en http://datateca.unad.edu.co/contenidos/100104/100104_EXE/leccin_6_investigacin__exploratoria_descriptiva_correlacional_y_explicativa.htm. [Citado en Septiembre 15 del 2015]

- La experimentación que permite la recolección de nueva información mediante la adaptación de un entorno controlado facilitando las condiciones para la adquisición de datos.
- Las imágenes que permiten capturar fenómenos que trascurren en la investigación para así plasmar los cambios físicos sufridos por el talud expuesto a los cambios climatológicos de la región.
- La información documental que permite informar sobre hechos que han pasado o están pasando con los taludes o en la zona de estudio y indagar sobre otras visiones derivadas de otros autores.

5.3 MARCO GEOGRÁFICO DE PEREIRA Y DOSQUEBRADAS

El Municipio de Dosquebradas está localizado al sur oriente del Departamento de Risaralda, su cabecera municipal limita con la de la Ciudad de Pereira conformando una conurbación. El área del municipio es de 70.81 km², de los cuales 13 km², aproximadamente, corresponden a la zona urbana.

Dosquebradas conforma el Área Metropolitana Centro Occidente con los municipios de Pereira y La Virginia, además pertenece a la Subregión 1, con los municipios de Pereira, Santa Rosa de Cabal y Marsella; de acuerdo al proceso de Planificación Ambiental del Territorio realizado por la CARDER; ya que estos cuatro municipios presentan características biofísicas, socioeconómicas y culturales similares, además de concentrarse allí la mayoría de la población y los procesos económicos y sociales más significativos del departamento. En la (Figura 6) se puede observar la localización de Dosquebradas frente a los demás municipios de Risaralda.

El estudio tomara lugar en el barrio de Milan detrás de colegio salesiano ubicado en el municipio de Dosquebradas con coordenadas N 4°49`48.46`` y O 75°40`21.23``. En la (Figura 7) se puede apreciar la ubicación de donde estará el predio de escorrentía en el municipio de Dosquebradas.



Figura 6. Localización de Dosquebradas en el departamento de Risaralda
Fuente: Diagnostico de riegos ambientales del municipio de Dosquebradas



Figura 7. Punto de ubicación aérea barrio Milán
Fuente google earth

Pereira es una ciudad de Colombia, capital del departamento de Risaralda. Es la ciudad más poblada de la región del Eje cafetero, y la segunda más poblada de la región Paisa después de Medellín; cuenta con 469.612 habitantes y conforma el

Área Metropolitana de Centro Occidente, junto con los municipios de Dosquebradas, La Virginia alcanzan una población de 700.526 habitantes aproximadamente).

Está ubicada en la región centro-occidente del país, en el valle del río Otún en la Cordillera Central de los Andes colombianos. En la (Figura 8). Se puede apreciar la localización de Pereira en el departamento de Risaralda



Figura 8. Localización de Pereira en el departamento de Risaralda
Fuente: Diagnostico de riegos ambientales del municipio de Pereira.

El estudio tomara lugar en la vereda Combia baja en el condominio crucero de Combia ubicado en el municipio de Pereira con coordenadas N 4°49`45.10`` y O 75°45`18.17``. En la (Figura 9) se puede apreciar la ubicación de donde estará el predio de escorrentía en el municipio de Pereira.

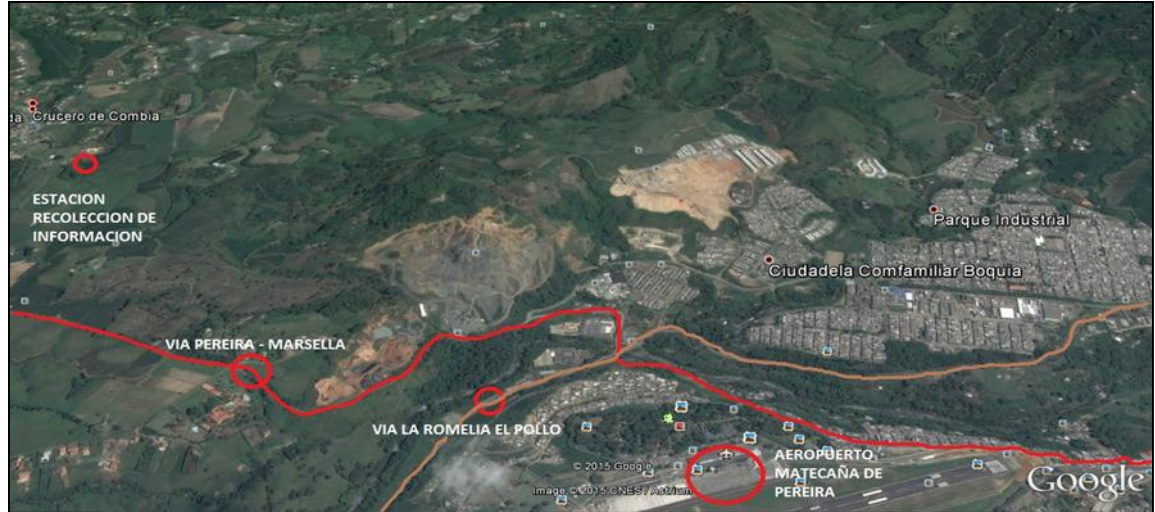


Figura 9. fotografía aérea Combia baja
Fuente google earth

5.4 CONSTRUCCIÓN DEL PUNTO DE ESTUDIO

Para este estudio se hizo un cerramiento en los taludes con láminas de zinc., con un área de 2m x 3m en el sector de Combia y de 2 mx2 m en el sector de Milán debido al tamaño del talud.

En las (Figuras 10 y 11) se pude apreciar el terreno a intervenir y las láminas de zinc a utilizar.



Figura 10. Predio talud Milán (Dosquebradas).

Fuente: Trabajo de campo



Figura 11. Lámina de zinc
Fuente: Trabajo de campo

En las (figuras 12 y 13) se puede apreciar ya instaladas las láminas de zinc en los taludes de Milán y de Combia. Se contaron las láminas en zinc en trozos de 30 cm x 60 cm, las cuales se instalaron entrelazándose para tener una mayor adherencia entre el suelo y las láminas, así el agua se canalizó debidamente sin que fluyera fuera de las láminas. Luego de definir el área del predio que se manejará y de cortar las láminas de zinc



Figura 12. Cerramientos de talud con zinc de 2 m x 2 m, Milán (Dosquebradas).
Fuente: tomada en campo



Figura 13. Cerramientos de talud con zinc de 2 m x 3 m, Combia (Pereira)
Fuente: tomada en campo.

Se procedió a la instalación la tubería la cual recolecto el agua de escorrentía para así depositarla en un recipiente. La tubería con la que se trabajo es una tubería de PVC de 2 pulg unidas a un codo de 90 grados como se muestra en la (Figura 14)., la cual quedo a nivel del suelo para poder recolectar el agua de escorrentía que caía por el talud como se muestra en las (Figuras 15 y 16).



Figura 14. Codo 90 grados, tubería pvc 2`.

Fuente: Homecenter



Figura 15. Talud Milan (Dosquebradas). Vista en planta de la tubería
Fuente: Trabajo de campo



Figura 16. Talud Combia (Pereira). Vista en planta de la tubería
Fuente: Trabajo de campo

El pluviómetro consistirá en un recipiente cilíndrico de 15 cm de diámetro y 25 cm de altura con un volumen de $0.0044 \text{ m}^3 = 4400 \text{ ml}$, que estará sobre un palo de 1 m de largo, como se muestra en la (Figura 17).



Figura 17. Pluviómetro Milán (Dosquebradas) diámetro=15 cm, volumen=4400 ml.
Fuente: Trabajo de campo

El recipiente para el agua de escorrentía tiene un diámetro de 14 cm y 20cm de altura con una capacidad de recolección de agua de $0.0030787\text{m}^3 = 3078.7\text{ml}$ como se muestra en la (Figura 18).



Figura 18. Talud Milán (Dosquebradas). Vista en planta de la tubería y recipiente para la recolección de agua, diámetro= 14 cm, volumen= 3078.7 ml.
Fuente: Trabajo de campo

Para la instalación del piezómetro primero se llenó completamente de agua y se sacaron las burbujas de aire para que así no interfiriera con las lecturas de presión de poros y posteriormente se procede a insertarlo en la tierra a unos 50 cm, como se muestra en la (Figura 19). Cabe aclarar que el piezómetro solo se instaló en

Combia debido a la falta de vigilancia en el sector de Milán donde se encuentra ubicado el otro punto de estudio. La toma de datos del piezómetro inicio el mes de abril y concluyo en el mes de julio del 2015.



Figura 19. Piezómetro, ubicado en Combia (Pereira).
Fuente: Trabajo de campo

Los datos de escorrentía, agua de lluvia recogida en el pluviómetro y la presión de poros tomadas por el piezómetro, se hicieron mediciones todos los días a las 6 de la mañana durante 6 meses en Milán y 4 meses en Combia. El estudio tuvo lugar en los primeros días del mes de marzo en los dos puntos de estudio y concluye a los 4 y 6 meses posteriores como se mencionó anteriormente, en las (Figuras 20 y 21) se puede apreciar ya completamente instalado el predio de escorrentía



Figura 20. Construcción terminada del predio de escorrentía ubicado en Milán (Dosquebradas).

Fuente: Trabajo de campo



Figura 21. Construcción terminada del predio de escorrentía ubicado en Combia (Pereira)

Fuente: Trabajo de campo

5.5 ENSAYOS LABORATORIO

Para dar inicio a los laboratorios primero se tuvo que sacar muestras de suelo inalteradas para esto se utilizó tubos shelby los cuales fueron enterrados a una profundidad de 1m y 2m, con la ayuda de un barreno se escavó para llegar a la

profundidad deseada para luego insertar el tubo shelby y sacar las muestras de suelo en los sectores de Combia y de Milán, como se muestra en las (Figuras 22 y 23).

A continuación se describirá la metodología de los laboratorios realizados:



Figura 22. Instrumentos utilizados para extracción de muestra de suelo con tubo shelby

Fuente: Trabajo de campo



Figura 23. Extracción de muestra de suelo con tubo shelby, utilizando un tornillo sin fin para así llegar a una mayor profundidad

Fuente: Trabajo de campo

5.5.1 Ensayo para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas, con base en la masa.

5.5.1.1 Norma Técnica Colombiana (NTC) 1495.

Determinar y registrar la masa del recipiente limpio y seco y su tapa, si se usa, junto con su número de identificación.

Colocar la muestra de ensayo húmeda en el recipiente y, si se utiliza tapa, fijarla en su posición. Determinar la masa del recipiente y de la muestra húmeda, utilizando una balanza seleccionada con base en la masa de la muestra o en los dígitos significativos que se requieren. Registrar ese valor.

Retirar la tapa si se usa y colocar el recipiente con la muestra húmeda en el horno de secado. Secar la muestra hasta obtener la masa constante a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, a menos que se especifique algo diferente. El tiempo necesario para obtener la masa constante varía dependiendo del tipo de material, el tamaño de la muestra, el tipo de capacidad del horno, y otros factores. En general, la influencia de estos factores se puede establecer con un buen criterio y la experiencia con los materiales que se estén ensayando y con los equipos que se estén utilizando. El tiempo de secado es de 12 a 16 horas pero para mayor seguridad se dejara 24 horas.

Después de que la muestra se haya secado hasta su masa constante, se retira el recipiente del horno. Se deja enfriar la muestra y el recipiente a una temperatura ambiente o hasta que el recipiente se pueda manipular con comodidad con las manos y el funcionamiento de la balanza para determinar la masa del recipiente y de la muestra secada en horno utilizando una balanza.

5.5.2 Ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos cohesivos.

5.5.2.1 Norma Técnica Colombiana (NTC) 4630.

La muestra se procesa para remover cualquier material retenido en el tamiz de 425 mm (N0. 40). El límite líquido se determina mediante ensayos en los cuales una porción de la muestra se extiende en un recipiente de bronce con forma de casquete esférico, se divide diametralmente en dos con un ranurador, y luego se le hace fluir hasta juntarse debido a los golpes causados por la caída reiterativa del recipiente sobre la base de un aparato mecánico estandarizado.

La determinación del límite líquido por el método multipunto, método A, requiere ejecutar tres o más ensayos variando el contenido de humedad y los datos de los ensayos se grafican o tabulan para establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido. Para determinar el límite líquido por el método de un solo punto, método B, se utilizan los datos de dos ensayos realizados con el mismo contenido de humedad, multiplicados por un factor de corrección.

El límite plástico resulta de amasar y enrollar alternamente una pequeña porción de suelo plástico formando cilindros de 3.2 mm de diámetro hasta que el contenido de agua se reduzca a un punto en el cual los cilindros se desmoronen y no puedan ser amasados y enrollados nuevamente. El contenido de agua del suelo en este punto es reportado como el límite plástico.

El índice de plasticidad se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

5.5.3 Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 μ m en agregados minerales.

5.5.3.1 Norma Técnica Colombiana (NTC) 78.

Se seca la muestra del ensayo a una masa constante y a una temperatura de 110°C \pm 5°C. se determina con una aproximación de 0.1% de la masa de la muestra de ensayo.

Luego del secado y de la determinación de la masa, se coloca la muestra en el recipiente y se adiciona suficiente agua para cubrirla. No se le debe adicionar ningún detergente, agente dispersor u otra sustancia al agua. Se agita la muestra con suficiente vigor para que se presente la separación completa de todas las partículas más finas que el tamiz de 75 μm (No. 200) de las partículas gruesas, y para llevar el material fino en suspensión.

Se adiciona una segunda carga de agua a la muestra en el recipiente, se agita y se decanta como antes. Se repite la operación hasta que el agua de lavado resulte limpia.

Se regresa todo el material retenido en el tamiz. Se seca el suelo lavado a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se determina la masa con una aproximación de 0.1% de la masa total de la muestra.

5.5.4 Determinación de la gravedad específica de los suelos

5.5.4.1 Norma Técnica Colombiana (NTC) 1974.

Para la masa del picnómetro utilizando la misma balanza empleada para calibrar el picnómetro, se verifica que la masa del picnómetro este dentro de 0.06 g de la masa calibrada promedio. Si no lo está, se debe calibrar nuevamente la masa seca del picnómetro.

Se determina el contenido de agua de una porción de la muestra de acuerdo, con la norma ASTM 2216. Con este contenido de Agua, se calcula el rango de masas húmedas para el peso específico según el numeral 7.1. De la muestra, se obtiene una parte dentro de ese rango. No se debe muestrear para obtener una predeterminada exacta.

Se dispersa el suelo utilizando una mezcladora o dispositivo equivalente. Se le añaden alrededor de 100 ml de agua al suelo. El volumen mínimo de lechada o pasta que puede prepararse con este equipo requiere generalmente emplear un picnómetro de 500 ml.

Empleando el embudo, se vierte la lechada dentro del picnómetro. Se escurren hacia el picnómetro las partículas de suelo que puedan quedar en el embudo con empleo de un frasco de lavado atomizador.

Se añade agua hasta que el nivel de esta se halla entre $1/3$ y $1/2$ de la altura del cuerpo principal del picnómetro. Se agita el agua hasta que se forme la lechada. Escorra cualquier partícula adherida al picnómetro hasta la lechada.

Si no se forma lechada, sino una pasta viscosa, se debe usar un picnómetro de mayor volumen.

En la deaireación de la lechada del suelo, el picnómetro debe agitarse continuamente al vacío durante 2h como mínimo. Agitarlo continuamente significa que los sólidos de limo/arcilla permanezcan en suspensión, y la lechada este en constante movimiento. El vacío debe permanecer relativamente constante y ser suficiente para causar burbujeo al comienzo del proceso de deaireación.

Se llena el picnómetro con agua deaireada introduciendo el agua a través de un pedazo de tubo flexible de diámetro pequeño, manteniendo su extremo de salida ligeramente por debajo de la superficie de la lechada en el picnómetro o empleando el tubo de llenado del picnómetro. Si se emplea el tubo de llenado del picnómetro, debe llenarse el tubo con agua y cerrar la válvula. Se coloca el tubo de forma que los orificios de drenaje queden justo en la superficie de la lechada.

5.5.5 Método de ensayo para determinar el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas y drenadas.

5.5.5.1 Norma Técnica Colombiana (NTC) 1917.

Se coloca los bloques porosos húmedos sobre los extremos expuestos del espécimen en la caja de corte, se coloca la caja de corte con el espécimen inalterado y los bloques porosos en el soporte de la caja de corte y se fija al soporte.

Se fija la caja de corte que contiene el espécimen compactado y los bloques porosos en el soporte.

Se conecta y ajusta el sistema de carga de corte de modo que no transmita fuerzas sobre el instrumento de medición de carga, posteriormente se conecta y se ajusta adecuadamente el instrumento de medición de desplazamiento horizontal utilizado para medir los desplazamientos de corte. Se hace una lectura inicial o se coloca el instrumento de medición para indicar el desplazamiento cero

Se coloca el bloque poro húmedo y la placa de transferencia de carga en la parte superior del espécimen en la caja de corte.

Se coloca el marco de carga de fuerza horizontal en posición y se ajusta de modo que la barra de carga quede horizontal. Si se utiliza un sistema de cargas por palancas se debe nivelar la palanca. Se aplica una pequeña carga normal al espécimen. Se verifica que todos los componentes del sistema de carga estén ajustados y alineados de tal manera que no quede restringido el movimiento de la placa de transferencia de carga en la caja de corte. Se registra la carga vertical y la carga vertical aplicadas en el sistema.

Se fija y ajusta los instrumentos de medición y desplazamiento lateral y vertical. Se obtiene las lecturas iniciales o se coloca en cero los instrumentos de medición de desplazamiento vertical y horizontal.

Si se requiere se llena la caja de corte con agua y se mantiene llena durante la ejecución del ensayo.

Se calcula y se registra la fuerza normal requerida para tener el esfuerzo normal deseado o el incremento subsiguiente. Se aplica el esfuerzo normal deseado agregando las masas apropiadas en el extremo de la palanca o incrementado la presión neumática.

Se aplica la carga normal deseada a los incrementos sucesivos de especímenes y se registran las lecturas de deformación normal contra el tiempo transcurrido. Para todos los incrementos de carga se deben verificar que la consolidación primaria a tenido lugar completamente antes de continuar. Se grafica el desplazamiento normal contra el logaritmo de tiempo o contra la raíz cuadrada del tiempo en minutos.

Después de que ha tenido lugar la consolidación primaria se remueve los tornillos de alineamiento o los pines de la caja de corte. Se abre el espaciado entre las mitades de la caja de corte hasta 0.6 mm utilizando los tornillos de separación. Se retiran los tornillos de separación.

Se selecciona la velocidad de desplazamiento apropiada. Se corta el espécimen a una velocidad relativamente baja de modo que haya exceso de presión de los poros en el momento de la ruptura. La siguiente ecuación puede ser utilizada como una guía para determinar el tiempo mínimo requerido desde el principio del ensayo hasta la ruptura.

$$t_f = 50 T_{50}$$

Ecuación 6. Tiempo mínimo requerido desde el principio del ensayo hasta la ruptura.

t_f es igual al tiempo total estimado hasta la ruptura expresado en minutos.

T_{50} es igual a tiempo requerido para que el espécimen alcance el 50% de la consolidación, bajo el esfuerzo normal especificado, expresado en minutos. Se remueve el espécimen de la caja de corte y se determina su contenido de humedad de acuerdo con el método de la NTC 1495.

Se calcula y grafica el esfuerzo de corte nominal contra el desplazamiento lateral relativo.

5.5.6 Método de ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos.

5.5.6.1 Norma Técnica Colombiana (NTC) 1967.

El consolidometro se debe ensamblar de manera que se impida el cambio en el contenido de humedad del espécimen. Con suelos secos y muy expansivos se deben usar filtros y discos porosos secos, y estos también se pueden usar para todos los otros suelos. Se ensambla el anillo con el espécimen, los discos porosos, y el consolidometro.

Para cada incremento se registra la altura o cambio de esta, d , a intervalos de tiempo de aproximadamente 0.1min, 0.25 min, 0.5 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min y 30 min, y 1 h, 2 h, 4 h, 8 h y 24 h. La duración del incremento de carga estándar debe ser superior al tiempo requerido para completar la consolidación primaria. Para cada incremento en donde sea imposible verificar el final de la consolidación primera, la duración del incrementos de carga debe ser constante y debe exceder el tiempo requerido para la consolidación primaria de un incremento aplicado después de la presión de preconsolidacion y a lo largo de la curva de compresión virgen. En donde se deba evaluar la compresión secundaria, se aplican presiones para periodos más largos. El reporte debe contener la duración del incremento de carga para cada incremento.

Una vez que han cesado los cambios de altura se desmonta rápidamente después de liberar la carga final más pequeña sobre el espécimen. Se retiran el espécimen y el anillo del consolidometro y se limpió el agua que pueda haber en el anillo y en el espécimen. Se determina la masa del espécimen en el anillo y se resta la masa de la tara del anillo para obtener la masa húmeda final del espécimen, MTF. La determinación más exacta de la masa seca del espécimen y el contenido de humedad se encuentra secando el espécimen completo al final del ensayo. Si la muestra de suelo es homogénea y hay a disposición suficientes recortes para el ensayo propiedades índices, se determina el contenido final humedad, W_f , de acuerdo con la NTC 1495 y la masa seca de sólidos, M_d , usando el espécimen completo.

5.6 ANÁLISIS DE LA LLUVIA.

Para tener un estudio más detallado de la precipitación en el municipio de Dosquebradas y Pereira, se instaló una estación en cada zona para tomar lecturas diarias de precipitación con el uso de un recipiente cilíndrico y con un formato que lleva el seguimiento día a día de las lecturas de precipitación, captación de agua de escorrentía en el talud, y las lecturas de presión de poros mediante la ayuda del piezómetro instalado en la zona de Combia perteneciente al municipio de Pereira.

Las lecturas diarias se tomaron en una hora establecida para tener un mejor control y por ende mayor precisión, la hora establecida fue las 6 am debido a que apenas están saliendo los primeros rayos de sol y no habría evaporación del agua contenida; las lecturas se empezaron a tomar en los primeros días del mes de marzo hasta el mes de agosto culminando con un tiempo de recolección de datos de 6 meses como se tenía proyectado.

5.7 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PERFIL ESTRATIGRÁFICO

Para sacar el perfil del terreno se dio uso de una manguera de nivel y de dos estacas a los extremos del talud.

Primero se llenó la manguera de agua y se verificó que estuviera sin burbujas de aire, luego se clavaron las estacas a los extremos del talud como se puede ver en la fotografía, en una de las estacas se tomó una medida de referencia de 50 cm y allí se colocó uno de los extremos de la manguera y se niveló la medida de referencia con la burbuja, por lo tanto el otro extremo de la manguera marcaba el nivel en el otro punto del talud, para poder tener así una línea recta, para hacer el aforo en el talud, como se muestra en las (Figuras 24 y 25).

Después de hacer los aforos de los taludes con la manguera de nivel se pasa a su modelación en Autocad para así obtener el perfil del talud, como se muestra en las (Graficas 1 y 2).



Figura 24. Aforo para la elaboración del perfil transversal del talud en Milán (Dosquebradas).

Fuente: Trabajo decampo

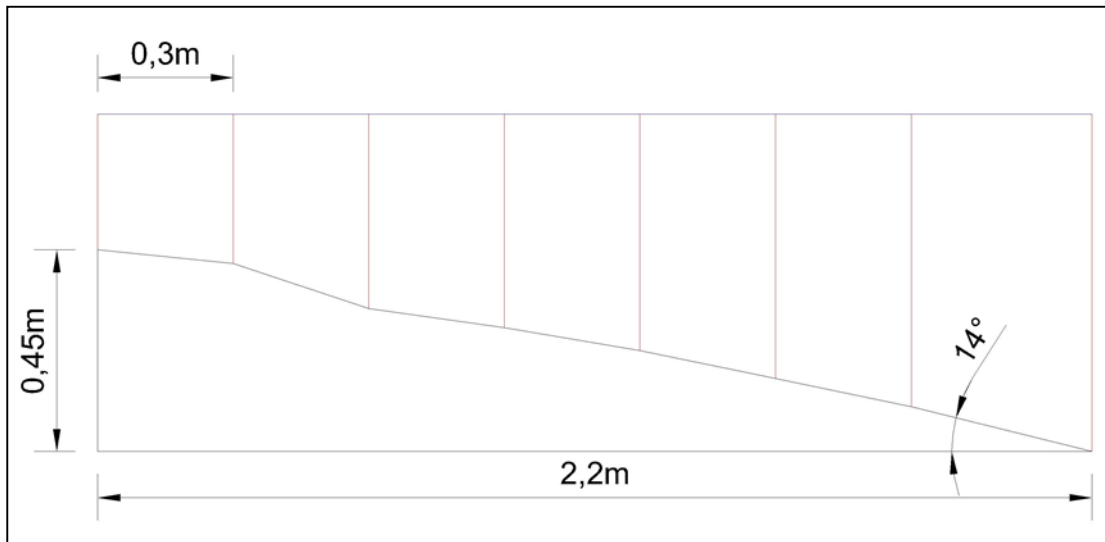


Grafico 1. Perfil del talud en Milán (Dosquebradas).
Fuente: producción propia elaborada en Autocad



Figura 25. Aforo para la elaboración del perfil transversal del talud en Combia (Pereira).
Fuente: Trabajo decampo

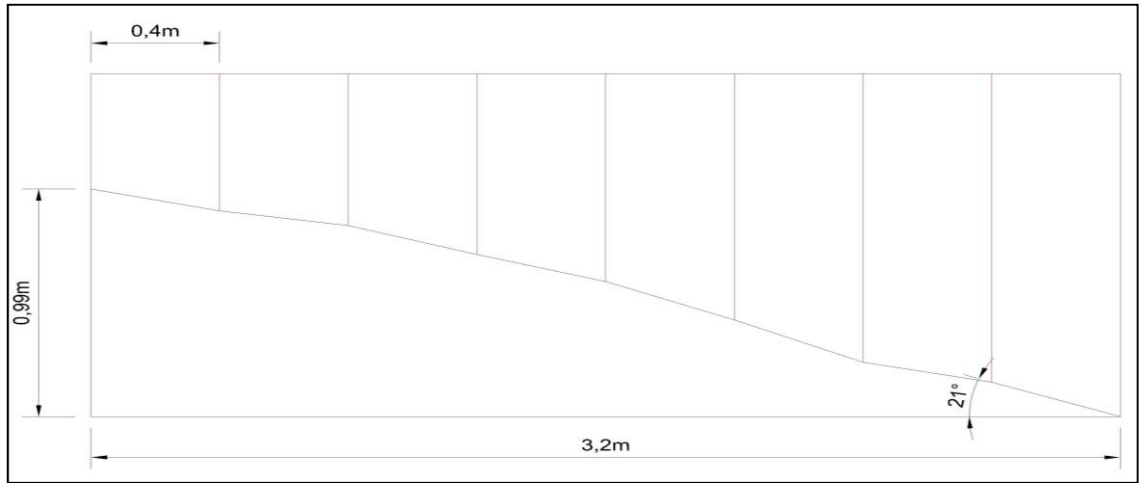


Gráfico 2. Perfil del talud en Combia (Pereira).
Fuente: producción propia elaborada en Autocad

6. RESULTADOS

6.1 RESULTADOS INFILTRACIÓN Y ESCORRENTÍA

Los resultados de lluvia, escorrentía infiltración corresponden al proceso de recuperados durante 6 meses para el predio de escorrentía para Milán (Dosquebradas) y 4 meses para el predio de escorrentía de Combia (Pereira). Los resultados se recopilaban diariamente y se presentan en tablas especificando el día en que se presentó la precipitación, la cantidad de lluvia recogida por el pluviómetro, la escorrentía del talud, además del cálculo de infiltración y el contenido de humedad.

Se presentan los datos de lluvia registrados en las estaciones meteorológicas Aeropuerto Matecaña del año 2015. También se presentan los resultados de la caracterización de suelos para ambos predios de escorrentía.

Tabla 3. Datos de infiltración y escorrentía mes de marzo Milan (Dosquebradas).

Marzo	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt2	Escorrentia (ml)	Escorrentia ml x mt2	Infiltracion (ml)	Infiltracion ml x mt2	Contenido de humedad (%)
3	3150.0	178268.3	196.0	49.0	2954.0	178219.3	-
8	2075.0	117430.7	120.0	30.0	1955.0	117400.7	-
10	100.0	5659.3	20.0	5.0	80.0	5654.3	-
14	200.0	11318.6	25.0	6.3	175.0	11312.4	-
15	800.0	45274.5	100.0	25.0	700.0	45249.5	-
16	3828.0	216638.4	1914.0	478.5	1914.0	216159.9	-
18	1669.0	94453.9	150.0	37.5	1519.0	94416.4	-
20	86.0	4864.2	20.0	5.0	66.0	4859.2	-
21	2041.6	115540.5	1276.0	319.0	765.6	115221.5	-
24	300.0	16977.9	40.0	10.0	260.0	16967.9	-
25	130.0	7357.1	15.0	3.8	115.0	7353.4	-
27	540.0	30560.3	80.0	20.0	460.0	30540.3	-
29	956.85	54151.1	65.0	16.3	891.9	54134.9	-
30	420.0	23769.1	40.0	10.0	380.0	23759.1	-
TOTAL	13298.0	922263.7	4061.0	1015.3	12235.4	921248.5	-
Maximo	3828.0	216638.4	1914.0	478.5	2954.0	216159.9	-
Minimo	86.0	4864.2	15.0	3.8	66.0	4859.2	-
Promedio	1108.2	65876.0	290.1	72.5	874.0	65803.5	-

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 3. se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Milán (Dosquebradas) para el mes de Marzo de 2015, se resalta

que la lluvia Máxima se presentó el día 16 de Marzo, y la mínima el día 20 de Marzo, con un promedio de lluvia por metro cuadrado de 65876 ml x mt². Para los datos de la escorrentía, se presentó la máxima escorrentía el día 16 de Marzo, y la mínima el día 25 de Marzo, con un promedio de escorrentía por metro cuadrado de 72.5 ml x mt².

En los cálculos de infiltración, se tuvo una infiltración máxima el día 16 de Marzo, y la mínima el día 20 de Marzo, con un promedio de infiltración por metro cuadrado de 65803.5 ml x mt².

Tabla 4. Datos de infiltración y escorrentía mes de abril Milan (Dosquebradas).

Abril	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt2	Escorrentia (ml)	Escorrentia ml x mt2	Infiltracion (ml)	Infiltracion ml x mt2	Contenido de humedad (%)
1	470.0	26598.8	30.0	7.5	440.0	26591.3	-
3	640.0	36219.6	110.0	27.5	530.0	36192.1	-
4	330.0	18675.7	30.0	7.5	300.0	18668.2	-
5	1914.0	108319.2	1914.0	478.5	0.0	107840.7	-
11	400.0	22637.2	60.0	15.0	340.0	22622.2	-
14	1000.0	56593.1	150.0	37.5	850.0	56555.6	-
15	2870.0	162422.2	640.0	160.0	2230.0	162262.2	-
16	800.0	45274.5	190.0	47.5	610.0	45227.0	-
17	2870.0	162422.2	1280.0	320.0	1590.0	162102.2	-
18	3190.0	180532.0	1910.0	477.5	1280.0	180054.5	-
21	100.0	5659.3	20.0	5.0	80.0	5654.3	-
24	240.0	13582.3	70.0	17.5	170.0	13564.8	-
25	1150.0	65082.1	200.0	50.0	950.0	65032.1	-
28	400.0	22637.2	70.0	17.5	330.0	22619.7	-
29	200.0	11318.6	30.0	7.5	170.0	11311.1	-
TOTAL	16574.0	937974.0	6704.0	1676.0	9870.0	936298.0	-
Maximo	3190.0	180532.0	1914.0	478.5	2230.0	180054.5	-
Minimo	100.0	5659.3	20.0	5.0	0.0	5654.3	-
Promedio	1104.9	62531.6	446.9	111.7	658.0	62419.9	-

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 4. se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Milán (Dosquebradas) para el mes de Abril de 2015. Para este mes se tuvo una lluvia máxima el día 18 de Abril, y el día 21 de Abril se obtuvo la lluvia mínima, dando como resultado un promedio de lluvia por metro cuadrado de 62531.6 ml x mt². En la tabla se puede apreciar que la escorrentía máxima tuvo lugar el día 5 de abril, y su lectura mínima de escorrentía el día 21 de Abril, se obtuvo un promedio de escorrentía por metro cuadrado de 111.7 ml x mt² para este mes. Para la infiltración la lectura máxima fue el día 18 de Abril, y su lectura

mínima el día 21 de Abril, como resultado se obtuvo un promedio de infiltración por metro cuadrado de 62419.9 ml x mt².

Tabla 5. Datos de infiltración y escorrentía mes de mayo Milan (Dosquebradas).

Mayo	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt2	Escorrentia (ml)	Escorrentia ml x mt2	Infiltracion (ml)	Infiltracion ml x mt2	Contenido de humedad (%)
1	1120.0	63384.3	430.0	107.5	690.0	63276.8	-
4	3830.0	216751.6	2550.0	637.5	1280.0	216114.1	-
10	5740.0	324844.4	2560.0	640.0	3180.0	324204.4	-
16	3830.0	216751.6	2553.0	638.3	1277.0	216113.3	-
25	300.0	16977.9	40.0	10.0	260.0	16967.9	-
26	640.0	36219.6	1140.0	285.0	-500.0	35934.6	-
29	1140.0	64516.1	2550.0	637.5	-1410.0	63878.6	-
31	780.0	44142.6	600.0	150.0	180.0	43992.6	-
TOTAL	17380.0	983588.0	12423.0	3105.8	4957.0	980482.3	-
Maximo	5740.0	324844.4	2560.0	640.0	3180.0	324204.4	-
Minimo	300.0	16977.9	40.0	10.0	-1410.0	16967.9	-
Promedio	2172.5	122948.5	1552.9	388.2	619.6	122560.3	-

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 5. Se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Milán (Dosquebradas) para el mes de Mayo de 2015. Para este mes se obtuvieron los siguiente resultados de lluvia, escorrentía e infiltración: Para este mes se tuvo una lluvia máxima el día 10 de Mayo, y el día 25 de Mayo se obtuvo la lluvia mínima, como resultado se presentó un promedio de lluvia por metro cuadrado de 122948.5 ml x mt². Para este mes la escorrentía máxima se obtuvo el día 10 de Mayo, y la escorrentía mínima el día 25 de Mayo, el resultado de la escorrentía promedio por metro cuadrado fue de 388.2 ml x mt². La infiltración máxima para este mes fue el día 10 de Mayo, y la mínima fue el día 25 de Mayo, lo que da como resultado un promedio de infiltración por metro cuadrado de 122560.3 ml x mt².

Tabla 6. Datos de infiltración y escorrentía mes de junio Milan (Dosquebradas).

Junio	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt2	Escorrentia (ml)	Escorrentia ml x mt2	Infiltracion (ml)	Infiltracion ml x mt2	Contenido de humedad (%)
6	70.0	3961.5	20.0	5.0	50.0	3956.5	-
10	2280.0	129032.3	1820.0	455.0	460.0	128577.3	-
13	2250.0	127334.5	1800.0	450.0	450.0	126884.5	-
TOTAL	4600.0	260328.2	3640.0	910.0	960.0	259418.2	-
Maximo	2280.0	129032.3	1820.0	455.0	460.0	128577.3	-
Minimo	70.0	3961.5	20.0	5.0	50.0	3956.5	-
Promedio	1533.3	86776.1	1213.3	303.3	320.0	86472.7	-

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 6. se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Milán (Dosquebradas) para el mes de Junio de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 10 de Junio, y la mínima el día 6 de Junio, con un promedio de lluvia por metro cuadrado de 86776.1 ml x mt². Para los datos de la escorrentía, se presentó la máxima escorrentía el día 10 de Junio, y la mínima el día 6 de Junio, con un promedio de escorrentía por metro cuadrado de 303.3 ml x mt². En los cálculos de infiltración, se tuvo una infiltración máxima el día 10 de Junio, y la mínima el día 6 de Junio, con un promedio de infiltración por metro cuadrado de 86472.7 ml x mt².

Tabla 7. Datos de infiltración y escorrentía mes de julio Milán (Dosquebradas).

Julio	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt ²	Escorrentia (ml)	Escorrentia ml x mt ²	Infiltracion (ml)	Infiltracion ml x mt ²	Contenido de humedad (%)
6	830.0	46972.3	62.0	15.5	768.0	46956.8	-
8	1200.0	67911.7	130.0	32.5	1070.0	67879.2	-
15	180.0	10186.8	50.0	12.5	130.0	10174.3	-
16	1320.0	74702.9	290.0	72.5	1030.0	74630.4	-
20	320.0	18109.8	30.0	7.5	290.0	18102.3	63.8
21	1200.0	67911.7	60.0	15.0	1140.0	67896.7	-
22	1540.0	87153.4	170.0	42.5	1370.0	87110.9	74.0
29	160.0	9054.9	65.0	16.3	95.0	9038.6	-
TOTAL	6750.0	382003.4	857.0	214.3	5893.0	381789.1	
Maximo	1540.0	87153.4	290.0	72.5	1370.0	87110.9	74.0
Minimo	160.0	9054.9	30.0	7.5	95.0	9038.6	63.8
Promedio	843.8	47750.4	107.1	26.8	736.6	47723.6	68.9

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 7. Se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Milán (Dosquebradas) para el mes de Julio de 2015. Para este mes se tuvo una lluvia máxima el día 22 de Julio, y el día 29 de Julio se obtuvo la lluvia mínima, dando como resultado un promedio de lluvia por metro cuadrado de 47750.4 ml x mt². En la tabla se puede apreciar que la escorrentía máxima tuvo lugar el día 16 de Julio, y su lectura mínima de escorrentía el día 20 de Julio, se obtuvo un promedio de escorrentía por metro cuadrado de 26.8 ml x mt² para este mes. Para la infiltración la lectura máxima fue el día 22 de Julio, y su lectura mínima el día 29 de Julio, como resultado se obtuvo un promedio de infiltración por metro cuadrado de 47723.6 ml x mt². Cabe resaltar que en este mes se realizó ensayos de contenido de humedad dando como resultado un máximo de 74% y como mínimo 63.8%.

Tabla 8. Datos de infiltración y escorrentía mes de agosto Milan (Dosquebradas).

Agosto	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt2	Escorrentía (ml)	Escorrentía ml x mt2	Infiltración (ml)	Infiltración ml x mt2	Contenido de humedad (%)
8	1000.0	56593.1	150.0	37.5	850.0	56555.6	-
14	1380.0	78098.5	370.0	92.5	1010.0	78006.0	72.7
25	2580.0	146010.2	1920.0	480.0	660.0	145530.2	78.5
26	1930.0	109224.7	750.0	187.5	1180.0	109037.2	-
TOTAL	6890.0	389926.4	3190.0	797.5	3700.0	389128.9	
Maximo	2580.0	146010.2	1920.0	480.0	1180.0	145530.2	78.5
Minimo	1000.0	56593.1	150.0	37.5	660.0	56555.6	72.7
Promedio	1722.5	97481.6	797.5	199.4	925.0	97282.2	75.6

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 8. se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Milán (Dosquebradas) para el mes de Agosto de 2015. Para este mes se obtuvieron los siguiente resultados de lluvia, escorrentía y infiltración: Para este mes se tuvo una lluvia máxima el día 25 de Agosto, y el día 8 de Agosto se obtuvo la lluvia mínima, como resultado se presentó un promedio de lluvia por metro cuadrado de 97481.6 ml x mt². Para este mes la escorrentía máxima se obtuvo el día 25 de Agosto, y la escorrentía mínima el día 8 de Agosto, el resultado de la escorrentía promedio por metro cuadrado fue de 199.4 ml x mt². La infiltración máxima para este mes fue el día 25 de Agosto, y la mínima fue el día 8 de Agosto, lo que da como resultado un promedio de infiltración por metro cuadrado de 97282.2 ml x mt². Cabe resaltar que en este mes se realizó ensayos de contenido de humedad dando como resultado un máximo de 78.5% y como mínimo 72.7%.

Tabla 9. Datos de infiltración y escorrentía mes de marzo Combia (Pereira).

Marzo	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt2	Escorrentía (ml)	Escorrentía ml x mt2	Infiltración (ml)	Infiltración ml x mt2	Piezómetro (centibars)
16	66.1	1000.8	0.0	0.0	66.1	1000.8	10.0
18	330.3	5003.9	66.4	11.1	263.9	4992.8	11.0
19	396.3	6004.7	132.7	22.1	263.6	5982.6	12.0
21	2972.4	45035.6	185.8	31.0	2786.5	45004.6	12.0
25	1320.2	15011.8	1261.0	210.2	59.2	14801.7	13.0
26	1321.0	20015.8	929.1	154.9	391.9	19860.9	11.0
27	680.5	10007.9		110.6	16.9	9897.3	10.0
máximo	2972.4	45035.6	1261.0	210.2	2786.5	45004.6	13.0
mínimo	66.1	1000.8	0.0	0.0	16.9	1000.8	10.0
promedio	1012.4	14582.9	462.7	77.1	549.7	14505.8	11.3

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 9. se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Combia (Pereira) para el mes de Marzo de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 21 de Marzo, y la mínima el día 16 de Marzo, con un promedio de lluvia por metro cuadrado de 14582.9 ml x mt². Para los datos de la escorrentía, se presentó la máxima escorrentía el día 25 de Marzo, y la mínima el día 16 de Marzo, con un promedio de escorrentía por metro cuadrado de 549.7 ml x mt². En los cálculos de infiltración, se tuvo una infiltración máxima el día 21 de Marzo, y la mínima el día 16 de Marzo, con un promedio de infiltración por metro cuadrado de 14505.8ml x mt. Para el piezómetro se obtuvo la lectura máxima el día 25 de marzo y la mínima el día 16 de marzo.

Tabla 10. Datos de infiltración y escorrentía mes de abril Combia (Pereira).

Abril	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt ²	Escorrentía (ml)	Escorrentía ml x mt ²	Infiltración (ml)	Infiltración ml x mt ²	Piezómetro (centibars)
3	630.3	5003.9	530.9	88.5	99.3	4915.5	10.0
11	680.5	10007.9	663.7	110.6	16.9	9897.3	10.0
12	832.6	12009.6	796.4	132.7	36.2	11876.8	11.0
15	324.1	2001.6	265.5	44.3	58.6	1957.4	12.0
16	432.3	1000.8	398.2	66.4	34.1	934.4	11.0
19	142.1	2001.6	132.7	22.1	9.4	1979.5	12.0
22	660.5	10007.9	265.5	44.2	395.1	9963.6	13.0
23	430.3	5003.9	398.5	66.4	31.8	4937.5	12.0
24	622.3	9429.1	398.2	66.4	224.1	9362.7	11.0
28	660.5	10007.9	530.9	88.5	129.6	9919.4	10.0
29	640.5	9704.5	265.5	44.3	375.0	9660.3	11.0
máximo	832.6	12009.6	796.4	132.7	395.1	11876.8	13.0
mínimo	142.1	1000.8	132.7	22.1	9.4	934.4	10.0
promedio	550.5	6925.3	422.4	70.4	128.2	6854.9	11.2

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 10. Se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Combia (Pereira) para el mes de Abril de 2015. Para este mes se tuvo una lluvia máxima el día 12 de Abril, y el día 19 de Abril se obtuvo la lluvia mínima, dando como resultado un promedio de lluvia por metro cuadrado de 6925.3 ml x mt². En la tabla se puede apreciar que la escorrentía máxima tuvo lugar el día 12 de abril, y su lectura mínima de escorrentía el día 19 de Abril, se obtuvo un promedio de escorrentía por metro cuadrado de 70.4 ml x mt² para este mes. Para la infiltración la lectura máxima fue el día 12 de Abril, y su lectura mínima el día 16 de Abril, como resultado se obtuvo un promedio de infiltración por metro cuadrado de 6854.9 ml x mt². Para el piezómetro se obtuvo la lectura

máxima el día 22 de abril y la mínima fue reiterativa en diferentes días de este mes.

Tabla 11. Datos de infiltración y escorrentía mes de Mayo Combia (Pereira).

Mayo	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt ²	Escorrentía (ml)	Escorrentía ml x mt ²	Infiltración (ml)	Infiltración ml x mt ²	Piezómetro (centibars)
1	330.3	5003.9	331.8	55.3	275.0	4948.6	12.0
2	660.5	10007.9	398.2	66.4	594.2	9941.5	12.0
3	330.3	5003.9	199.1	33.2	297.1	4970.8	12.0
9	660.5	10007.9	132.7	22.1	638.4	9985.8	11.0
14	990.8	15011.8	331.8	55.3	935.5	14956.5	11.0
15	660.5	10007.9	199.1	33.2	627.3	9974.7	12.0
20	2311.8	35027.6	530.9	88.5	2223.3	34939.1	10.0
21	1321.0	20015.8	265.5	44.3	1276.8	19971.5	11.0
26	660.5	10007.9	530.9	88.5	572.0	9919.4	14.0
29	330.3	5003.9	199.1	33.2	297.1	4970.8	11.0
30	528.4	8006.4	132.7	22.1	506.3	7984.2	12.0
31	616.3	9338.2	398.2	66.4	550.0	9271.8	11.0
Máximo	2311.8	35027.6	530.9	88.5	2223.3	34939.1	14.0
Mínimo	330.3	5003.9	132.7	22.1	275.0	4948.6	10.0
Promedio	783.4	11870.3	304.2	50.7	732.7	11819.6	11.6

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 11. Se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Combia (Pereira) para el mes de Mayo de 2015. Para este mes se obtuvieron los siguiente resultados de lluvia, escorrentía e infiltración: Para este mes se tuvo una lluvia máxima el día 20 de Mayo, y el día 3 de Mayo se obtuvo la lluvia mínima, como resultado se presentó un promedio de lluvia por metro cuadrado de 11870.3 ml x mt². Para este mes la escorrentía máxima se obtuvo el día 20 de Mayo, y la escorrentía mínima el día 9 y 30 de Mayo, el resultado de la escorrentía promedio por metro cuadrado fue de 50.7 ml x mt². La infiltración máxima para este mes fue el día 20 de Mayo, y la mínima fue el día 1 de Mayo, lo que da como resultado un promedio de infiltración por metro cuadrado de 11819.6 ml x mt². Para el piezómetro se obtuvo la lectura máxima el día 26 de mayo y la mínima el día 20 de mayo.

Tabla 12. Datos de infiltración y escorrentía mes de junio Combia (Pereira).

Junio	Lluvia (ml)	Lluvia ml x mt ²	Escorrentía (ml)	Escorrentia ml x mt ²	Infiltracion (ml)	Infiltracion ml x mt ²	Piezómetro (centibars)
1	990.8	15011.8	398.2	66.4	592.6	14945.5	9.0
4	660.5	10007.9	265.5	44.3	395.1	9963.6	10.0
5	330.3	5003.9	132.7	22.1	197.5	4981.8	10.0
10	660.5	10007.9	265.5	44.3	395.1	9963.6	10.0
11	660.5	10007.9	172.6	28.8	488.0	9979.1	10.0
12	330.3	5003.9	132.7	22.1	197.5	4981.8	11.0
17	330.3	5003.9	132.7	22.1	197.5	4981.8	11.0
18	660.5	15011.8	172.6	28.8	488.0	14983.0	11.0
22	660.5	15011.8	265.5	44.3	395.1	14967.6	13.0
23	660.5	15011.8	398.2	66.4	262.3	14945.5	12.0
24	660.5	15011.8	398.2	66.4	262.3	14945.5	11.0
Máximo	990.8	15011.8	398.2	66.4	592.6	14983.0	13.0
Mínimo	330.3	5003.9	132.7	22.1	197.5	4981.8	9.0
Promedio	600.5	10917.7	248.6	41.4	351.9	10876.2	10.7

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 12. se presentan los datos de infiltración y escorrentía del predio de escorrentía de Combia (Pereira) para el mes de Junio de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 1 de Junio, y la mínima el día 12 de Junio, con un promedio de lluvia por metro cuadrado de 10917.7 ml x mt². Para los datos de la escorrentía, se presentó la máxima escorrentía los días 1, 23 y 24 de Junio, y la mínima los días 5,12 y 17 de Junio, con un promedio de escorrentía por metro cuadrado de 41.4 ml x mt². En los cálculos de infiltración, se tuvo una infiltración máxima el día 18 de Junio, y la mínima el día 5, 12 y 17 de Junio, con un promedio de infiltración por metro cuadrado de 10876.2 ml x mt². Para el piezómetro se obtuvo la lectura máxima el día 22 de junio y la mínima el día 1 de junio.

6.2 TABLAS DE REGISTROS DE LLUVIAS ESTACIÓN MATECAÑA

En el Grafico 3. Se presentan los datos de lluvia diaria del municipio de Pereira para el mes de marzo de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 20 de marzo, y la mínima el día 22 de marzo

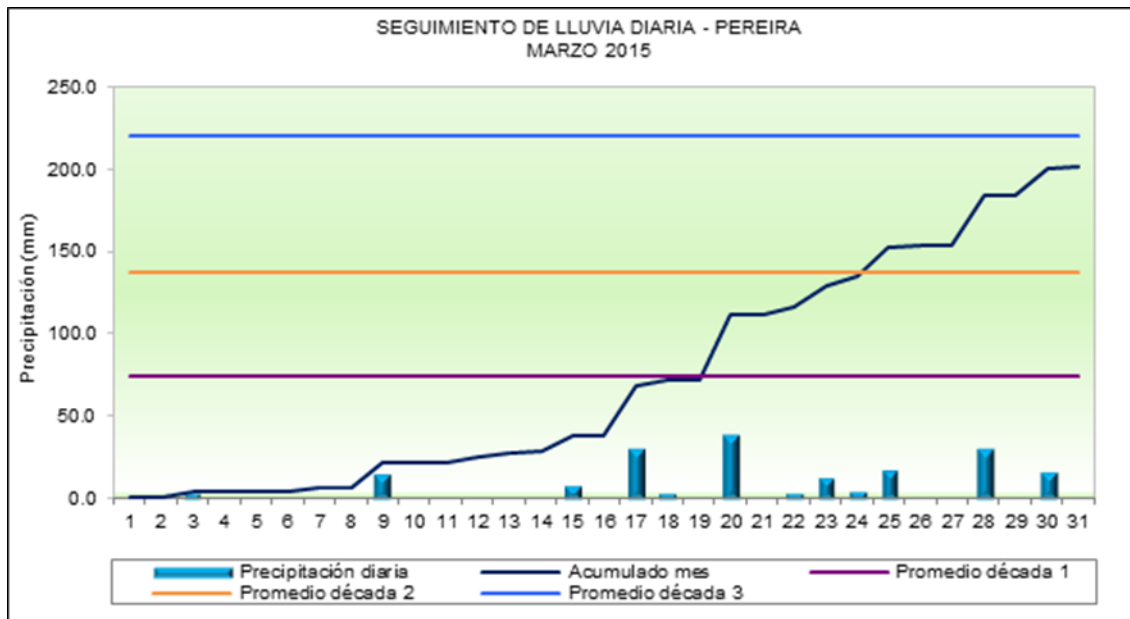


Gráfico 3. Registro de lluvia en Pereira mes de marzo.
Fuente: IDEAM

En Gráfico 4. Presenta los datos de lluvia diaria del municipio de Pereira para el mes de abril de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 14 de abril, y la mínima el día 9 de abril.

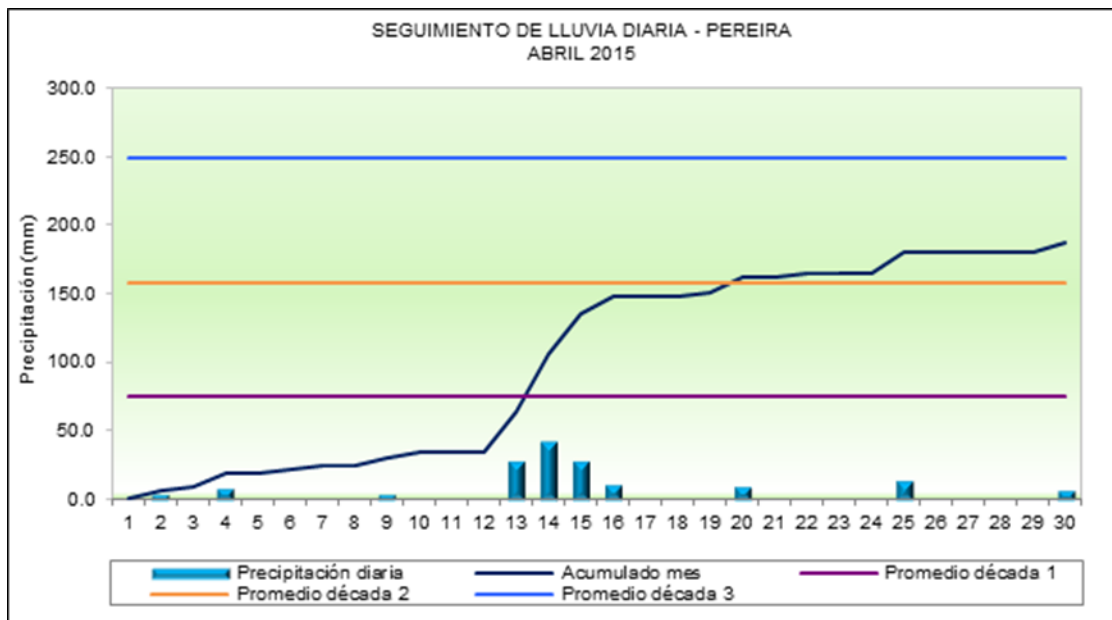


Gráfico 4. Registro de lluvia en Pereira mes de abril.
Fuente: IDEAM

En el Grafico 5. Se presentan los datos de lluvia diaria del municipio de Pereira para el mes de mayo de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 2 de mayo, y la mínima el día 25 de mayo.

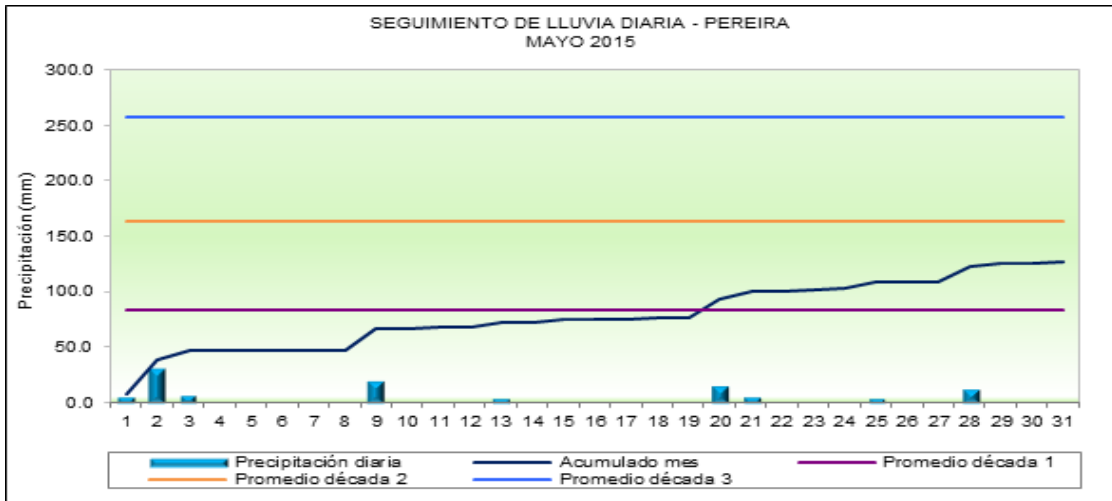


Gráfico 5. Registro de lluvia en Pereira mes de mayo.
Fuente: IDEAM

En el Grafico 6. Se presentan los datos de lluvia diaria del municipio de Pereira para el mes de junio de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 8 de junio, y la mínima el día 9 de junio.

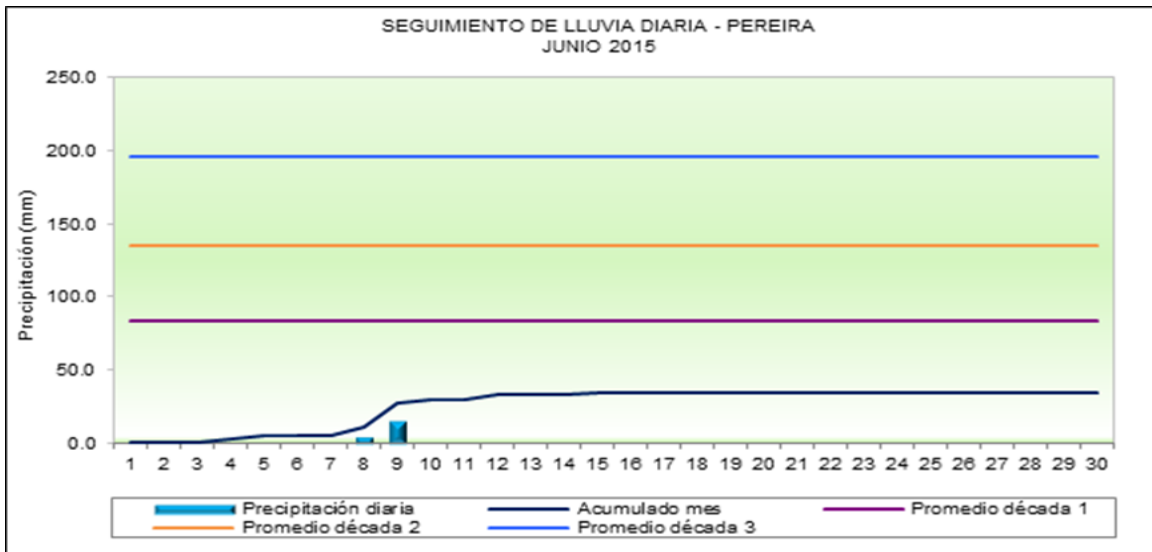


Gráfico 6. Registro de lluvia en Pereira mes de junio
Fuente: IDEAM

En la Grafico 7. se presentan los datos de lluvia diaria del municipio de Pereira para el mes de julio de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 21 de julio, y la mínima el día 11 de julio.

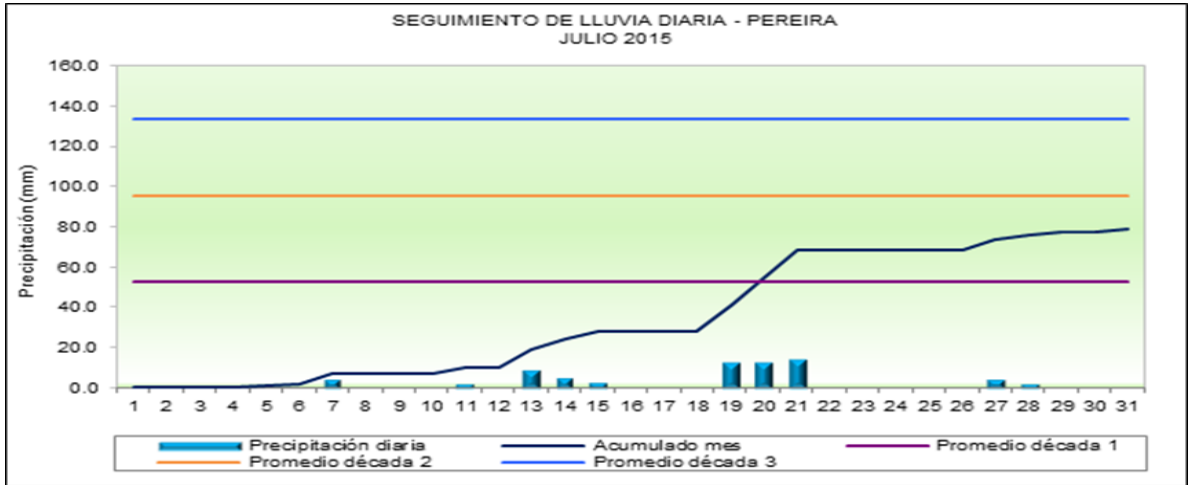


Gráfico 7. Registro de lluvia en Pereira mes de julio
Fuente: IDEAM

En el Gráfico 8. Se presentan los datos de lluvia diaria del municipio de Pereira para el mes de agosto de 2015, se resalta que la lluvia Máxima se presentó el día 23 de agosto, y la mínima el día 30 de agosto.

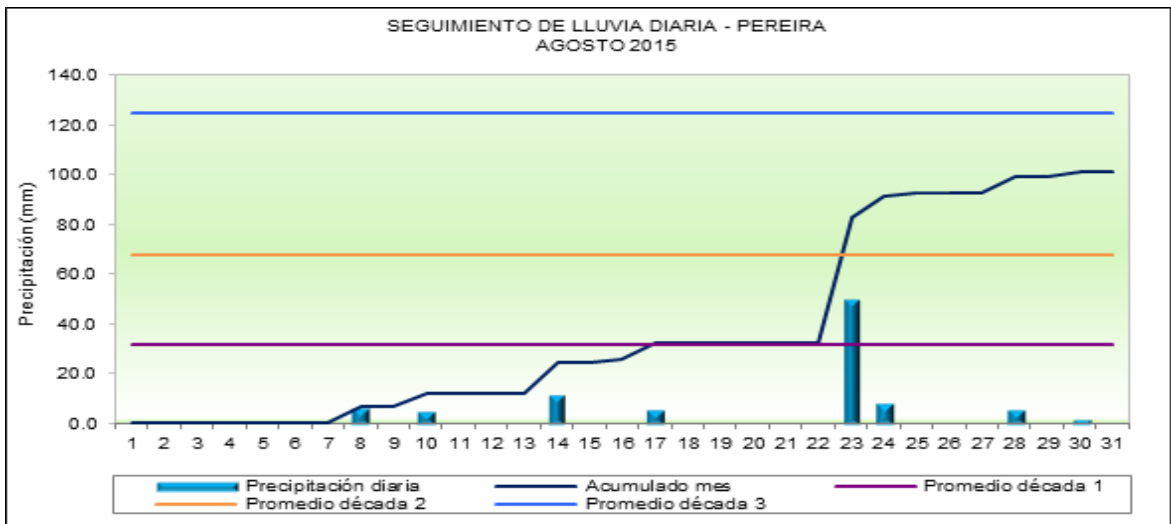


Gráfico 8. Registro de lluvia en Pereira mes de agosto.
Fuente: IDEAM

6.3 TABLAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Tabla 13. Valores estimados de evapotranspiración de referencia (ET_o) y la evaporación de tanque A (mm) para algunas estaciones de la región cafetera de Colombia.

Estación	Municipio	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m)	Eto día (mm)	ETo año (mm)	Evaporación tanque A (mm.día ⁻¹)
Risaralda							
La Tribuna	Balboa	04 57	75 58	1.580	3,19	1.163	3,42
Ingenio Risaralda	Balboa	04 55	75 54	908	3,64	1.330	3,90
El Bosque	Dosquebradas	04 51	75 41	1.458	3,26	1.192	3,49
Ospirma	Guática	05 20	75 49	1.661	3,13	1.144	3,35
Buenos Aires	Guática	05 19	75 48	1.814	3,04	1.110	3,26
La Palmera	Marsella	05 00	75 45	1.450	3,27	1.194	3,50
Combia	Pereira	04 51	75 47	1.173	3,46	1.262	3,70
...Continuación							
Los Cábulos	Pereira	04 49	75 50	1.189	3,45	1.257	3,69
Planta de tratamiento	Pereira	04 48	75 40	1.487	3,25	1.185	3,48
Hiroshima	Pereira	04 46	75 44	1.340	3,34	1.220	3,58
La Catalina	Pereira	04 45	75 44	1.321	3,36	1.225	3,60
El Cedral	Pereira	04 42	75 32	2.120	2,86	1.044	3,06
La Oriental	Quinchía	05 22	75 43	1.730	3,09	1.129	3,31
El Diamante	Quinchía	05 19	75 42	1.550	3,21	1.170	3,44
El Jazmín	S Rosa Cabal	04 55	75 37	1.635	3,15	1.150	3,37
Los Naranjos	Santuario	05 03	76 00	1.580	3,19	1.163	3,42

Fuente: JARAMILLO R., 2006

Se tomo como referencia la (tabla 13) para las condiciones climáticas de Pereira y Dosquebradas para así saber la evapotranspiración de dichos municipios, para las condiciones climáticas de Dosquebradas se tomo como referencia la estación del Bosque y para Pereira la estación de Combia, dando como resultado los siguientes datos de evapotranspiración: 1.262 mm para Combia (Pereira) y 1.192mm para Bosque (Dosquebradas).

6.4 RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Una vez realizados las pruebas de laboratorio para la determinación de la textura de los suelos, en los dos predios de escorrentía se encontró que ambos sectores de análisis están conformados por suelos derivados de cenizas volcánicas clasificados como Limos arenosos de alta compresibilidad, como se presenta en la (tabla 14).

Tabla 14. Clasificación del suelo

SUELO	LOCALIZACIÓN	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	LIMITE LIQUIDO %	LIMITE PLÁSTICO %	ÍNDICE DE PLASTICIDAD %	PORCENTAJE DE ARENAS (retenido tamiz 4)	PORCENTAJE DE FINOS (pasante tamiz 200)	SUCS	AASHTO
1	Combia	1	1	74,69	66,12	8,57	10,7	89,3	MH	A-5 Suelos Limosos
2	Milan	1	1	59,4	43,68	15,72	17,3	82,7	MH	A-5 Suelos Limosos

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las características físicas del suelo, se encontró que los suelos presentan relaciones de vacíos del orden de 2,5, indicando que la porosidad $n=0.733$ para Combia y $n=0.721$ para Milan, esto esta correlacionado con la alta infiltración que presentaron ambos suelos, como se presentan en la (tabla 15).

Tabla 15. Características físicas de los suelos

SUELO	LOCALIZACIÓN	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	Contenido de humedad natural (%)	Gravedad Especifica	Peso Unitario Húmedo (g/cm ³)	Peso Unitario seco (g/cm ³)	relación de vacíos inicial
1	Combia	1	1	59,65	2,289	1,436	0,866	2,75
2	Milán	1	1	72,25	2,585	1,314	0,730	2,59

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el resultado del ensayo de corte directo, se determino que la resistencia al corte en ambos suelos estará determinada por la cohesión y fricción de sus partículas, en algunas investigaciones han determinado que las cenizas volcánicas disminuyen la cohesión cuando están expuestas a condiciones de saturación, así mismo la cohesión aumentará cuando disminuya el contenido de humedad, como se presenta en la (tabla 16).

Tabla 16. Características mecánicas de los suelos

SUELO	LOCALIZACIÓN	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	Contenido Humedad (%)	Peso Unitario Húmedo (g/cm ³)	Peso Unitario seco (g/cm ³)	Cohesión kg/cm ²	Angulo de fricción (grados)
1	Combia	2	1	59,65	1,436	0,866	1,44	30
2	Milán	2	1	72,25	1,314	0,730	0,22	22

Fuente: Elaboración propia

6.4.1 Resultados de consolidación

El ensayo de consolidación se realizó para determinar la permeabilidad de los materiales, debido a su textura fina, se encontró que según la permeabilidad el suelo se puede clasificar como suelos orgánicos- arcilla, como se presenta en la (tabla 17).

Tabla 17. Ensayo de consolidación Combia

COMBIA								
Carga (kg)	Def (mm)	e	Esfuerzo (kg/cm ²)	De	Ds (kg/cm ²)	Coefficiente de compresibilidad $\frac{ad}{av}$ (cm ² /kg)	Cv (cm ² /s)	K (cm/s)
2	2,77	2,331	1,018				3,07813E-06	
4	4,01	2,145	2,037	0,186	1,018	0,1825	2,5651E-05	1,33757E-09
8	5,87	1,867	4,075	0,278	2,037	0,1364	2,5651E-05	9,99581E-10
16	6,985	1,699	8,150	0,168	4,075	0,0412	2,7983E-05	3,29489E-10
PROMEDIO						0,120	2,05908E-05	8,8888E-10
Ws	30		1000	0,125	3,0781E-06			
Hs	1		120	0,125	2,5651E-05			
area	20	cm ²	15	0,125	0,00020521			
			110	0,125	2,7983E-05			

Hs	0,667
Hv	1,833
e	2,746

Fuente: Elaboración propia

El ensayo de consolidación se realizó para determinar la permeabilidad de los suelos estudiados, debido a su textura fina, se clasificó el suelo que según la permeabilidad que este presentara, el suelo se puede clasificar como arcilla y mezcla de limos, como se presenta en la (tabla 18).

Tabla 18. Ensayos de consolidación Milán

DOSQUEBRADAS								
Carga (kg)	Def (mm)	e	Esfuerzo (kg/cm ²)	De	Ds (kg/cm ²)	Coefficiente de compresibilidad av (cm ² /kg)	Coefficiente de consolidación Cv (cm ² /s)	K (cm/s)
2	0,5334	2,427	1,0188				0,000275	
4	1	2,358	2,038	0,069	1,019	0,0677	0,000154	2,97717E-09
8	2	2,249	4,0754	0,109	2,038	0,0535	0,000172	2,61281E-09
16	3	2,083	8,1508	0,166	4,075	0,04073	0,0002199	2,55802E-09
PROMEDIO						0,05398	0,0002049	2,716E-09
Gs	2,6		t 50	H	Cv			
Ws	36		11,2	0,125	0,00027			
Hs cm	0,7140		20	0,125	0,000154			
área	20	cm ²	18	0,125	0,000171			
			14	0,125	0,000219			

Hs	0,714
Hv	1,786
e	2,501

Fuente: Elaboración propia

6.5 RESULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD

Los resultados de factor de seguridad corresponden al cálculo de estabilidad de taludes para suelos parcialmente saturados, utilizando la fórmula de Taylor (1948), para esto se utilizaron los valores arrojados de los laboratorios que se llevaron a cabo para las variables que la fórmula de Taylor. Los resultados del factor de seguridad se efectuaron en los taludes ubicados en Milán (Dosquebradas) y de Combia (Pereira), utilizando diferentes succiones y aumentando la pendiente del terreno para así ver como estas condiciones afectan la estabilidad de los taludes.

A continuación se presentan los resultados del factor de seguridad utilizando diferentes succiones y pendientes en los taludes de estudio de Milán (Dosquebradas) y de Combia (Pereira):

Tabla 19. Parámetros para el cálculo de factor de seguridad para suelo parcialmente saturado con succión en Combia.

Parámetros	Valor
h= succión matricial al nivel del plano de falla (cm agua)	-91.78
Cap= cohesión aparente al nivel del plano de falla (kPa)	141.22
Y= peso unitario total del suelo arriba del plano de falla (KN/m ³)	14.08
z= profundidad del plano de falla (m)	1
B= inclinación del talud o la ladera (grados)	45
ϕ = Angulo de fricción efectivo del suelo donde pasa el plano de falla	30
FACTOR DE SEGURIDAD	13.11

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 19. Se muestra los parámetros para el cálculo del factor de seguridad para suelos parcialmente saturados, utilizando la fórmula de Taylor (1948), en la cual se hallaron distintos factores de seguridad teniendo como variables la succión y la inclinación del talud, en las siguientes tablas se puede apreciar los resultados obtenidos para el talud de Combia.

Tabla 20. Factor de seguridad para una succión de -91.78 cm de agua en Combia

Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
-91.78	35	11.66	Suelo parcialmente saturado
	40	12.80	
	45	13.11	
	50	12.60	
	55	11.24	
	60	9.01	
	65	5.81	
	70	1.39	
	75	-4.87	
	80	-15.04	
85	-39.81		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 20. Se puede observar que para una succión de -91.78 cm de agua se destacaron los siguientes resultados: el valor más alto obtenido fue para una inclinación de 45 grados dando 13.11, la estabilidad del talud empieza hacer crítica desde los 75 grados de pendiente con un valor de -4.85.

Tabla 21. Factor de seguridad para una succión de -101.97cm de agua en Combia

Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
-101.97	35	10.78	Suelo parcialmente saturado
	40	11.95	
	45	12.27	
	50	11.75	
	55	10.35	
	60	8.05	
	65	4.72	
	70	0.09	
	75	-6.54	
	80	-17.49	
85	-44.62		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 21. Se puede observar que para una succión de -101.97 cm de agua se destacaron los siguientes resultados: el mayor valor obtenido fue para una pendiente de 45 grados dando como resultado 12.27, la estabilidad del talud empieza hacer crítica a partir de los 70 grados de pendiente con un factor de seguridad de 0.09.

Tabla 22. Factor de seguridad para una succión de -112.17cm de agua en Combia.

Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
-112.17	35	9.89	Suelo parcialmente saturado
	40	11.10	
	45	11.44	
	50	10.90	
	55	9.46	
	60	7.08	
	65	3.63	
	70	-1.21	
	75	-8.21	
	80	-19.93	
85	-49.44		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 22. Se puede observar que para una succión de -112.17 cm de agua se destacaron los siguientes resultados: el valor más alto obtenido fue para una inclinación de 45 grados dando como resultado 11.44, la estabilidad del talud empieza hacer crítica desde los 70 grados de pendiente con un valor de -1.21.

Tabla 23. Factor de seguridad para una succión de -122.37 cm de agua en Combia.

Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
-122.37	35	8.99	Suelo parcialmente saturado
	40	10.25	
	45	10.60	
	50	10.05	
	55	8.57	
	60	6.12	
	65	2.54	

	70	-2.51	
	75	-9.89	
	80	-22.38	
	85	-54.26	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 23. Se puede observar que para una succión de -122.37 cm de agua se destacaron los siguientes resultados: el mayor valor obtenido fue para una pendiente de 45 grados dando 10.6, la estabilidad del talud empieza hacer crítica a partir de los 70 grados de pendiente con un factor de seguridad de -2.51.

Tabla 24. Factor de seguridad para una succión de -132.57cm de agua en Combia.

Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
-132.57	35	8.10	Suelo parcialmente saturado
	40	9.40	
	45	9.76	
	50	9.20	
	55	7.68	
	60	5.15	
	65	1.44	
	70	-3.81	
	75	-11.56	
	80	-24.83	
	85	-59.08	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 24. Se puede observar que para una succión de -132.57cm de agua se destacaron los siguientes resultados: el valor más alto obtenido fue para una inclinación de 45 grados dando como resultado 9.76, la estabilidad del talud empieza hacer crítica desde los 70 grados de pendiente con un factor de seguridad de -3.81.

Tabla 25. Factor de seguridad para una succión de -142.76 cm de agua en Combia.

Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
-142.76	35	7.22	Suelo parcialmente saturado
	40	8.55	
	45	8.93	
	50	8.35	
	55	6.80	
	60	4.19	
	65	0.35	
	70	-5.11	
	75	-13.23	
	80	-27.27	
	85	-63.89	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 25. Se puede observar que para una succión de -142.76 cm de agua se destacaron los siguientes resultados: el mayor valor obtenido fue para una pendiente de 45 grados dando un factor de seguridad de 8.93, la estabilidad del talud empieza hacer crítica desde los 65 grados de pendiente con un valor de 0.35.

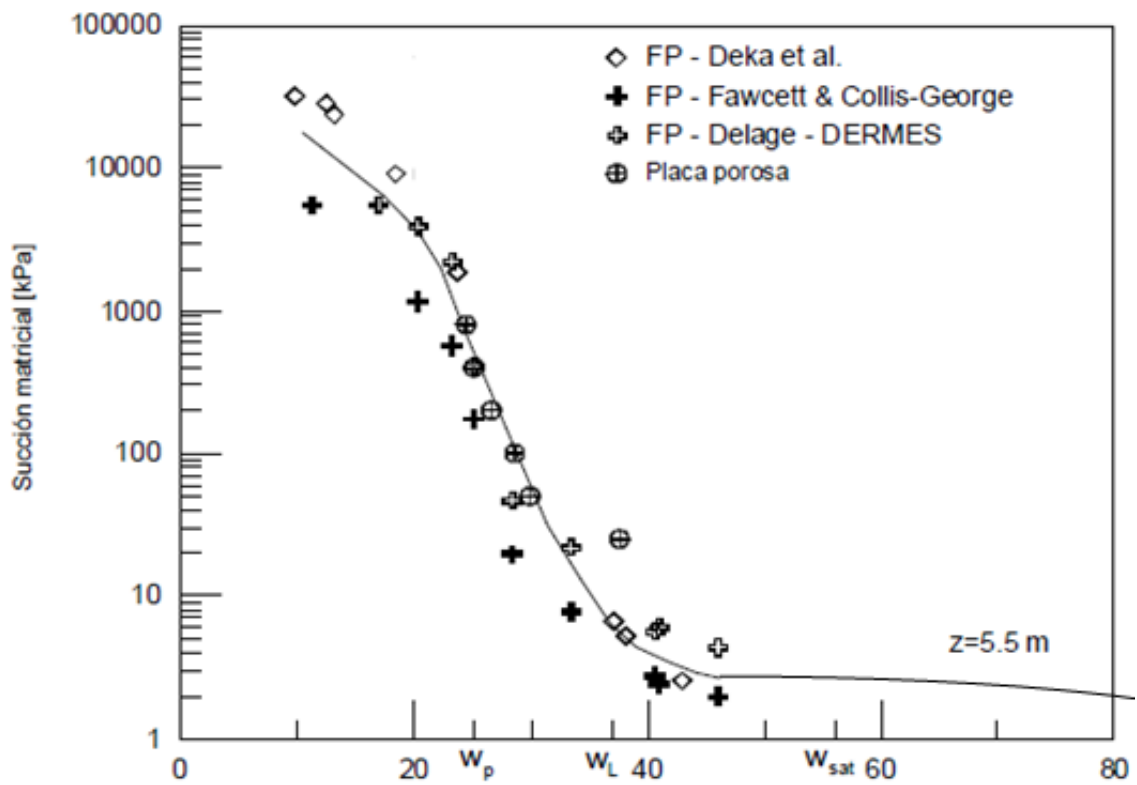


Gráfico 9. Curvas características de retención de agua para suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia
 Fuente: 176 Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol.6(2).

Para obtener los datos de succión del talud de Milan (Dosquebradas) se utilizó la Gráfico 9. Para hallar estos valores en base a los porcentajes de humedad que se obtuvieron en dicho talud.

Tabla 26. Parámetros para el cálculo de factor de seguridad para suelo parcialmente saturado con succión en Milán.

Parámetros	Valor
h= succión matricial al nivel del plano de falla (cm agua)	-17.34
Cap= cohesión aparente al nivel del plano de falla (kPa)	21.57
Y= peso unitario total del suelo arriba del plano de falla (KN/m ³)	12.86
z= profundidad del plano de falla (m)	1
B= inclinación del talud o la ladera (grados)	45
φ= Angulo de fricción efectivo del suelo donde pasa el plano de falla	22
Factor de seguridad	2.67

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 26. Se muestra los parámetros para el cálculo del factor de seguridad para suelos parcialmente saturados, utilizando la fórmula de Taylor (1948), en la cual se hallaron distintos factores de seguridad teniendo como variables la succión y la inclinación del talud, en las siguientes tablas se puede apreciar los resultados obtenidos para el talud de Milán:

Tabla 27. Factor de seguridad para una succión de -28.55 cm de agua en Milan.

Humedad (%)	Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
63.83	-28.55	35	1.82	Suelo parcialmente saturado
		40	1.96	
		45	1.96	
		50	1.82	
		55	1.53	
		60	1.07	
		65	0.42	
		70	-0.49	
		75	-1.80	
		80	-4.03	
		85	-9.71	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 27. se puede observar que para una succión de -28.55 cm de agua y una humedad de 63.83% se destacaron los siguientes resultados: El valor más alto obtenido fue para una inclinación de 45 grados dando un valor de 1.96, la

estabilidad del talud empieza hacer crítica desde los 65 grados de pendiente con un valor de 0.42.

Tabla 28. Factor de seguridad para una succión de -20.39 cm de agua en Milan

Humedad (%)	Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
74.04	-20.39	35	2.37	Suelo parcialmente saturado
		40	2.48	
		45	2.48	
		50	2.34	
		55	2.07	
		60	1.66	
		65	1.09	
		70	0.31	
		75	-0.78	
		80	-2.53	
		85	-6.76	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 28. Se puede observar que para una succión de -20.39 cm de agua y una humedad de 74.04% se destacaron los siguientes resultados: el mayor valor obtenido fue para una pendiente de 45 grados dando como resultado 2.48, la estabilidad del talud empieza hacer crítica desde los 70 grados de pendiente con un factor de seguridad de 0.31.

Tabla 29. Factor de seguridad para una succión de -21.41 cm de agua en Milán

Humedad (%)	Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
72.71	-21.41	35	2.30	Suelo parcialmente saturado
		40	2.42	
		45	2.41	
		50	2.28	
		55	2.00	
		60	1.59	
		65	1.00	
		70	0.21	
		75	-0.91	
		80	-2.71	
		85	-7.13	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 29. Se puede observar que para una succión de -21.41 cm de agua y una humedad de 72.71% se destacaron los siguientes resultados: el valor más alto obtenido fue para una inclinación de 45 grados dando un factor de seguridad de 2.41, la estabilidad del talud empieza hacer crítica desde los 70 grados de pendiente con un valor de 0.21.

Tabla 30. Factor de seguridad para una succión de -17.34 cm de agua en Milán.

Humedad (%)	Succión (cm agua)	Pendiente (grados)	Factor de seguridad	Observación
78.47	-17.34	35	2.57	Suelo parcialmente saturado
		40	2.68	
		45	2.67	
		50	2.54	
		55	2.28	
		60	1.88	
		65	1.34	
		70	0.61	
		75	-0.39	
		80	-1.97	
		85	-5.66	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 30. Se puede observar que para una succión de -17.34 cm de agua y una humedad de 78.47% se destacaron los siguientes resultados: el mayor valor obtenido fue para una pendiente de 45 grados dando como resultado 2.67, la estabilidad del talud empieza hacer crítica desde los 70 grados de pendiente con un factor de seguridad de 0.61.

CONCLUSIONES

Dados los resultados de los puntos de estudio, se puede decir que el promedio de infiltración para el talud de Milán fue del 99% y su escorrentía del 0.1%, mientras que para Combia su infiltración fue del 98% y su escorrentía del 0.2%. Esto quiere decir que estos suelos son muy absorbentes, además de que el terreno donde se encuentran los taludes tienen una pendiente natural muy baja, haciendo que contribuya a la infiltración del agua en los puntos estudiados.

Los valores de infiltración obtenidos in situ, muestran muy poca variación significativa según los puntos de estudio donde se calculo, lo cual evidencia la poca variabilidad, a pesar de que en Milán se contaron con patrones de lluvia mucho mayores que en Combia, lo cual coincide con la conformación de los suelos que son derivados de cenizas volcánicas.

Debido a que los suelos de estudio están compuestos por cenizas volcánicas al exponerse a patrones de lluvia este hace que se sature y disminuya la cohesión entre las partículas de los suelos, haciendo más factible que los taludes se encuentren en un estado crítico, lo cual amenace la estabilidad de estos taludes.

Los suelos de estudio al estar compuesto por cenizas volcánicas presentaron una relación de vacíos altas, con valores de 2.75 para Combia y de 2.59 para Milán, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en las tablas de infiltración y escorrentía, facilitando así el paso del agua en los suelos estudiados.

El suelo de Milán presentó mayor infiltración pese a que el suelo de Combia contaba con una mayor relación de vacíos, pero el terreno tenía un ángulo de inclinación natural mayor que el de Milán, deduciéndose así que esta pendiente más pronunciada evito una mayor infiltración.

Con la saturación del terreno la succión desaparece y se producen cambios volumétricos que pueden llevar al colapso o hinchamiento del suelo. Por lo que se anticipa que suelos más porosos tendrían mayor índice de colapso, esto quiere decir que fuertes patrones de lluvia aumentan la probabilidad de falla en los taludes, este factor es mucho más determinante en los suelos compuestos por cenizas volcánicas debido a los elevados valores de relación de vacíos, esto se puede evidenciar a lo largo de esta investigación, ya que se trabajo con suelos derivados de cenizas volcánicas.

Con base a los resultados del factor de seguridad se puede evidenciar que al aumentar la pendiente del talud este se hace mucho más inestable. También se evidencio que en el punto de estudio de Combia el talud alcanzaba su máxima estabilidad a una pendiente de 45 grados mientras que para Milán su máxima estabilidad rondaba entre los 40 y 45 grados. Después de analizar los factores de seguridad para diferentes succiones y pendientes se puede decir, que tanto para Combia como Milán el talud empezaba a mostrar valores críticos partir de una pendiente de 70 grados lo cual genera inestabilidad.

De manera general puede decirse que la estructura, el estado de esfuerzos y el flujo del agua en este tipo de suelo, cambian cuando éste es expuesto a los ciclos intensos de secado y humedecimiento propios de las condiciones climáticas del trópico. Estos cambios afectan las propiedades físicas y el comportamiento mecánico del suelo, lo cual puede conducir a problemas de inestabilidad de taludes

Es esencial conocer la geometría, factores climáticos y composición del terreno para determinar cómo influye esto en la falla del talud, además de alterar significativamente la resistencia obtenida del suelo. También a medida que ocurre la infiltración por lluvia en el terreno va haciendo el suelo más húmedo o pesado reduciendo los niveles de succión, contribuyendo desfavorablemente a la estabilidad del talud.

Para determinar el factor de seguridad en suelos parcialmente saturados y con succión se recomienda utilizar la ecuación de Taylor (1948), para calcular el factor de seguridad y así determinar la estabilidad de los taludes que están bajo estas condiciones.

Se puede concluir también que la región del eje cafetero en la cual se encuentran este tipo de suelos de cenizas volcánicas está localizado en una zona tropical la cual presenta grandes cambios climáticos y posee un régimen climático bimodal ya que cuenta con 2 periodos de lluvia y otros 2 secos por lo tanto estos suelos van a estar expuestos en estos periodos de precipitación a una gran saturación ocasionando deslizamientos superficiales que son usualmente activados en periodos de intensas lluvias.

La escorrentía influye en los deslizamientos superficiales dependiendo su frecuencia y magnitud por la tanto se concluye que en estos taludes estudiados no se presento una gran escorrentía la cual incluyera arrastre de sedimentos y afectara los taludes ocasionándoles deslizamientos superficiales a pesar de las precipitaciones que se presentaron en el periodo de estudio.

La diferencia de permeabilidad entre los estratos donde se encuentran las cenizas volcánicas y la otra capa de suelo conduce a la formación de un nivel freático colgado que reduce los esfuerzos efectivos incrementando la inestabilidad del suelo.

También se puede concluir que no solo las altas precipitaciones presentadas en el eje cafetero mas específicamente en la ciudad de Pereira y Dosquebradas, son las únicas causantes de deslizamientos también se debe tener en cuenta la actividad sísmica por ello concluimos que un suelo de ceniza volcánica localizado en Risaralda aparte de sufrir precipitaciones altas también es amenazado por la actividad sísmica generadora de esfuerzos desestabilizantes y incremento de la presión de poros causantes de los deslizamientos superficiales.

Se concluye que con respecto a la pregunta de investigación si hay una relación entre la precipitación y la escorrentía en taludes compuestos por suelos derivados de cenizas volcánicas ya que al haber periodos de precipitación más constantes hay mas escorrentía y saturación del talud, dañando el equilibrio del mismo y cambiando sus propiedades mecánicas ya que al estar saturado se pierde la cohesión y por tanto se reduce el esfuerzo efectivo y la resistencia al corte provocando derrumbes y deslizamientos del talud.

BIBLIOGRAFÍA

CARDER. Diagnóstico de riesgos ambientales Municipio de Dosquebradas Risaralda. [En línea] [Citado el: 10 de Octubre de 2015.] www.carder.gov.co/.../diagn-stico-de-riesgos-ambientales-dosquebradas.

CIFUENTS, Leidy D., TORO, Nhora M y ALZATE, Alejandro. 2012. Relacion entre el comportameinto de variabls climaticas y la susceptibilidad de ocurrencia de eventos catrastrificos (Deslizamientos). [En línea] Diciembre de 2012. [Citado el: 25 de Octubre de 2015.] www.unilibrepereira.edu.co/publicaciones/index.php/espiritu/article/.../89.

COROMINAS, Jordi. Sf.. Tipos de roturas en laderas y taludes. [En línea] Sf. [Citado el: 20 de Septiembre de 2015.] <http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/ClasificacionDeslizamientos.pdf>.

ESCOBAR T., Luis J. 2012. Analisis de la estabilidad y probabilidad de falal de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellin - Bogotá en el tramo de vía Marinilla y Santuario . [En línea] Junio de 2012. [Citado el: 18 de Octubre de 2015.] <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31253/43364>.

ESTALRICH, E., y otros. Sf.. Estudio de factores edáficos relacionados con la erosión y escorrentía en taludes de fuerte pendiente; ensayos de revegetación. *Boletín de la Sociedad Española de la ciencia de suelos*. [En línea] Sf. [Citado el: 23 de Octubre de 2015.] <http://www.edafologia.net/revista/tomo2/articulo161.pdf>.

FRANKIE. 2014. Permeabilidad de los suelos: concepto y determinación (“in situ” y en laboratorio). [En línea] 2014. [Citado el: 13 de Agosto de 2015.] www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos.

GAFARO D., Mayra Alejandra. 2015. Escenario de riesgo, a partir de factores de amenaza (deslizamiento) y vulnerabilidad (uso del suelo). [En línea] 2015. [Citado el: 13 de Noviembre de 2015.] [epository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/6262/3/ESCENARIO%20DE%20RIESGO,%20A%20PARTIR%20DE%20FACTORES%20DE%20AMENAZA%20\(DESLIZAMIENTO\)%20Y%20VULNERABILIDAD%20\(USO%20DEL%20SUELO\)%20%200.pdf](http://epository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/6262/3/ESCENARIO%20DE%20RIESGO,%20A%20PARTIR%20DE%20FACTORES%20DE%20AMENAZA%20(DESLIZAMIENTO)%20Y%20VULNERABILIDAD%20(USO%20DEL%20SUELO)%20%200.pdf).

GASPARI, Fernanda J., SENISTERRA, Gabriela E. y MARLATS, Raúl M. 2006. Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. [En línea] 21 de Diciembre de 2006. [Citado el: 29 de Septiembre de 2015.] http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1521/gaspariagrarias39-1.pdf.

GIDAHATARI. Sf. flujo en zona no saturada. [En línea] Sf. [Citado el: 12 de Agosto de 2015.] gidahatari.com/ih-es/flujo-zona-no-saturada.

HERAS, Rafael. 1970. Manual de Hidrología". Centro de Estudios Hidrográficos. [En línea] 1970. [Citado el: 29 de Septiembre de 2015.] ing.unne.edu.ar/pub/infi.pdf.

HERNANDEZ, Alejandro, y otros. 2013. Principales emergencia de COlombia y Hulila. [En línea] 2013. [Citado el: 25 de Octubbre de 2015.] <http://es.slideshare.net/AlejandroHernandez17/principales-emergencias-y-desastres-de-colombia-y-el-huila>.

ICONTEC. 2000. *Norma Tecnica Colombiana NTC 1967. suelos: método de ensayo para determinar las propiedades de consolidación unidimensional de los suelos*. Bogotá : Primera actualizacion, 2000. I.C.S.: 13.080.00.

ICONTEC. 2000. *Norma Tecnica Colombiana NTC 2121. suelos: obtención de muestras con tubos de pared delgada*. Bogotá : Primera actualizacion, 2000. I.C.S.: 13.080.00.

ICONTEC. 2013. *Norma Tecnica Colombiana NTC 1495. suelos: método de ensayo para determinar en el laboratorio el contenido de agua (humedad) de suelos y rocas, con base en la masa*. Bogotá : Segunda actualizacion, 2013. I.C.S.: 13.080.01.

ICONTEC. 1999. *Norma Tecnica Colombiana NTC 4630. suelos: método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos* .Bogotá: Primera actualizacion, 1999. I.C.S.: 13.080.00.

ICONTEC. 1995. *Norma Tecnica Colombiana NTC 78. Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75*

mm en agregados minerales. Bogotá: Segunda actualización, 1995. I.C.S.: 91.100.20.

ICONTEC. 2003. *Norma Técnica Colombiana NTC 1974. Suelos: métodos de ensayo para peso específico de sólidos de suelo con picnómetro de agua. Bogotá: Primera actualización, 2003. I.C.S.: 13.080.00.*

ICONTEC. 2000. *Norma Técnica Colombiana NTC 1917. Suelos: método de ensayo para determinar el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas y drenadas. Bogotá: Primera actualización, 2000. I.C.S.: 13.080.00.*

IDEA - Instituto de Estudios Ambientales. Sf.. La erosión de suelos. [En línea] Sf. [Citado el: 18 de Septiembre de 2015.] http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2007223/lecciones/lect8/lect8_2.html.
Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes.

TSAPARAS, Illias, y otros. 2003. Canada : s.n., 2003, Can. Geotech. J., Vol. 40, págs. 1012-1032. NRC Canada.

JARAMILLO R., Alvaro. 2006. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. *CENICAFE*. [En línea] 2006. [Citado el: 23 de Julio de 2015.] [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc057\(04\)288-298.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc057(04)288-298.pdf).

MURILLO M., Monica M. 2012. Propeusta de educación ambiental para la policia ambiental y ecologica del AMCO. [En línea] 2012. [Citado el: 21 de Octubre de 2015.] <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/33372M977.pdf>.

PÉREZ, Guillermo. Escorrentía superficial. [En línea] [Citado el: 29 de Julio de 2015.] http://www.ciclohidrologico.com/escorrenta_superficial.

ROJAS G. , E. y MORA O., R.S. 2012. Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. [En línea] 2012. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-77432012000100006&script=sci_arttext. ISSN 1405-7743.

ROMANA , M. 1992. El problema de la precisión de la rotura de un talud en función de la pluviometría . [En línea] 1992. [Citado el: 23 de Octubre de 2015.] <http://www.edafologia.net/revista/tomo2/articulo161.pdf>.

SÁEZ, Esteban. Sf. Capítulo 3 . *Fundamentos de geotecnia*. Sf, pág. 28.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE ARQUITECTOS. 2002. *Memorias de la XVIII Bienal Colombiana de Arquitectura*. Bogotá : s.n., 2002.

SUAREZ, Jaime. Lluvias, Presión de Poros y sus Efectos. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.

UNAD. 2012. Lección 6: Investigación Exploratoria, Descriptiva, Correlacional y Explicativa. [En línea] 2012. [Citado el: 15 de Septiembre de 2015.] http://datateca.unad.edu.co/contenidos/100104/100104_EXE/leccin_6_investigacin__exploratoria_descriptiva_correlacional_y_explicativa.htm.

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. Sf. Escorrentía subterránea. [En línea] Sf. [Citado el: 3 de Agosto de 2015.] pendientedemigracion.ucm.es/info/diciex/.../esc_sub_infiltracion.html.

UNIVERSIDAD DE CORUÑA. Sf.. Informe de asignatura. [En línea] Sf. [Citado el: 14 de Julio de 2015.] caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/.../Capitulo%205.pdf.

URP. 2010. Presión de poros. [En línea] 2010. [Citado el: 12 de Septiembre de 2015.] http://cybertesis.urp.edu.pe/urp/2010/cavero_c/pdf/cavero_c-TH.3.pdf.

ANEXOS

Anexo A. Porcentaje contenido de humedad

Tabla 31. Porcentaje contenido de humedad Combia

PORCENTAJE CONTENIDO DE HUMEDAD COMBIA							
Muestra	Profundidad (m)	Peso tara (g)	Peso tara+suelo húmedo (g)	Peso tara+suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	% de humedad
1	1	57,10	110,90	89,64	53,80	32,54	65,33
2		62,10	124,60	102,69	62,50	40,59	53,98

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Porcentaje contenido de humedad Milán

PORCENTAJE CONTENIDO DE HUMEDAD MILÁN							
Muestra	Profundidad (m)	Peso tara (g)	Peso tara+suelo húmedo (g)	Peso tara+suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	% de humedad
1	1	57,10	127,74	98,00	70,64	40,90	72,71
2		62,10	122,60	96,00	60,50	33,90	78,46
3		62,10	117,62	96,00	55,52	33,90	63,77
4		57,20	128,20	98,00	71,00	40,80	74,00

Fuente: Elaboración propia

Anexo B. Pesos unitarios

Tabla 33. Peso unitario Milán

PESOS UNITARIOS MILÁN											
Profundidad (m)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso tara (g)	Peso tara + suelo húmedo (g)	Peso tara + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Contenido de humedad natural	Peso unitario seco (g/cm ³)	Peso unitario húmedo (g/cm ³)
1	52,58	21,70	47,27	37,50	99,60	72,00	62,10	34,50	0,80	0,73	1,31
	52,57	21,75									
	52,37	22,03									
Promedio	52,51	21,83									

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Peso unitario Combia

PESOS UNITARIOS COMBIA											
Profundidad (m)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Volumen (cm ³)	Peso tara (g)	Peso tara + suelo húmedo (g)	Peso tara + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	Contenido de humedad natural	Peso unitario seco (g/cm ³)	Peso unitario húmedo (g/cm ³)
1	47,32	30,02	52,64	37,50	113,10	83,10	75,60	45,60	0,66	0,87	1,44
	46,71	30,04									
	47,81	29,89									
Promedio	47,28	29,98									

Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Lavado por Tamiz 200

Tabla 35. Lavado por tamiz 200

LAVADO POR TAMIZ 200							
Localización	Profundidad (m)	Peso recipiente (g)	Peso recipiente + suelo (g)	Peso recipiente + suelo seco (g)	Peso suelo seco (g)	Porcentaje de arenas (%)	Porcentaje finos (%)
Milán	1	35,00	150,00	61,12	26,12	17,41	82,59
Combia	1	34,40	149,60	51,20	16,80	11,23	88,77

Fuente: Elaboración propia

Anexo D. Límites de Atterberg

Tabla 36. Límites de Atterberg Milán

LÍMITES DE ATTERBERG MILÁN										
Muestra	Profundidad (m)	# de golpes	Peso tara (g)	Peso tara + suelo húmedo (g)	Peso tara + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	% de humedad	Limite líquido (%)	Indice de plasticidad (%)
1	1	20	37,60	52,60	46,90	15,00	9,30	61,29	59,40	15,72
2		22	37,50	53,80	47,70	16,30	10,20	59,80		
3		30	39,00	52,80	47,70	13,80	8,70	58,62		
Muestra	Profundidad (m)	Peso tara (g)	Peso tara + suelo húmedo (g)	Peso tara + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	% de humedad	Limite plástico (%)		
1	1	42,50	47,50	45,97	5,00	3,47	44,09	43,68		
2		38,30	43,30	41,78	5,00	3,48	43,68			
3		38,40	43,40	41,89	5,00	3,49	43,27			

Fuente: Elaboración propia

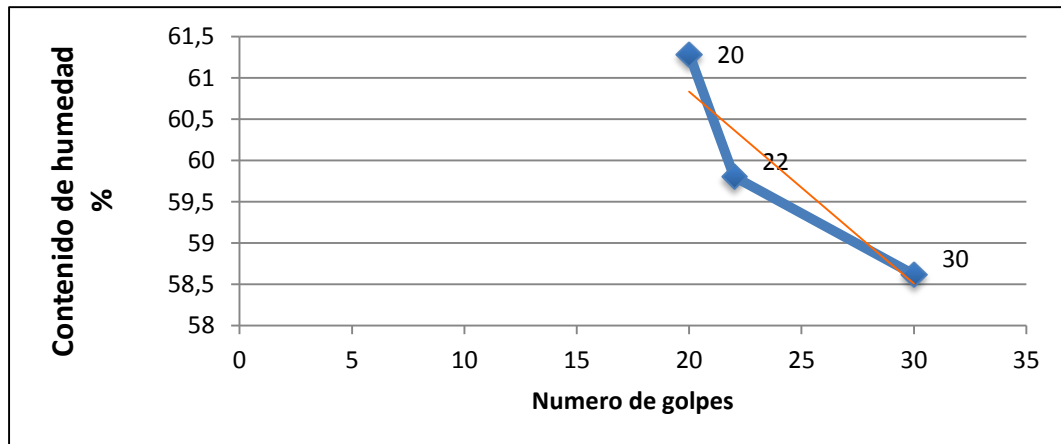


Grafico 10. Limite líquido Milán

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Límites de Atterberg Combia

LÍMITES DE ATTERBERG COMBIA											
Muestra	Profundidad (m)	# de golpes	Peso tara (g)	Peso tara + suelo húmedo (g)	Peso tara + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	% de humedad	Limite liquido (%)	Índice de plasticidad (%)	
1	1	21	39,00	48,00	44,10	9,00	5,10	76,47	74,69	8,57	
2		25	39,30	52,00	46,60	14,50	8,30	74,70			
3		30	38,10	52,60	46,40	12,60	7,30	72,60			
Muestra	Profundidad (m)	Peso tara (g)	Peso tara + suelo húmedo (g)	Peso tara + suelo seco (g)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	% de humedad	Limite plástico (%)			
1	1	37,81	42,81	40,81	5,00	3,00	66,67	66,12			
2		37,97	42,97	41,00	5,00	3,03	65,02				
3		38,20	43,20	41,20	5,00	3,00	66,67				

Fuente: Elaboración propia

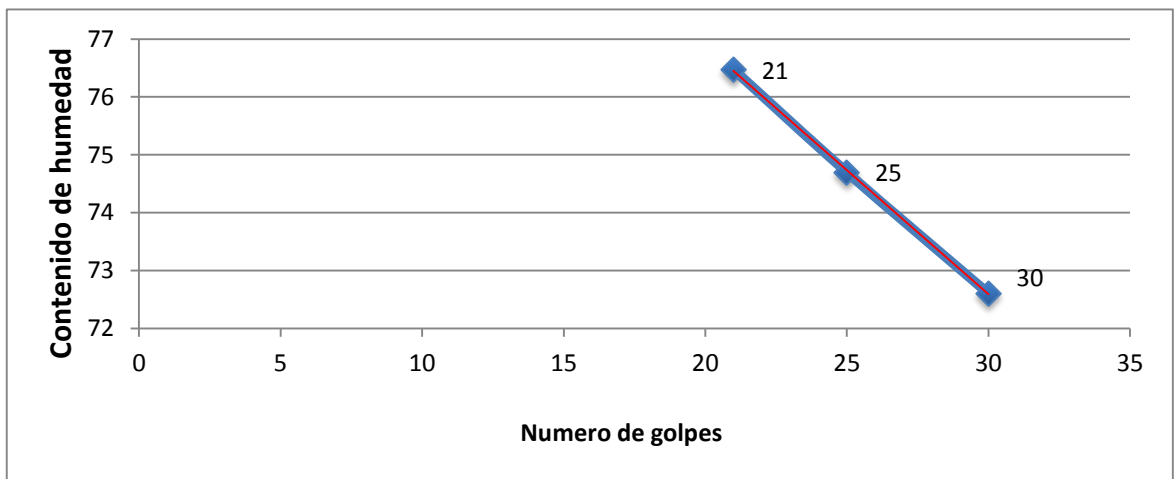


Gráfico 11. Limite Liquido Combia

Fuente: Elaboración propia

Anexo E. Gravedad específica

Tabla 38. Gravedad específica Milán

GRAVEDAD ESPECIFICA MILÁN											
Muestra	Profundidad (m)	Peso picnómetro (g)	Peso picnómetro + agua (g)	Peso picnómetro + agua + suelo (g)	temperatura (°C)	Peso recipiente (g)	Peso recipiente + agua + suelo (g)	Peso recipiente + suelo seco (g)	Peso suelo seco (g)	Factor de corrección	Gravedad específica
1	1	80,30	329,40	354,70	28,00	60,40	337,70	100,16	39,76	0,9980	2,74
2			329,40	356,80		61,00	340,90	109,12	48,12		2,32
3			329,40	355,40		61,00	338,60	102,30	41,30		2,69
Promedio											2,59

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39. Gravedad específica Combia

GRAVEDAD ESPECIFICA COMBIA											
Muestra	Profundidad (m)	Peso picnómetro (g)	Peso picnómetro + agua (g)	Peso picnómetro + agua + suelo (g)	Temp (°C)	Peso recipiente (g)	Peso recipiente + agua + suelo (g)	Peso recipiente + suelo seco (g)	Peso suelo seco (g)	Factor de corrección	Gravedad específica
1	1	81,50	330,00	352,40	28,00	55,40	326,30	100,10	44,70	0,9980	2,00
2			330,00	357,00		61,60	335,50	108,10	46,50		2,38
3			330,00	355,80		60,10	333,60	103,20	43,10		2,49
Promedio											2,29

Fuente: Elaboración propia

Anexo F. Corte directo

Tabla 40. Datos de la muestra ensayo 1 Combia

Datos de la muestra				
Diámetro inicial de la muestra (cm)	5,00	Tara	1	2
Área inicial de la muestra (cm ²)	19,64	Peso suelo húmedo + tara	29,34	29,79
Altura inicial de la muestra (cm)	2,20	Peso suelo seco + tara	27,28	27,37
Volumen de la muestra (cm ³)	43,20	Peso del agua	2,06	2,4
Peso húmedo de la muestra inicial (g)	79,56	7,39	7,43	7,39
Densidad húmeda de la muestra (gr/cc)	1,84	Ws Peso suelo seco	19,85	19,98
Densidad seca de la muestra (gr/cc)	1,66	W húmedo 100 * Ww/Ws	10,4	12,1
Área anillo de corte (cm ²)	19,64	Esfuerzo normal (kg/cm ²)	0,305	
Carga normal (Kg)	6,00	Peso final de la muestra (g)	79,21	
Velocidad de carga (mm/min)	0,509	Tiempo transcurrido ensayo (Min)	0:06:30	

Hora	Lectura dial desplazamiento Horizontal	Desplazamiento Horizontal	Lectura Indicador de carga	Fuerza de corte horizontal	Esfuerzo cortante
Segundos	Milésimas de Pulgadas	Milímetros	Newton	Kilogramos	(Kg/cm ²)
0	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,0000	0,13	16	1,63	0,08
30	0,0000	0,25	32	3,26	0,17
45	0,0000	0,38	51	5,20	0,26
60	0,0000	0,51	78	7,95	0,40
90	0,0000	0,76	110	11,22	0,57
120	0,0000	1,02	148	15,09	0,77
150	0,0000	1,27	191	19,48	0,99
180	0,0000	1,53	229	23,35	1,19
210	0,0000	1,78	259	26,41	1,34
240	0,0000	2,04	278	28,35	1,44
270	0,0000	2,29	273	27,84	1,42
300	0,0000	2,55	257	26,21	1,33
330	0,0000	2,80	241	24,58	1,25

Esfuerzo Vertical (Kg/cm²) 0,31 Esfuerzo Cortante máximo (Kg/cm²) 0,000

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 41. Datos de muestra ensayo 2 Combia

Datos de la muestra				
Diámetro inicial de la muestra (cm)	5,00	Tara	5	8
Área inicial de la muestra (cm ²)	19,64	Peso suelo húmedo + tara	23,38	26,02
Altura inicial de la muestra (cm)	2,20	Peso suelo seco + tara	22,1	24,38
Volumen de la muestra (cm ³)	43,20	Peso del agua	1,28	1,6
Peso húmedo de la muestra inicial (g)	81,20	7,39	7,47	7,37
Densidad húmeda de la muestra (gr/cc)	1,88	Ws Peso suelo seco	14,63	17,01
Densidad seca de la muestra (gr/cc)	1,72	W húmedo 100 * Ww/Ws	8,75	9,64
Área anillo de corte (cm ²)	19,64	Esfuerzo normal (kg/cm ²)	0,611	
Carga normal (Kg)	12,00	Peso final de la muestra (g)	80,74	
Velocidad de carga (mm/min)	0,509	Tiempo transcurrido ensayo (Min)	0:08:30	

Hora	Lectura dial desplazamiento Horizontal	Desplazamiento Horizontal	Lectura Indicador de carga	Fuerza de corte horizontal	Esfuerzo cortante
Segundos	Milésimas de Pulgadas	Milímetros	Newton	Kilogramos	(Kg/cm ²)
0	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,0000	0,13	27,00	2,75	0,14
30	0,0000	0,25	57,00	5,81	0,30
45	0,0000	0,38	84,00	8,57	0,44
60	0,0000	0,51	100,00	10,20	0,52
90	0,0000	0,76	154,00	15,70	0,80
120	0,0000	1,02	206,00	21,01	1,07
150	0,0000	1,27	262,00	26,72	1,36
180	0,0000	1,53	316,00	32,22	1,64
210	0,0000	1,78	359,00	36,61	1,86
240	0,0000	2,04	389,00	39,67	2,02
270	0,0000	2,29	395,00	40,28	2,05
300	0,0000	2,55	380,00	38,75	1,97
330	0,0000	2,80	352,00	35,89	1,83

Esfuerzo Vertical (Kg/cm²) 0,6 Esfuerzo Cortante máximo (Kg/cm²) 2,051
 Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 42. Datos de la muestra ensayo 3 combia

Datos de la muestra				
Diámetro inicial de la muestra (cm)	5,00	Tara	1	2
Área inicial de la muestra (cm ²)	19,64	Peso suelo húmedo + tara	29,13	29,70
Altura inicial de la muestra (cm)	2,19	Peso suelo seco + tara	26,99	27,25
Volumen de la muestra (cm ³)	43,00	Peso del agua	2,14	2,5
Peso húmedo de la muestra inicial (g)	79,95	7,39	7,55	7,54
Densidad húmeda de la muestra (gr/cc)	1,86	Ws Peso suelo seco	19,44	19,71
Densidad seca de la muestra (gr/cc)	1,66	W húmedo 100 * Ww/Ws	11,01	12,43
Área anillo de corte (cm ²)	19,64	Esfuerzo normal (kg/cm ²)	1,222	
Carga normal (Kg)	24,00	Peso final de la muestra (g)	78,53	
Velocidad de carga (mm/min)	0,509	Tiempo transcurrido ensayo (Min)	0:15:00	

Hora	Lectura dial desplazamiento Horizontal	Desplazamiento Horizontal	Lectura Indicador de carga	Fuerza de corte horizontal	Esfuerzo cortante
Segundos	Milésimas de Pulgadas	Milímetros	Newton	Kilogramos	(Kg/cm ²)
0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00
15	0,0050	0,1273	40,00	4,08	0,21
30	0,0100	0,2545	59,00	6,02	0,31
45	0,0150	0,3818	89,00	9,08	0,46
60	0,0200	0,5090	94,00	9,59	0,49
90	0,0301	0,7635	162,00	16,52	0,84
120	0,0401	1,0180	197,00	20,09	1,02
150	0,0501	1,2725	226,00	23,05	1,17
180	0,0601	1,5270	255,00	26,00	1,32
210	0,0701	1,7815	285,00	29,06	1,48
240	0,0802	2,0360	310,00	31,61	1,61
270	0,0902	2,2905	352,00	35,89	1,83
300	0,1002	2,5450	395,00	40,28	2,05
330	0,1102	2,7995	390,00	39,77	2,02

Esfuerzo Vertical (Kg/cm²) 1,2 Esfuerzo Cortante máximo (Kg/cm²) 2,051

Fuente: Elaboración de los autores

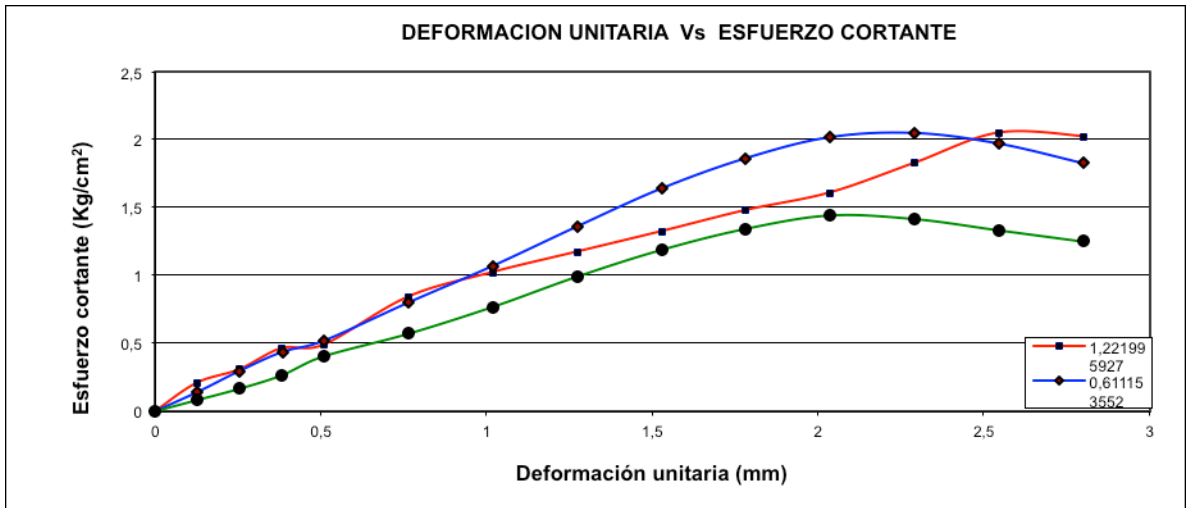


Gráfico 12. Deformación unitaria Vs esfuerzo cortante combia
Fuente: Elaboración propia

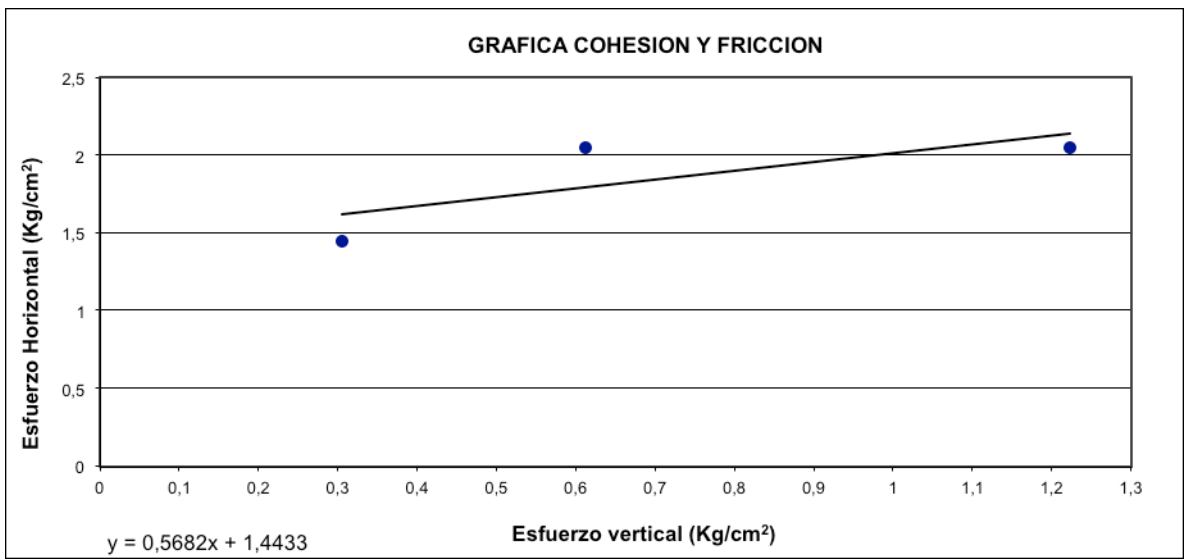


Gráfico 13. Cohesión y fricción combia
Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Datos de la muestra ensayo 1 Dosquebradas

Datos de la muestra				
Diámetro inicial de la muestra (cm)	5,00	Tara	1	2
Área inicial de la muestra (cm ²)	19,64	Peso suelo húmedo + tara	26,51	24,74
Altura inicial de la muestra (cm)	2,20	Peso suelo seco + tara	20,91	19,36
Volumen de la muestra (cm ³)	43,20	Peso del agua	5,6	5,4
Peso húmedo de la muestra inicial (g)	68,89	Peso tara	8,5	7,26
Densidad húmeda de la muestra (gr/cc)	1,59	Ws Peso suelo seco	12,41	12,10
Densidad seca de la muestra (gr/cc)	1,10	W Humedo 100 * Ww/Ws	45,1	44,5
Área anillo de corte (cm ²)	19,64	Esfuerzo normal (kg/cm ²)	0,509	
Carga normal (Kg)	10,00	Peso final de la muestra (g)	68,17	
Velocidad de carga (mm/min)	0,509	Tiempo transcurrido ensayo (Min)	0:08:30	

Hora	Lectura dial desplazamiento Horizontal	Desplazamiento Horizontal	Lectura Indicador de carga	Fuerza de corte horizontal	Esfuerzo cortante
Segundos	Milésimas de Pulgadas	Milímetros	Newton	Kilogramos	(Kg/cm ²)
0	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00
15	0,0050	0,127	14,00	1,43	0,07
30	0,0100	0,255	20,00	2,04	0,10
45	0,0150	0,382	25,00	2,55	0,13
60	0,0200	0,509	31,00	3,16	0,16
90	0,0301	0,764	41,00	4,18	0,21
120	0,0401	1,018	50,00	5,10	0,26
150	0,0501	1,273	58,00	5,91	0,30
180	0,0601	1,527	65,00	6,63	0,34
210	0,0701	1,782	72,00	7,34	0,37
240	0,0802	2,036	77,00	7,85	0,40
270	0,0902	2,291	82,00	8,36	0,43
300	0,1002	2,545	86,00	8,77	0,45
330	0,1102	2,800	90,00	9,18	0,47
360	0,1202	3,054	94,00	9,59	0,49
390	0,1303	3,309	97,00	9,89	0,50
420	0,1403	3,563	98,00	9,99	0,51
450	0,1503	3,818	98,00	9,99	0,51
480	0,1603	4,072	97,00	9,89	0,50
510	0,1703	4,327	96,00	9,79	0,50

Esfuerzo Vertical (Kg/cm²) 0,51 Esfuerzo Cortante máximo (Kg/cm²) 0.000

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 44. Datos de la muestra ensayo 2 Dosquebradas

Datos de la muestra				
Diámetro inicial de la muestra (cm)	5,00	Tara	5	8
Área inicial de la muestra (cm ²)	19,64	Peso suelo humedo + tara	28,92	26,02
Altura inicial de la muestra (cm)	2,20	Peso suelo seco + tara	22,73	20,13
Volumen de la muestra (cm ³)	43,20	Peso del agua	6,19	5,9
Peso húmedo de la muestra inicial (g)	68,00	Peso tara	7,28	7,36
Densidad húmeda de la muestra (gr/cc)	1,57	Ws Peso suelo seco	15,45	12,77
Densidad seca de la muestra (gr/cc)	1,10	W Humedo 100 * Ww/Ws	40,06	46,12
Área anillo de corte (cm ²)	19,64	Esfuerzo normal (kg/cm ²)	1,019	
Carga normal (Kg)	20,00	Peso final de la muestra (g)	67,15	
Velocidad de carga (mm/min)	0,509	Tiempo transcurrido ensayo (Min)	0:09:00	

Hora	Lectura dial desplazamiento Horizontal	Desplazamiento Horizontal	Lectura Indicador de carga	Fuerza de corte horizontal	Esfuerzo cortante
Segundos	Milésimas de Pulgadas	Milímetros	Newton	Kilogramos	(Kg/cm ²)
0	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00
15	0,0050	0,127	19,00	1,94	0,10
30	0,0100	0,255	28,00	2,86	0,15
45	0,0151	0,383	39,00	3,98	0,20
60	0,0200	0,509	48,00	4,89	0,25
90	0,0301	0,764	64,00	6,53	0,33
120	0,0401	1,018	78,00	7,95	0,40
150	0,0501	1,273	89,00	9,08	0,46
180	0,0601	1,527	97,00	9,89	0,50
210	0,0701	1,782	104,00	10,61	0,54
240	0,0802	2,036	110,00	11,22	0,57
270	0,0902	2,291	114,00	11,62	0,59
300	0,1002	2,545	116,00	11,83	0,60
330	0,1102	2,800	119,00	12,13	0,62
360	0,1202	3,054	123,00	12,54	0,64
390	0,1303	3,309	126,00	12,85	0,65
420	0,1403	3,563	128,00	13,05	0,66
450	0,1503	3,818	130,00	13,26	0,67
480	0,1603	4,072	130,00	13,26	0,67
510	0,1703	4,327	129,00	13,15	0,67
540	0,1804	4,581	127,00	12,95	0,66

Esfuerzo Vertical (Kg/cm²) 1,0 Esfuerzo Cortante máximo (Kg/cm²) 0,000

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 45. Datos de la muestra ensayo 3 Dosquebradas

Datos de la muestra				
Diámetro inicial de la muestra (cm)	5,00	Tara	1	2
Área inicial de la muestra (cm ²)	19,64	Peso suelo húmedo + tara	29,82	27,17
Altura inicial de la muestra (cm)	2,19	Peso suelo seco + tara	22,31	20,97
Volumen de la muestra (cm ³)	43,00	Peso del agua	7,51	6,2
Peso húmedo de la muestra inicial (g)	68,04	Peso tara	8,49	7,69
Densidad húmeda de la muestra (gr/cc)	1,58	Ws Peso suelo seco	13,82	13,28
Densidad seca de la muestra (gr/cc)	1,05	W húmedo 100 * Ww / Ws	54,34	46,69
Área anillo de corte (cm ²)	19,64	Esfuerzo normal (kg/cm ²)	2,037	
Carga normal (Kg)	40,00	Peso final de la muestra (g)	66,73	
Velocidad de carga (mm/min)	0,509	Tiempo transcurrido ensayo (Min)	0:08:30	

Hora	Lectura dial desplazamiento Horizontal	Desplazamiento Horizontal	Lectura Indicador de carga	Fuerza de corte horizontal	Esfuerzo cortante
Segundos	Milésimas de Pulgadas	Milímetros	Newton	Kilogramos	(Kg/cm ²)
0	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00
15	0,0050	0,1273	19,00	1,94	0,10
30	0,0100	0,2545	38,00	3,87	0,20
45	0,0150	0,3818	58,00	5,91	0,30
60	0,0200	0,5090	72,00	7,34	0,37
90	0,0301	0,7635	100,00	10,20	0,52
120	0,0401	1,0180	122,00	12,44	0,63
150	0,0501	1,2725	143,00	14,58	0,74
180	0,0601	1,5270	162,00	16,52	0,84
210	0,0701	1,7815	179,00	18,25	0,93
240	0,0802	2,0360	196,00	19,99	1,02
270	0,0902	2,2905	211,00	21,52	1,10
300	0,1002	2,5450	221,00	22,54	1,15
330	0,1102	2,7995	229,00	23,35	1,19
360	0,1202	3,0540	236,00	24,07	1,23
390	0,1303	3,3085	240,00	24,47	1,25
420	0,1403	3,5630	241,00	24,58	1,25
450	0,1503	3,8175	239,00	24,37	1,24
480	0,1603	4,0720	236,00	24,07	1,23
510	0,1703	4,3265	235,00	23,96	1,22

Esfuerzo Vertical (Kg/cm²) 2,0 Esfuerzo Cortante máximo (Kg/cm²) 1,251

Fuente: Elaboración de los autores

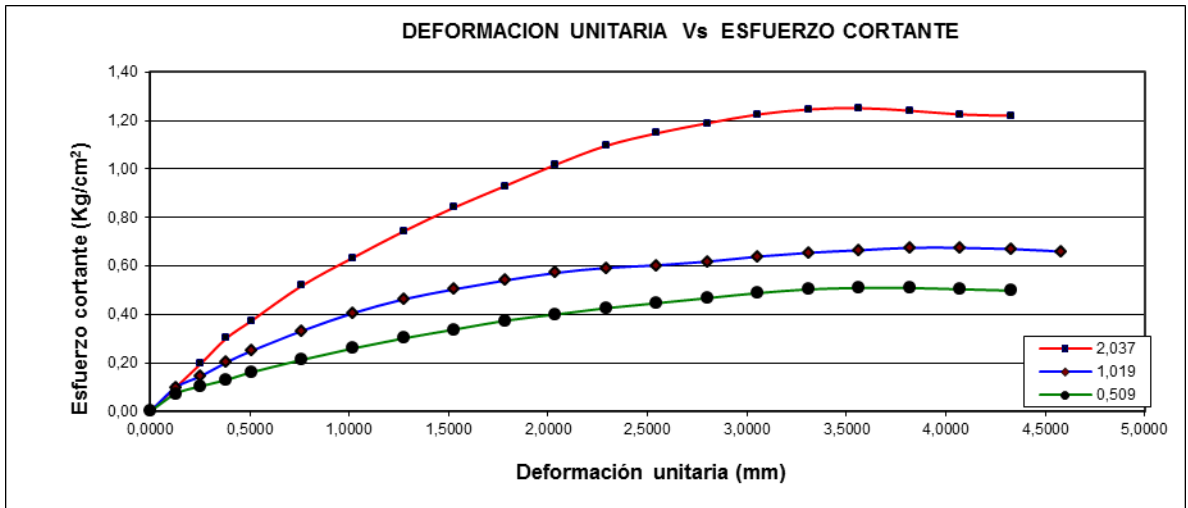


Gráfico 14. Deformación unitaria Vs esfuerzo cortante Dosquebradas
Fuente: Elaboración propia

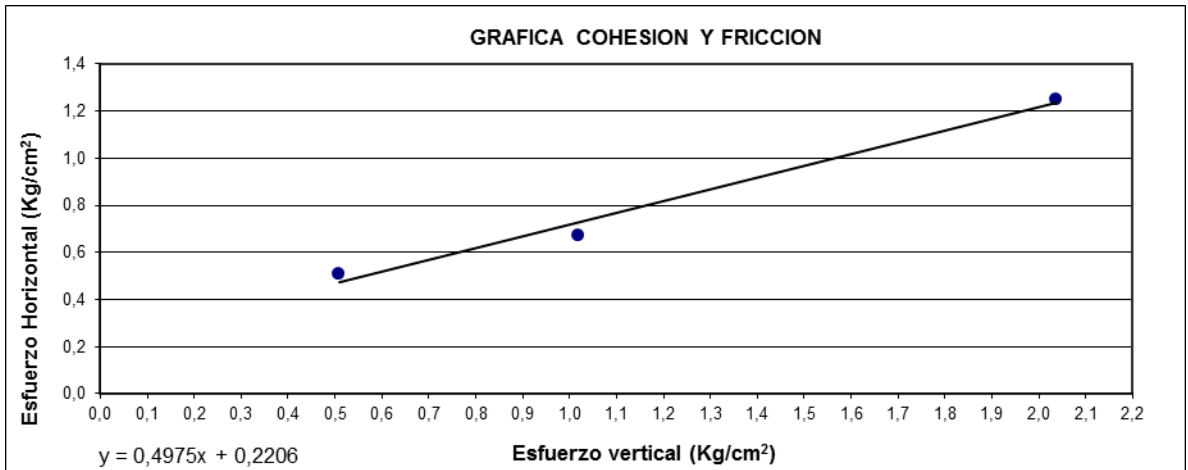


Gráfico 15. Cohesión y fricción Dosquebradas
Fuente: Elaboración propia

Anexo G. Consolidación

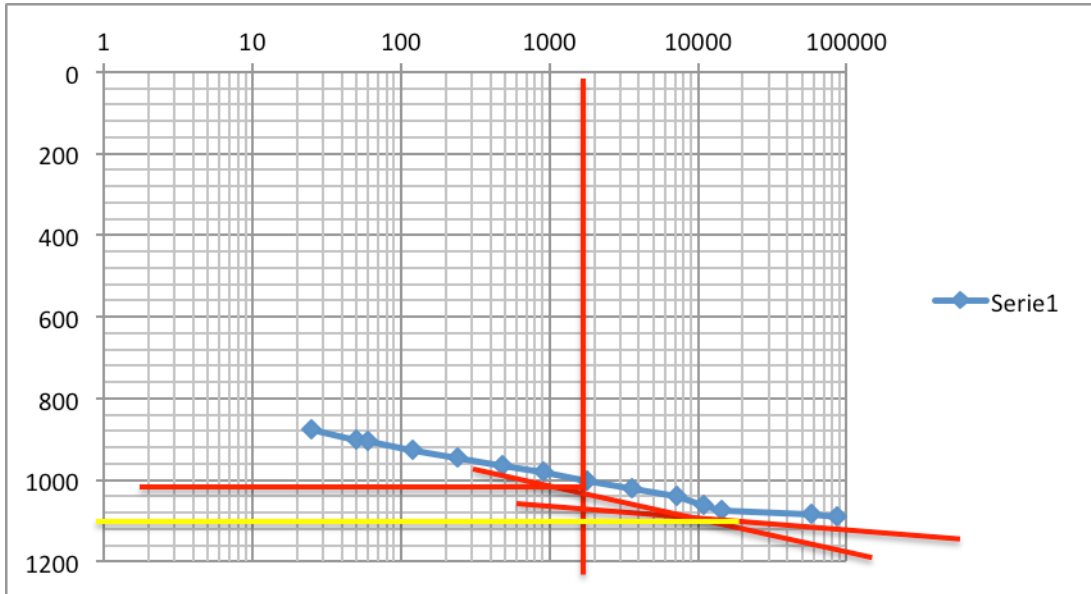


Gráfico 16. Consolidación a 2 Kgrms Combia
Fuente: Elaboración propia

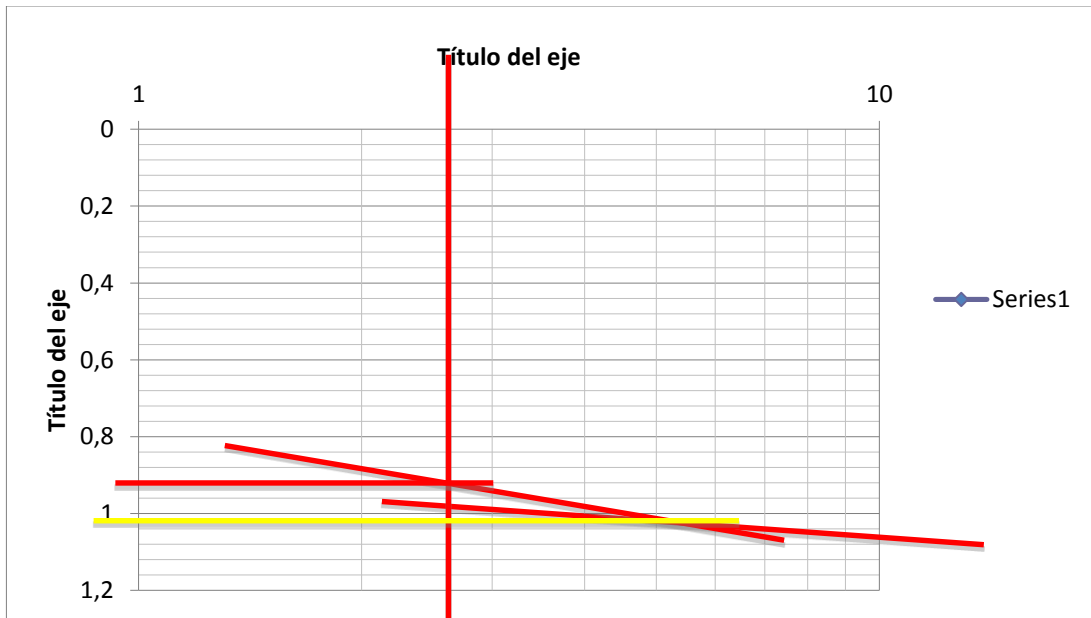


Gráfico 17. Consolidación a 4 Kgrms Combia
Fuente: Elaboración propia

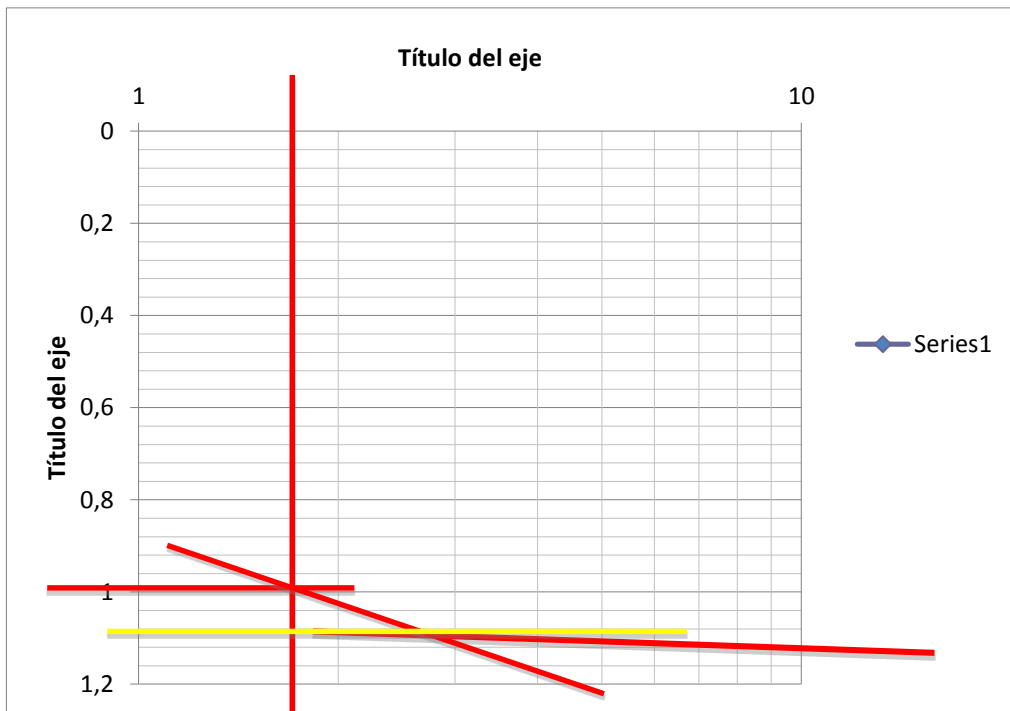


Gráfico 18. Consolidación a 8 Kgrms Combia
Fuente: Elaboración propia



Gráfico 19. Consolidación a 16 Kgrms Combia
Fuente: Elaboración propia

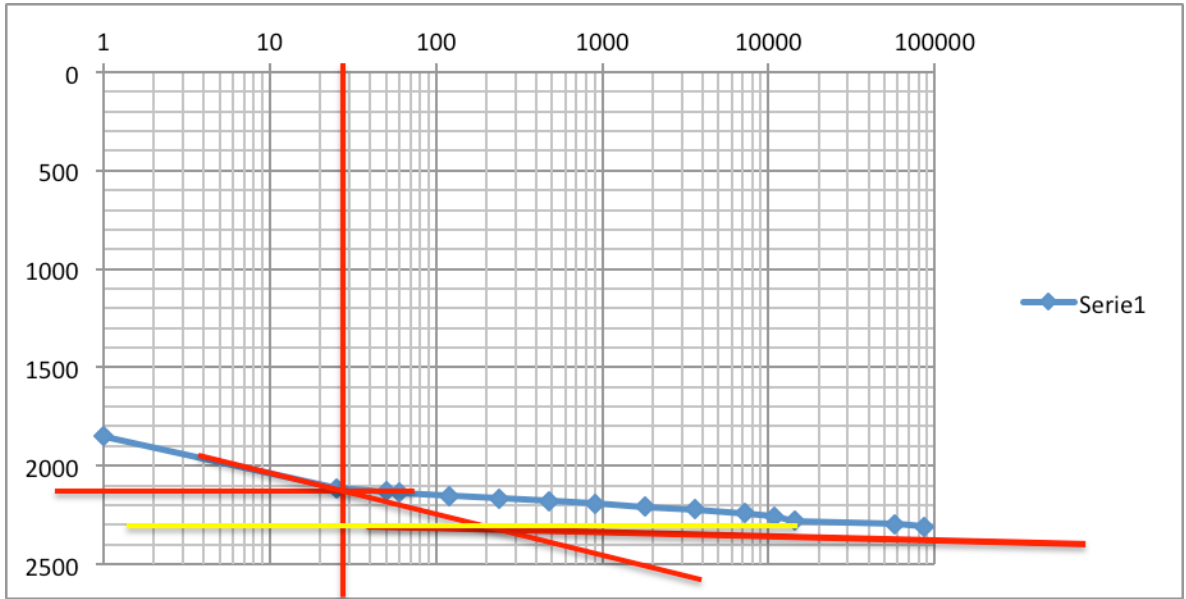


Gráfico 20. Consolidación a 2 Kgrms Milán
Fuente: Elaboración propia

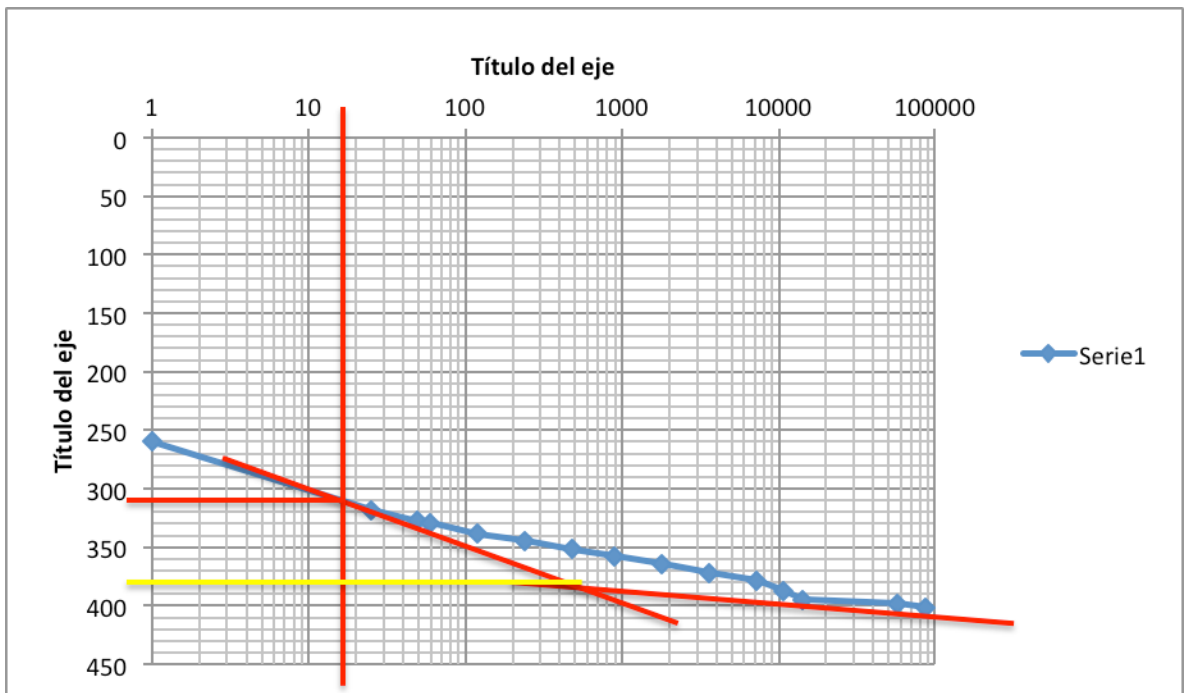


Gráfico 21. Consolidación a 4 Kgrms Milán
Fuente: Elaboración propia



Grafico 22. Consolidación a 8 Kgrms Milán
Fuente: Elaboración propia



Grafico 23. Consolidación a 8 Kgrms Milán
Fuente: Elaboración propia

Anexo H. Registro fotográfico laboratorios

Contenido de humedad



Figura 26. Porcentaje contenido de humedad Milán



Figura 27. Porcentaje contenido de humedad Combia

Pesos unitarios Milán



Figura 28. Pesos unitarios Combia



Figura 29. Limite líquido Milán



Figura 30. Limite plástico Milan



Figura 31. Limite líquido Combia



Figura 32. Limite plástico Combia



Figura 33. Lavado tamiz 200 Milán



Figura 34. Pícnómetro con muestra de suelo para ensayo de gravedad específica Milán



Figura 35. Muestra lista para el horno para ensayo de gravedad específica Milan



Figura 36. Pícnómetro con muestra de suelo para ensayo de gravedad específica Combia



Figura 37. Muestra lista para el horno para ensayo de gravedad específica Combia



Figura 38. Corte directo Milán



Figura 39. Corte directo Combia



Figura 40. Muestra lista para ensayo de consolidación Milán



Figura 41. Muestra lista para ensayo de consolidación Combia