

**CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUELOS
TROPICALES EN UN TALUD DE LA AUTOPISTA MEDELLÍN –
BOGOTÁ EN EL TRAMO DE VÍA ENTRE MARINILLA Y
SANTUARIO**

LUIS JAVIER ESCOBAR TORO

Directora

DSc. YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ

Maestría en Ingeniería Geotécnica

Universidad Nacional de Colombia

Sede Medellín

2011

DEDICATORIA

A mi esposa Liliana, por apoyarme incondicionalmente y darme el empuje y las fuerzas necesarias para terminar este proyecto. A mis padres por estar pendientes de este logro y a la profesora Yamile Valencia por su paciencia y por creer y confiar en mí.

AGRADECIMIENTOS

Posgrado de Ingeniería – Área Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín; pero en especial a la Profesora Yamile Valencia, por su colaboración en todo lo requerido para la realización de esta investigación.

A los Laboratorios: Geotecnia, Carbones, Microscopía avanzada y Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, por los servicios prestados en la realización de los ensayos de la investigación.

A la empresa Cano Jiménez Estudios por el apoyo económico y de tiempo para cursar la Maestría. Al laboratorio de Cano Jiménez Estudios en el proyecto Devimed por los ensayos realizados para el desarrollo de esta investigación.

A Devimed y sus socios por el apoyo y comprensión en la realización de este proyecto.

A todas aquellas personas que en una u otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo.

RESUMEN

Este estudio se orientó a realizar una caracterización y clasificación de los suelos tropicales del km 41+500 y km 49+200 de la autopista Medellín – Bogotá del tramo de vía entre Marinilla y Santuario y evaluar el factor de seguridad y la probabilidad de falla para diferentes inclinaciones, con el fin de determinar el talud de corte más económico y seguro en la ejecución de este tramo de vía.

La metodología desarrollada comprendió la toma de una muestra representativa de cada uno de los suelos residuales del km 41+500 y del km 49+200 de la autopista Medellín – Bogotá del tramo de vía entre Marinilla y Santuario las cuales fueron clasificadas bajo las teorías tradicionales y bajo las teorías para suelos tropicales, y se determinó la medida de sus propiedades índice, su resistencia mecánica, la succión, el colapso y la caracterización química y mineralógica de ambos materiales. Posteriormente, con los resultados de estos ensayos y para diferentes inclinaciones del talud de corte se evalúa el factor de seguridad a través del programa “Slide” y se estima la probabilidad de falla a través del método probabilístico “FOSM”.

Los resultados de los análisis de esta tesis muestra indican que la clasificación MCT expedita da un valor agregado relacionado con la mineralogía que no tiene la clasificación USCS y la clasificación AASHTO, que las muestras analizadas son suelos residuales con potencial de colapso moderado, con una CICE baja, con valores altos del ángulo de fricción y de la cohesión, con presencia de macroporos y una disminución gradual de estos hasta llegar a microporos para la muestra del km 41+500 y un suelo con variación gradual de poros para la muestra del km 49+200 y se pudo determinar que el talud de corte más económico y seguro para ambos casos es el realizado con una inclinación de corte de 1.2:1 (H:V) con terrazas de 5 metros de ancho cada 10 metros de altura, para una humedad del 27% para el talud de corte del km 41+500 y del 27,5% para el talud de corte del km 49+200.

Adicionalmente, se pudo observar que el tener Factores de Seguridad mayores de 1, no garantiza que la probabilidad de ruptura o de falla del talud sea menor del 2%, parámetro máximo aceptado para vías.

ABSTRACT

This work deals to perform a characterization and classification of tropical soils from km 41+500 and km 49+200 of the highway Medellin - Bogota stretch of road between Marinilla and El Santuario and evaluate the safety factor and probability of failure for different inclinations, in order to determine the slope of a more economical and safe in the execution of this stretch of road.

The methodology involved the collection of a representative sample of each of the residual soils of km 41+500 and km 49+200 of the highway Medellin - Bogota stretch of road between Marinilla and El Santuario which were classified under the traditional theories and under the theories for tropical soils, and determined the extent of index properties, mechanical strength, suction, collapse and chemical and mineralogical characterization of both materials. Subsequently, the results of these tests and for different inclinations of the cut slope assesses the safety factor through the "Slide" and the probability of failure estimated through a probabilistic approach "FOSM".

The test results indicate this thesis shows that the classification expedited MCT adds value related to the mineralogical classification is not USCS and AASHTO classification, samples are analyzed residual soils with moderate collapse potential, with an CICE low, with high values of friction angle and cohesion, with the presence of macropores and a gradual decline to reach these micropores for the sample from km 41+500 and a gradual change in soil pores to the sample of km 49+200 and it was determined that the slope of a more economical and safe for both cases is performed with a 1.2:1 cut slope (H: V) with terraces of 5 meters wide, each 10 meters high, for a humidity of 27% for the cut slope from km 41 +500 and 27.5% for the cut slope from km 49 +200.

Additionally, it was observed that having a larger safety factor of 1 does not guarantee that the probability of rupture or failure of the slope is less than 2%, maximum accepted parameter for highway.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las zonas tropicales	17
Figura 2. Esquema del manto de meteorización en zonas tectónicamente inactivas. (Strakhov, 1967, citado por Fookes, 2004).	23
Figura 3. Ciclo de formación de las rocas. (http://www.educarm.es Noviembre 2010) ..	26
Figura 4. Ciclo de formación de las rocas. (http://www.cof.edu Noviembre 2010)	27
Figura 5. Formación rocas Igneas. (http://www.uam.es 2010)	29
Figura 6. Serie de cristalización de Bowen (http://www.uam.es 2010).....	33
Figura 7. Clasificación de las rocas ígneas de acuerdo a la textura y la composición química. (http://www.uam.es 2010)	34
Figura 8. Gráfico de Clasificación MCT (Nogami e Villibor, 1981).....	40
Figura 9. Abaco de clasificación MCT modificado (Vertamatti, 1988)	41
Figura 10. Gráfico de Clasificación MCT por el método de las Pastillas (Nogami et al., 1996)	42
Figura 11. Grafico e vs $\log \sigma_v$ para el ensayo edométrico de colapso.....	47
Figura 12. Longitudes de ondas en difracción de rayos X (Barceinas, 2004)	53
Figura 13. Condiciones geométricas para difracción de rayos-X de acuerdo con la ley de Bragg (Barceinas, 2004)	54
Figura 14. Partes del talud en una vía (Caballero, 2001)	56
Figura 15. Variables para estudio y análisis de taludes (Caballero, 2001)	57
Figura 16. Diagrama de superficie de análisis por el método de dovelas (Gavilanes, 2002)	59
Figura 17. Obtención del Factor de seguridad por el método simplificado de Bishop ...	60
Figura 18. Obtención del Factor de seguridad por el método simplificado de Janbu	61
Figura 19. Distribución de frecuencias del Factor de Seguridad (Assis, 2002)	63
Figura 20. Relación entre β y $P[R]$ para la distribución normal, del Factor de Seguridad (Assis, 2002)	64
Figura 21. Relación entre $P[R]$ y el factor de seguridad para diversos valores de desviación del Factor de Seguridad (Assis, 2002)	65
Figura 22. Mapa localización zona de estudio.....	66
Figura 23. Localización del Batolito Antioqueño (González, 2000)	67

Figura 24. Ubicación de los papeles de filtro sobre los cuerpos de prueba.	82
Figura 25. Granulometría de la Muestra del km 41+500	84
Figura 26. Clasificación USC de la Muestra del km 41+500	86
Figura 27. Carta de plasticidad para la clasificación AASHTO de la Muestra del km 41+500	87
Figura 28. Clasificación AASHTO de la Muestra del km 41+500	88
Figura 29. Clasificación MCT de la Muestra del km 41+500	90
Figura 30. Difracto grama de composición mineral de la muestra del km 41+500	93
Figura 31. Composición de cristales de cuarzo obtenida mediante MEB.....	95
Figura 32. Composición de la caolinita obtenida mediante MEB.....	96
Figura 33. Esfuerzo axial vs. Esfuerzo cortante muestra km 41+500	97
Figura 34. Curvas de compresibilidad de ensayos edométricos normalizadas para el km 41+500	98
Figura 35. Curvas características o de retención de agua del km 41+500.....	99
Figura 36. Gráfico del peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 41+500 para la muestra no saturada método simplificado de Bishop	103
Figura 37. Gráfico del peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 41+500 para la muestra saturada por el método simplificado de Bishop	105
Figura 38. Probabilidad de falla para las muestras natural y saturada del Km 41+500 por el método de Bishop	107
Figura 39. Granulometría de la Muestra del km 49+200	109
Figura 40. Clasificación USC de la Muestra del km 49+200	111
Figura 41. Carta de plasticidad para la clasificación AASHTO de la Muestra del km 49+200	112
Figura 42. Clasificación AASHTO de la Muestra del km 49+200	113
Figura 43. Clasificación MCT de la Muestra del km 49+200	114
Figura 44. Difracto grama de composición mineral de la muestra del km 49+200	117
Figura 45. Composición de cristales de cuarzo obtenida mediante MEB.....	119
Figura 46. Composición de óxidos de hierro y aluminio obtenida mediante MEB.....	120
Figura 47. Esfuerzo axial vs. Esfuerzo cortante muestra km 49+200	121
Figura 48. Curvas de compresibilidad de ensayos edométricos normalizadas para el km 49+200	122
Figura 49. Curvas características o de retención de agua del km 49+200.....	123

Figura 50. Gráfico del peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 49+200 para la muestra no saturada por el método simplificado de Bishop	127
Figura 51. Gráfico del peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 49+200 para la muestra saturada por el método simplificado de Bishop	128
Figura 52. Probabilidad de falla para las muestras no saturada y saturada del Km 49+200 por el método de Bishop	130
Figura 53. Valores de succión para la muestra no saturada (humedad natural 19%), humedad del 27% y último punto registrado de humedad (37%) para la muestra del km 41+500	131
Figura 55. Probabilidad de falla para las muestras no saturada, saturada e intermedia del Km 41+500 por el método de Bishop	134
Figura 56. Valores de succión para la muestra no saturada (humedad natural 24%) y humedad de saturación (31%) para la muestra del km 49+200	136
Figura 57. Probabilidad de falla para las muestras no saturada, saturada y media del Km 49+200 por el método de Bishop	137

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de intercambio catiónico típicas de los minerales de arcilla (Valencia 2005)	35
Tabla 2. Gravedad específica de varios minerales (Fredlund y Rahadjo, 1993)	35
Tabla 3. Grupos de Clasificación MCT	38
Tabla 4. Guía de identificación de suelos tropicales (Godoy & Bernucci, 2002)	43
Tabla 5. Determinación del grupo MCT por clasificación expedita. (Adaptado de Nogami, 1995).....	44
Tabla 6. Clasificación MCT y diversos grupos de suelos integrados (Modificado de Nogami y Villibor, 1995)	45
Tabla 7. Tabla de riesgo de colapso de un suelo de acuerdo a su potencial de colapso (Después de Jennings y Knight, 1975) (Bell, 2000)	48
Tabla 8. Factores de seguridad para taludes de corte (Suarez, 1998).....	58
Tabla 9. Valores típicos de coeficientes de variación (Assis, 2002)	65
Tabla 10. Composición modal de la facies normal del Batolito Antioqueño. (González, 2000)	68
Tabla 11. Composición modal de rocas de las facies félsica y gabroide del Batolito Antioqueño. (González, 2000).....	68
Tabla 12. Composición química de rocas del Batolito Antioqueño. (González, 2000) ...	68
Tabla 13. Información general de las estaciones de incidencia en la zona de estudio. .	70
Tabla 14. Resultados ensayos de laboratorio muestra Marinilla km 41+500	83
Tabla 15. Resultados de los ensayos de granulometría.....	84
Tabla 16. Índices obtenidos de los ensayos MCT expeditos.....	89
Tabla 17. Clasificación MCT y diversos grupos de suelos integrados (Modificado de Nogami y Villibor, 1995) para la muestra del km 41+500.....	91
Tabla 18. Correlación de clasificación para muestra del km 41+500	91
Tabla 19. Resultados otros ensayos de laboratorio muestra Marinilla km 41+500	92
Tabla 20. Proporción de minerales en la muestra del km 41+500	92
Tabla 21. Composición química de la muestra del km 41+500	96
Tabla 22. Parámetro de resistencia al corte del suelo del km 41+500	97
Tabla 23. Valores de resistencia de la muestra del km 41+500 en estado no saturada y en estado saturado.....	100
Tabla 24. Factores de seguridad para la muestra no saturada del km 41+500.....	101

Tabla 25. Factores de seguridad para la muestra saturada del km 41+500.....	102
Tabla 26. Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 41+500 para la muestra no saturada	103
Tabla 27. Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 41+500 para la muestra saturada	104
Tabla 28. Índice de confiabilidad y Probabilidad de falla del talud del km 41+500 para la muestra no saturada	106
Tabla 29. Índice de confiabilidad y Probabilidad de falla del talud del km 41+500 para la muestra saturada	106
Tabla 30. Resultados ensayos de laboratorio muestra Santuario km 49+200	108
Tabla 31. Resultados de los ensayos de granulometría.....	108
Tabla 32. Índices obtenidos de los ensayos MCT expeditos.....	114
Tabla 33. Clasificación MCT y diversos grupos de suelos integrados (Modificado de Nogami y Villibor, 1995) para la muestra del km 49+200.....	115
Tabla 34. Correlación de clasificación para muestra del km 49+200	115
Tabla 35. Resultados otros ensayos de laboratorio muestra Santuario km 49+200	116
Tabla 36. Proporción de minerales en la muestra del km 49+200	117
Tabla 37. Composición química de la muestra del km 49+200.....	120
Tabla 38. Parámetro de resistencia al corte del suelo del km 49+200.....	121
Tabla 39 Valores de resistencia de la muestra del km 49+200 en estado no saturado y en estado saturado.....	124
Tabla 40. Factores de seguridad para la muestra no saturada del km 49+200.....	125
Tabla 41. Factores de seguridad para la muestra saturada del km 49+200.....	125
Tabla 42. Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 49+200 para la muestra no saturada	126
Tabla 43. Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 49+200 para la muestra saturada	128
Tabla 44. Índice de confiabilidad y Probabilidad de falla del talud del km 49+200 para la muestra no saturada	129
Tabla 45. Índice de confiabilidad y Probabilidad de falla del talud del km 49+200 para la muestra saturada	129
Tabla 46. Parámetros de corte directo para la muestra no saturada, saturada e intermedia del km 41+500	132
Tabla 47. Factores de seguridad para la muestra intermedia del km 41+500.....	132
Tabla 48. Peso de cada variable en la composición del factor de seguridad para el talud del km 49+200 para la muestra no saturada	133

Tabla 49. Índice de confiabilidad y Probabilidad de falla del talud del km 41+500 para la muestra Intermedia	134
Tabla 50. Áreas de tierra requerida para cada inclinación de talud del km 41+500 (Marinilla).....	135
Tabla 51. Áreas de tierra requerida para cada inclinación de talud del km 49+200 (Santuario).....	137

INDICE DE FOTOS

Foto 1. Equipo para difracción de rayos X.	55
Foto 2. Muestreo inalterado con retroexcavadora. (Febrero de 2010)	71
Foto 3. Muestreo inalterado manual.. (Febrero de 2010)	72
Foto 4. Muestreo por medio de taladro <i>pety</i> . (Agosto de 2010)	72
Foto 5. Perfil suelo residual km 41+500 Marinilla	73
Foto 6. Perfil suelo residual km 49+200 Santuario	73
Foto 7. Proceso de cuarteo del material.....	74
Foto 8. Ensayo de Límites de consistencia.	75
Foto 9. Secado de material para granulometría.	76
Foto 10. Lavado y tamizado para gradación de muestras.....	76
Foto 11. Granulómetro Láser del laboratorio de Geotecnia UnB.....	77
Foto 12. Ensayo de peso unitario del suelo.....	77
Foto 13. Ensayo de compactación Proctor.....	78
Foto 14. Ensayo de CBR.....	78
Foto 15. Ensayo MCT rápido.....	79
Foto 16. Equipo de metalización para la lámina delgada.	80
Foto 17. Microscopio de barrido (SEM) JSM-5910 LV	81
Foto 18. Etapas de pesado y secado de los papeles filtro en el laboratorio de carbones de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín	82
Foto 19. Imagen de cristales de cuarzo obtenida mediante MEB zoom: x100.....	94
Foto 20. Imagen de caolinitas obtenidas mediante MEB zoom: x1500	95
Foto 21. Imagen de cristales de cuarzo obtenida mediante MEB zoom: x160.....	118
Foto 22. Imagen de óxidos de hierro y aluminio obtenidas mediante MEB zoom: x500	119

TABLA DE CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.1. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES.....	18
2. OBJETIVOS.....	20
2.1. OBJETIVO GENERAL	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2.3. ALCANCES DEL TRABAJO	20
3. INTRODUCCIÓN.....	21
4. MARCO TEÓRICO	22
4.1. Formación del suelo.....	22
4.2. Meteorización.....	23
4.2.1 Meteorización física.	23
4.2.2 Meteorización química.	25
4.3. Factores de formación de los suelos.....	26
4.3.1. Rocas Ígneas.....	28
4.4. Mineralogía de los suelos.....	31
4.4.1 Clasificación y nomenclatura de las rocas ígneas (composición mineralógica)	32
4.4.2 Clasificación de las rocas ígneas en función de la textura y composición química	33
4.4.3. Mineralogía de los suelos tropicales.....	34
4.5. Métodos de clasificación de los suelos	36
4.5.1 Clasificación del suelo MCT.....	37
4.5.2 Correlación entre el sistema MCT y el AASHTO y el USCS.....	45
4.6. Ensayos de caracterización – Propiedades elementales de los suelos	45
4.6.1 Suelos colapsables	46
4.6.2 Determinación del Potencial de Colapso	46
4.6.3 Las fuerzas superficiales y la succión.....	48

4.6.4	Caracterización química	50
4.6.5	Caracterización mineralógica - Difracción de rayos-X	52
4.6.6	Caracterización estructural - Microscopio electrónico de barrido (MEB).....	55
4.7.	Estabilidad de taludes en vías terrestres.....	56
4.7.1	Selección del Factor de Seguridad	57
4.7.2	Métodos de análisis para estabilidad de taludes	58
4.7.3	Método probabilístico FOSM	62
4.7.4	Método de índice de confianza	62
5.	ZONA DE ESTUDIO	66
6.	METODOLOGÍA UTILIZADA.....	71
6.1.	TOMA DE MUESTRAS	71
6.2.	ENSAYOS	74
6.2.1.	Caracterización Física	74
6.2.2.	Clasificación de suelos	78
6.2.3.	Caracterización química	79
6.2.4.	Caracterización mineralógica.....	79
6.2.4.	Caracterización mecánica.....	81
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	83
7.1.	MUESTRA DEL KM 41+500 (MARINILLA)	83
7.1.1.	Caracterización Física	83
7.1.2.	Granulometría por tamizado mecánico, sedimentación y granulometría laser	84
7.1.3.	Clasificación.....	85
7.1.4.	Otros ensayos de caracterización.....	91
7.1.5	Caracterización mineralógica.....	92
7.1.6	Caracterización química.	96
7.1.7	Caracterización mecánica.....	97
7.1.8	Diseño de inclinación del talud de corte y factor de seguridad	100
7.1.9	Método probabilístico FOSM e índice de confianza.....	102
7.2.	MUESTRA DEL KM 49+200 (SANTUARIO)	107
7.2.1.	Caracterización Física	108
7.2.2.	Granulometría por tamizado mecánico, sedimentación y granulometría laser	108

7.2.3. Clasificación.....	109
7.2.4. Otros ensayos de caracterización.....	115
7.2.5 Caracterización mineralógica.....	116
7.2.6 Caracterización química.	120
7.2.7 Caracterización mecánica.....	121
7.2.8 Diseño de inclinación del talud de corte y factor de seguridad	124
7.2.9 Método probabilístico FOSM e índice de confianza.....	126
7.3. ANÁLISIS DE ALTERNATIVA PARA LA MUESTRA DEL KM 41+500 (MARINILLA).....	131
7.4. ANÁLISIS DE ALTERNATIVA PARA LA MUESTRA DEL KM 42+900 (SANTUARIO).....	135
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	138
9. BIBLIOGRAFÍA.....	142

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1.

ENSAYOS MUESTRA MARINILLA KM 41+500

ENSAYOS MUESTRA SANTUARIO KM 49+200

ANEXO 2.

CERTIFICADOS DE CALIBRACION EQUIPOS CANO JIMENEZ

ANEXO 3.

MARCO TEORÍCO

ANEXO 4.

CÁLCULOS FACTORES DE SEGURIDAD MUESTRA KM 41+500 MARINILLA

CÁLCULOS FACTORES DE SEGURIDAD MUESTRA KM 49+200 SANTUARIO

ANEXO 5.

CÁLCULOS FOSM

ANEXO 6.

VALIDACIÓN COEFICIENTES DE VARIACIÓN DEFINITIVO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con Jaime Suarez (Mayo 2010): “La definición de “suelo residual” varía de un país a otro, pero una definición razonable podría ser la de un suelo derivado por la meteorización y descomposición de la roca *in situ*, el cual no ha sido transportado de su localización original (Blight, 1997). Los términos residual y tropical se usan indistintamente...”.

Colombia está ubicada en una región tropical, es decir dentro de los paralelos 30°N y 30°S de latitud (ver Figura 1); por tal motivo presenta suelos comúnmente denominados como suelos tropicales, suelos con propiedades ingenieriles diferentes de aquellas de los suelos de regiones templadas. En un perfil de suelo tropical son normalmente distinguidos dos tipos de suelos, el suelo saprolítico que corresponde a la capa más profunda del perfil en la cual se mantiene la estructura parental de la roca madre y el suelo laterítico, rico en minerales de arcilla y sesquióxidos (óxidos de hierro y aluminio) (Valencia, 2009).

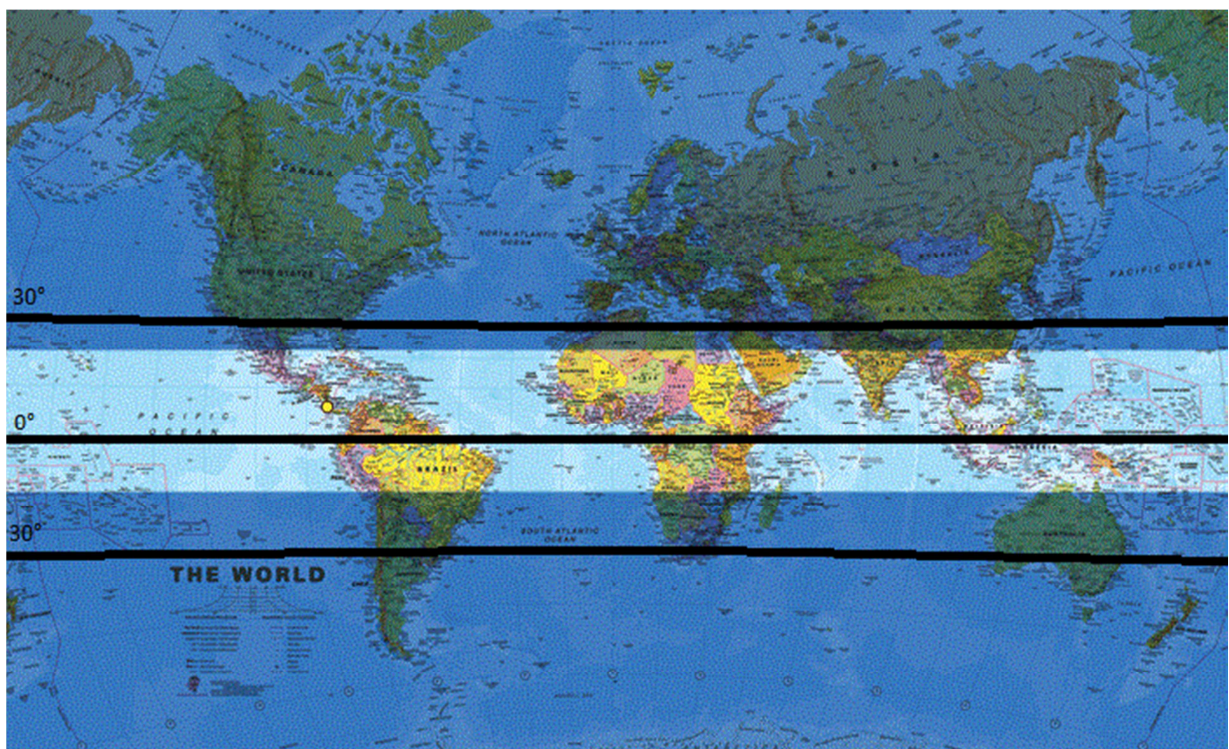


Figura 1. Localización de las zonas tropicales

A pesar de Colombia encontrarse en una región tropical sus suelos se vienen clasificando y analizando bajo la mecánica de suelos tradicional, la cual fue desarrollada para suelos de otras latitudes; siendo que, los suelos tropicales por tener características peculiares, diferentes a los suelos de otras regiones, merecen de un estudio más detallado.

Con este panorama, surgen las siguientes preguntas:

¿Se debe continuar analizando, clasificando y desarrollando teorías a partir de la mecánica de suelos tradicional o se deben empezar a aplicar las clasificaciones y análisis realizados por países de latitudes cercanas a la de Colombia?

¿Se necesitará desarrollar una teoría propia para Colombia en caso de que las teorías desarrolladas por otros países no tengan una completa aplicabilidad en el medio?

¿El análisis y clasificación de los suelos de estudio estará completamente en la teoría de los suelos tradicionales o se deberá analizar en la teoría de suelos tropicales?

1.1. JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

Una revisión de la bibliografía sobre las investigaciones y tesis en la región, muestran que son pocos los estudios profundos de clasificación y caracterización de estos suelos. Las tesis más representativas y que más se acercan son a saber:

- VALENCIA, Y. (2005). Influencia de la meteorización en las propiedades y comportamiento de dos perfiles de alteración originados de rocas metamórficas. Tesis de maestría.
- ECHEVERRI, O. (2005). Efecto de la microestructura en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de algunos suelos provenientes de rocas ígneas presentes en Medellín. Tesis de maestría.
- MEZA, V. E. (2005). Influencia de la succión matricial en el comportamiento deformacional de dos suelos expansivos. Tesis de maestría.
- QUICENO, J. C. (2001). Manual de procedimientos y etapas de investigación en un estudio de geotecnia vial. Tesis de maestría.
- ARBOLEDA, J. G. (1992). Perfiles de meteorización y caracterización de los suelos de la vía alto de Las Palmas-Aeropuerto José María Córdova. Tesis de grado

En estos trabajos se puede apreciar que, apenas se comienza a incorporar la teoría de suelos tropicales en los mismos, y no se ha realizado un estudio a fondo que permita correlacionar las clasificaciones tradicionales de suelos, con las nuevas tecnologías y clasificaciones que viene implementando países como Brasil.

Adicionalmente, y con el fin de enfocar racionalmente el diseño de las obras en las que interviene el empleo de suelos tropicales, ya sea en cortes o en terraplenes, es necesario continuar con la sistematización de la información disponible sobre ellos, para poder predecir con suficiente aproximación su comportamiento.

Aprovechando que en el sector del oriente antioqueño se vienen adelantando los diseños para la construcción de la doble calzada entre los municipios de Marinilla y El Santuario, se escogieron los taludes de los km 41+500 y km 49+200 de este sector para realizar la caracterización física, química y mecánica, y evaluar su estabilidad para diferentes inclinaciones de corte.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar parámetros que permitan realizar un diseño de talud de corte más económico y seguro en la ejecución del tramo de vía entre Marinilla y Santuario de la Autopista Medellín - Bogotá, y correlacionar las clasificaciones tradicionales de suelos, con las nuevas tecnologías y clasificaciones para suelos tropicales.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Clasificar los suelos tropicales del km 41+500 y km 49+200 de la autopista Medellín – Bogotá del tramo de vía entre Marinilla y Santuario, bajo las teorías tradicionales en el medio y bajo teorías para suelos tropicales.
- Determinar la mineralogía, la química, la succión, la resistencia y el colapso de los suelos tropicales del km 41+500 y km 49+200 de la autopista Medellín – Bogotá del tramo de vía entre Marinilla y Santuario.
- Evaluar el factor de seguridad para diferentes inclinaciones del talud de corte a través de un programa reconocido en el medio.
- Estimar la probabilidad de falla para diferentes inclinaciones del talud de corte a través de un método probabilístico.

2.3. ALCANCES DEL TRABAJO

- Comparar las clasificaciones realizadas al sitio seleccionado bajo las teorías tradicionales en el medio y bajo las teorías para suelos tropicales.
- Caracterizar los materiales a partir de parámetros como mineralogía, química, succión, resistencia y colapso.
- Establecer el factor de seguridad para diferentes inclinaciones del talud de corte utilizando el programa “Slide” (Versión 5.025 de 2006) y a partir del método probabilístico FOSM determinar la probabilidad de ruptura y el índice de confiabilidad.

3. INTRODUCCIÓN

Con el fin de encontrar solución a problemas geotécnicos, se vienen adelantando estudios e investigaciones acerca de las propiedades de los suelos tropicales en los últimos años en el país y a nivel mundial.

Estos estudios han permitido caracterizar de una mejor manera los suelos en regiones tropicales, como una alternativa a la teoría clásica de caracterización y evaluación de suelos, generada en otras latitudes. Dentro de este campo se pueden destacar los trabajos adelantados por la Oficina de Control Geotécnico de Hong Kong, los estudios del profesor G.W. Fredlund en el tema de los suelos no saturados y los trabajos adelantados en Brasil por distintos investigadores, por mencionar algunos.

Caracterizar los materiales de las zonas a intervenir con ensayos propios de suelos tropicales permite tener otra visión a la tradicionalmente usada hasta la fecha, llegando a valores más reales que podrían generar diseños más acertados, más económicos y ambientalmente menos agresivos.

En el presente trabajo se analizará a fondo dos muestras de material procedentes de los taludes del km 41+500 y km 49+200 de la autopista Medellín – Bogotá del tramo de vía entre Marinilla y Santuario, los cuales serán intervenidos próximamente con la construcción de la doble calzada entre los municipios de Marinilla y Santuario.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Formación del suelo

La *Soil Science Society of America* (1984), denomina suelo al “material mineral no consolidado en la superficie de la tierra que difiere del material del cual se derivó en varias propiedades y características físicas, químicas, biológicas y morfológicas y que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales tales como: material parental, clima, macro y microorganismos y topografía, todos actuando durante un lapso de tiempo”.

Las condiciones climáticas de las diferentes regiones influyen directamente en la formación de los suelos residuales tropicales. En las regiones que alternan períodos secos y de lluvias los procesos de meteorización química se acentúan. La infiltración de agua ayuda a los procesos de lixiviación. Además el transporte vertical de materiales en solución y su deposición en el interior de los suelos dan origen a secuencias de mantos de suelo de diferentes composiciones y texturas que conforman el perfil estratigráfico. Los mantos superficiales están sujetos a los mecanismos de erosión, además de la acción de factores como el clima, material parental, vegetación, topografía, drenaje y tiempo. Todos estos, anudados a la acción de raíces, animales, el hombre y a fluctuaciones de temperatura y los continuos ciclos de humedecimiento y secado, generan agrietamientos que favorecen el avance y la velocidad de la meteorización. (Echeverri, 2005)

La rama de la ciencia que se encarga del estudio de los procesos y factores que le han dado las características y propiedades al suelo se conoce como Pedogénesis o Génesis de los suelos; en ella también se trata de establecer el origen del suelo y los posibles cambios que puede presentar, si varían las condiciones bajo las cuales ha evolucionado (Jaramillo, 2002).

A nivel global se pueden agrupar los procesos de acuerdo con el efecto que producen en el suelo, así: adiciones o aportes al suelo, es decir, las entradas que tiene el mismo; transformaciones, que son los procesos que implican cambios en las formas originales de cualquiera de los componentes del suelo; translocaciones, que son todos los movimientos de materiales que se producen dentro del suelo, siempre y cuando no se desplacen fuera del mismo, y pérdidas que consisten en la extracción o remoción definitiva de cualquier componente del suelo. (Jaramillo, 2002)

4.2. Meteorización

La meteorización es el proceso de desintegración física (meteorización física) y de descomposición química (meteorización química) de las rocas y sus minerales constitutivos para adaptarse o equilibrarse a las condiciones ambientales de humedad, temperatura y presión. (Echeverri, 2005)

La influencia del clima (régimen de precipitación y variaciones de temperatura) en la formación de los suelos y la intensidad de la meteorización se ilustran en el diagrama propuesto por Strakhov (1967) y que se presenta en la Figura 2.

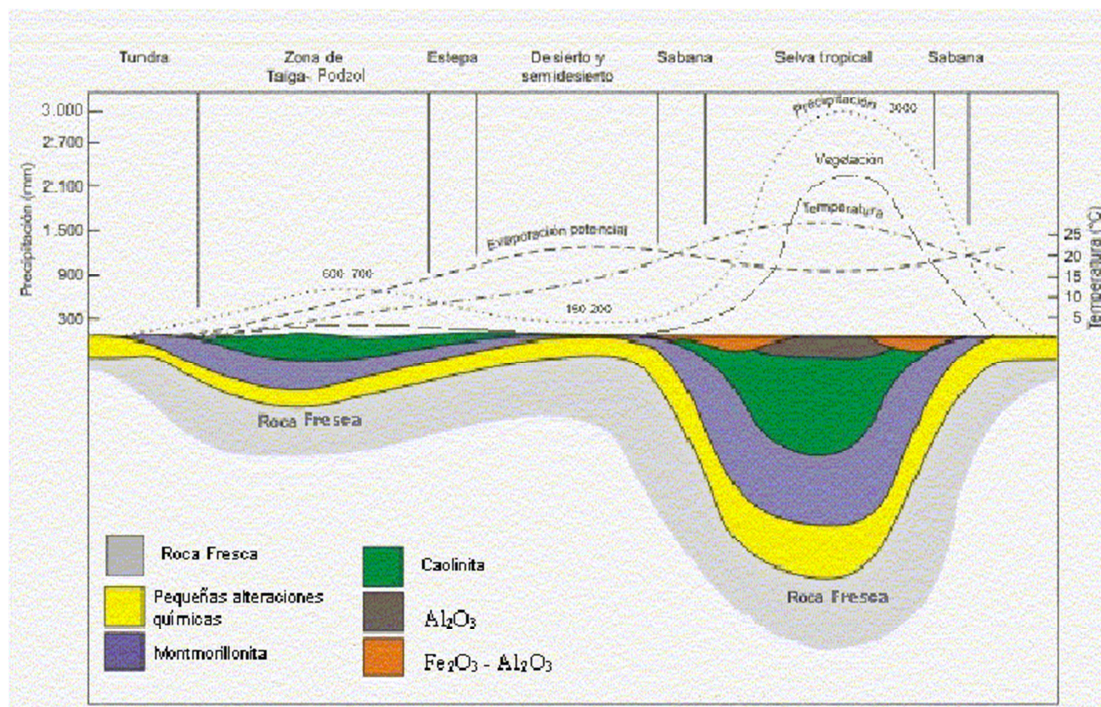


Figura 2. Esquema del manto de meteorización en zonas tectónicamente inactivas. (Strakhov, 1967, citado por Fookes, 2004).

4.2.1 Meteorización física.

La meteorización física es causada por procesos físicos, y se desarrolla fundamentalmente en ambientes desérticos y periglaciares. Los climas desérticos tienen amplia diferencia térmica entre el día y la noche y la ausencia de vegetación permite que los rayos solares incidan directamente sobre las rocas, mientras en los ambientes periglaciares las temperaturas varían por

encima y por debajo del punto de fusión del hielo, con una periodicidad diaria o estacional. (Duque, 2003)

De acuerdo con Jaime Suarez (Mayo 2010), algunas causas para la intemperización o meteorización física son:

Variación de la temperatura. La influencia de la temperatura se da por la existencia de minerales con diferentes coeficientes de dilatación térmica, lo que proporciona desplazamiento relativo entre los cristales (Valencia, 2009).

Acción de plantas y animales. Acción de las raíces de los árboles al expandirse provocan presión en el interior de la roca.

Expansiones de humedad, que además de favorecer las reacciones químicas y el transporte de elementos actúa en los mecanismos de expansión y retracción.

Alivio de presión. Se presenta cuando la parte más profunda de los cuerpos rocosos ascienden a niveles cruciales dando origen a la expansión y la abertura de fracturas conocidas como juntas de alivio.

Congelación. Cuando los cambios de temperatura son tales que hay hielo y deshielo alternativamente, pueden ser eficaces los efectos desintegradores debidos a la fuerza de dilatación del agua confinada en la roca. La absorción de la mayor parte de las rocas ígneas es tan lenta, que este proceso suele producir más frecuentemente una desintegración en bloque, que una desintegración granular.

Desgaste, impacto y trituración. Las rocas pueden romperse también mecánicamente por diversos procesos, en los que interviene el movimiento, especialmente de una masa de roca sobre otra o contra otra.

Exfoliación esferoidal. Es el proceso de intemperismo mecánico en el que por acción de las fuerzas físicas internas, se separan de una roca grandes fragmentos curvados a manera de costras, dando lugar a la formación de colinas abovedadas llamados también domos de exfoliación y otras estructuras menores como peñascos redondeados y bloques intemperizados.

Mezclado mecánico. Es el que realizan las hormigas, roedores y gusanos sobre todo de la clase platelmintos, removiendo materiales que sacan a la superficie y como su actividad es constante hacen con que las partículas removidas sean más susceptibles de sufrir intemperismo.

Agentes físicos. Entre estos se pueden citar al agua que corre por la superficie del hielo de un glaciar o por el curso de un río de montaña, al viento y las olas del océano, que también pueden contribuir a la reducción del material rocoso a fragmentos cada vez menores.

Las condiciones que favorecen a la intemperización mecánica son los grandes cambios de temperatura, la aridez y las pendientes fuertes. Los grandes cambios de temperatura se registran en las latitudes más altas y en las zonas desérticas.

Estos procesos dan origen a los suelos de grano grueso generalmente dependiendo del tipo de roca.

4.2.2 Meteorización química.

La meteorización química causa la disgregación de las rocas y se da cuando los minerales reaccionan con algunas sustancias presentes en sus inmediaciones, principalmente disueltas en agua, para dar otros minerales de distintas composiciones químicas y más estables a las condiciones del exterior. En general los minerales son más susceptibles a esta meteorización cuando más débiles son sus enlaces y más lejanas sus condiciones de formación a las del ambiente en la superficie de la Tierra. (Duque, 2003)

De acuerdo con Jaime Suarez (Mayo 2010), los principales procesos de meteorización química son los siguientes:

Oxidación. Implica la adición de iones de oxígeno, como ocurre en las rocas que contienen hierro (Fe), manifestándose como cambios de coloración y a veces hasta de consistencia.

Hidratación. Consiste en la adición o absorción de agua a los minerales, pero dentro de su propia estructura atómica o molecular.

Carbonatación. Es la disolución de algunos materiales por medio de aguas con elevado contenido de CO₂, (el potasio, el calcio, el sodio y el magnesio, suelen unirse con el anhídrido carbónico y el oxígeno para formar carbonatos).

Efectos químicos de la vegetación. Los ácidos orgánicos que se forman donde hay vegetales en descomposición tienden a aumentar el poder de disolución de las aguas que los contienen.

Como resultado de estos procesos, puede separarse la sílice de los silicatos minerales, llamándose a este fenómeno de separación de la sílice, desilificación.

Todos los procesos mencionados anteriormente intervienen en la transformación de la roca en suelo.

4.3. Factores de formación de los suelos.

La materia de la cual se ha originado el suelo, puede ser una roca ígnea, sedimentaria o metamórfica que se ha transformado lentamente (Figuras 3 y 4).

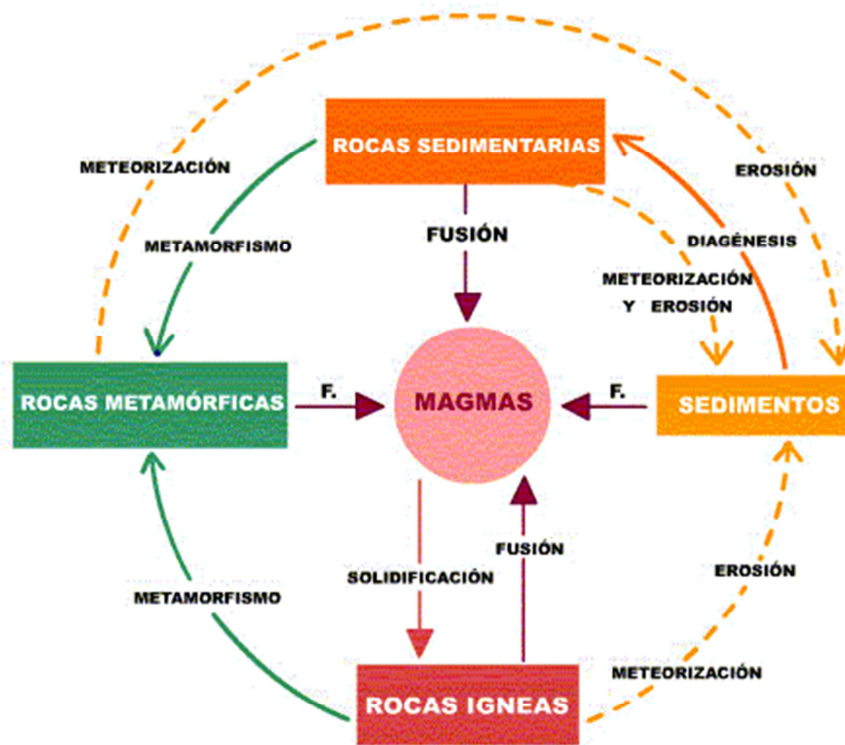


Figura 3. Ciclo de formación de las rocas. (<http://www.educarm.es> Noviembre 2010)

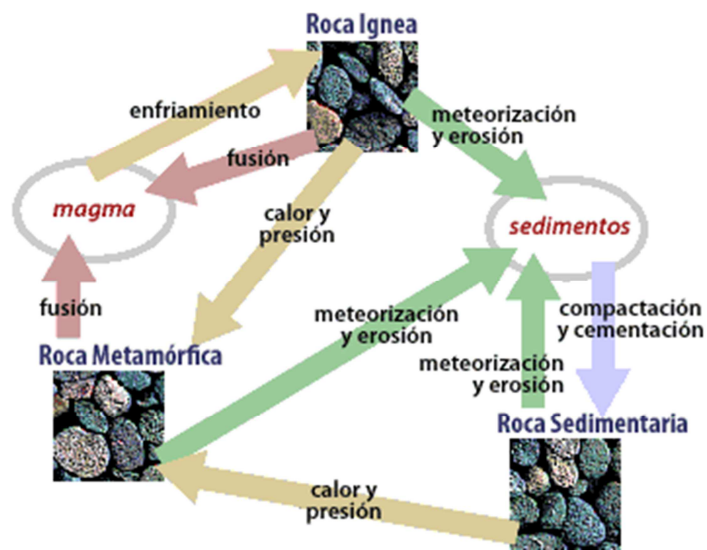


Figura 4. Ciclo de formación de las rocas. (<http://www.cof.edu> Noviembre 2010)

De acuerdo con Suarez (2010), y Duque (2003) los factores que ejercen influencia en la formación de los suelos son

El agua, al atravesar las distintas capas, va produciendo una serie de reacciones físico-químicas, que hacen que el suelo y/o la roca se vayan transformando lentamente.

La topografía del lugar, el agua también actúa de acuerdo con el relieve o topografía del terreno, si el terreno es llano, o hay colinas esta se distribuirá de manera diferente.

El clima de la región (precipitación y temperatura), es el principal agente en la formación de los suelos, al propiciar y agilizar las diversas reacciones químicas de la meteorización. La precipitación provee el agua necesaria para los procesos químicos y facilita el transporte de los productos solubles, mientras la temperatura incide en la velocidad de las reacciones.

La temperatura, está asociada íntimamente al clima, pues a mayor temperatura existe mayor cantidad de arcilla en un suelo. Además, el espesor de los estratos o capas depende de la temperatura. Así en zonas frías el espesor de las capas de un suelo es pequeño. En climas cálidos, el lecho rocoso se encuentra a mayor profundidad que en climas fríos (Figura 2).

Los organismos existentes, particularmente los microorganismos, plantas y animales intervienen en la formación del suelo.

El ser humano y sus obras, la construcción de represas, autopistas, carreteras, etc. alteran las condiciones naturales existentes.

Movimientos sísmicos, ciclones y maremotos, estos producen grandes deformaciones en la corteza terrestre.

Explosiones nucleares, ocasionan violentos cambios en la corteza terrestre y alteran las condiciones climáticas atmosféricas y ambientales existentes.

En los inicios de la meteorización el efecto de la roca parental es significativo pero en etapas posteriores, otros factores y procesos como la lixiviación por ejemplo, adquieren mayor importancia. Las lateritas rojas se pueden encontrar indistintamente en zonas de rocas ígneas básicas (basaltos y diabasas) como sobre rocas ácidas (granito, neiss, filitas). La mayor diferencia entre las lateritas de rocas básicas y ácidas, es que el espesor del suelo formado es mayor en áreas donde existen rocas ácidas ricas en cuarzo que en aquellas de rocas básicas donde se alcanzan capas de pocos milímetros. (Echeverri, 2005)

4.3.1. Rocas Ígneas

Las rocas ígneas (del latín *igneus*) o magmáticas se forman a partir de la solidificación de un fundido silicatado o magma. La solidificación del magma y su consiguiente cristalización puede tener lugar en el interior de la corteza, tanto en zonas profundas como superficiales, o sobre la superficie exterior de ésta. (www.edafologia.fcien.edu.uy, Mayo 2010)

Si la cristalización tiene lugar en una zona profunda de la corteza a las rocas así formadas se les denominan rocas intrusivas o plutónicas. Por el contrario, si la solidificación magmática tiene lugar en la superficie terrestre a las rocas se las denomina rocas extrusivas o volcánicas. Por último, si la solidificación magmática se produce cerca de la superficie de la tierra, de una manera relativamente rápida y el magma rellena pequeños depósitos (p.ej. diques, filones, sills, lacolitos, etc.) a las rocas así formadas se las denomina subvolcánicas o hipoabisales. Estas rocas también reciben el nombre de rocas filonianas, ya que habitualmente están rellenoando grietas o filones (Figura 5). (www.edafologia.fcien.edu.uy, Mayo 2010)

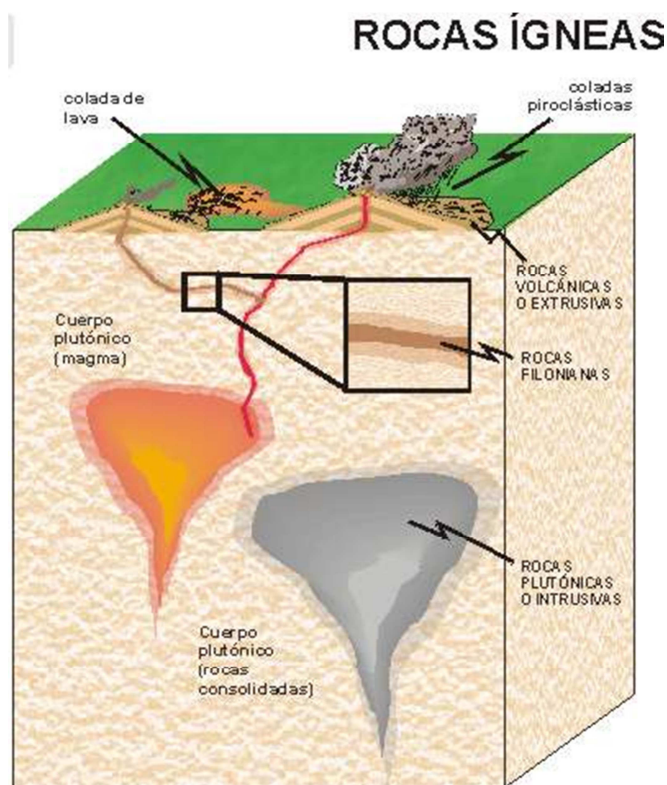


Figura 5. Formación rocas ígneas. (<http://www.uam.es> 2010)

La clasificación de las rocas ígneas se basa en la composición mineralógica y en las texturas. La textura permite establecer si nos encontramos con rocas plutónicas, volcánicas o filonianas.

En la textura de las rocas ígneas, podemos diferenciar dos aspectos: Grado de cristalinidad y tamaño de los cristales.

4.3.1.1 Grado de Cristalinidad:

Cuando un magma se enfría muy rápidamente, y no hay tiempo suficiente para que los átomos e iones se agrupen formando una estructura cristalina, el resultado de la solidificación es la formación de un vidrio.

En función del porcentaje de vidrio presente en una roca podemos clasificarla en (www.edafologia.fcien.edu.uy, Mayo 2010):

- Holohialinas. Son rocas que están compuestas por más del 90% en volumen de vidrio, lo que suele ser característico de las rocas volcánicas lávicas (p.ej. una pumita o una obsidiana).
- Hialocristalinas. Son rocas que están compuestas en parte por vidrio y en parte por cristales, sin que ninguno de estos dos componentes supere el 90% del volumen total. Este tipo de textura suele ser característico de las rocas

- volcánicas lávicas y de las rocas hipoabisales o filonianas (p.ej. un pórfido granítico).
- Holocristalinas. Son rocas que están compuestas por más del 90% en volumen de cristales, lo que suele ser característico de las rocas plutónicas (p.ej. un granito).

4.3.1.2 Tamaño de los Cristales

En función del tamaño de los cristales de una roca ígnea se pueden establecer dos tipos texturales (www.edafologia.fcien.edu.uy, Mayo 2010):

Fanerítica, del griego phaneros (visible). Es aquella roca en la que los cristales pueden reconocerse a simple vista. Este tipo de textura se da en rocas que han sufrido un proceso lento de enfriamiento, es decir que han perdido calor de una forma gradual y lenta. Es típica de rocas intrusivas (plutónicas). Se pueden distinguir varios tamaños de grano dentro de este grupo:

- grano muy grueso, cuando los granos tienen un tamaño mayor de 30 mm.
- grano grueso, cuando los granos tienen tamaños entre 30 y 5 mm.
- grano medio, cuando los granos tienen tamaños entre 5 y 2 mm.
- grano fino, cuando los granos tienen un tamaño menor de 2mm, pero son visibles.

Afanítica, el prefijo a- indica negación, a phaneros (no visible). Es aquella roca en la que los cristales no pueden reconocerse a simple vista y es necesario una lupa o un microscopio. Una textura afanítica siempre indica que el proceso de enfriamiento se produjo de forma más o menos rápida. Esta textura es típica de rocas volcánicas y subvolcánicas. Se pueden distinguir dos clases dentro de este grupo:

- microcristalinas, cuando los cristales son reconocibles con el microscopio.
- vítreas o criptocristalinas, cuando los cristales no son reconocibles con el microscopio.

4.3.1.3 Distribución de tamaños de los cristales

De acuerdo a www.edafologia.fcien.edu.uy, (Mayo 2010) la distribución del tamaño de los cristales de las rocas ígneas puede ser:

Equigranular. El tamaño de todos los cristales es parecido.

Inequigranular. En la roca existe una distribución de tamaños de grano muy amplia. Si se representa el tamaño de los cristales frente a su frecuencia se pueden distinguir varios tipos de distribuciones. Unimodal, cuando la

distribución es una campana de Gauss; bimodal, cuando se pueden distinguir dos máximos dentro de la distribución y seriada.

Porfídica. Cuando se observa una serie de cristales de gran tamaño englobados en una matriz compuesta por granos de un tamaño sensiblemente menor, es decir, existen dos poblaciones distintas de cristales.

4.4. Mineralogía de los suelos

Un mineral se define como un sólido homogéneo con estructura ordenada, de origen natural e inorgánico, y de composición química (pero variable dentro de ciertos límites). (www.scribd.com, Mayo 2010)

Los minerales del suelo se dividen en dos tipos (www.scribd.com, Mayo 2010):

- Heredados, es decir, procedentes de la roca-sustrato que se altera para dar el suelo, que serán minerales estables en condiciones atmosféricas, resistentes a la alteración físico-química.
- Formados durante el proceso edafológico por alteración de los minerales de la roca-sustrato que no sean estables en estas condiciones.

Los minerales más importantes, y las formas de presencia en el suelo serían los siguientes (www.scribd.com, Mayo 2010):

- Cuarzo. Es un mineral muy común en los suelos, debido a su abundancia natural en la mayor parte de las rocas; y a su resistencia al ataque químico. El cuarzo confiere al suelo buena parte de su porosidad, debido a que suele estar en forma de granos más o menos gruesos, lo que permite el desarrollo de la porosidad intergranular. Además, es un componente inerte, muy poco reactivo, del suelo. Suele encontrarse en suelos poco estructurados de textura arenosa.
- Feldespatos. Suelen ser componentes minoritarios, heredados o residuales de la roca sobre la que se forma el suelo, pues son metaestables en medio atmosférico, tendiendo a transformarse en minerales de la arcilla. Al igual que el cuarzo, conforman la fracción arenosa del suelo, si bien en este caso le confieren una cierta reactividad.
- Los fragmentos de roca son junto con los dos componentes anteriores, la fracción comúnmente más gruesa del suelo, si bien es este caso el tamaño de fragmentos suele ser superior a 2 cm, de forma que el cuarzo y feldespatos suelen constituir la fracción arenosa del suelo, mientras los fragmentos de roca constituyen la fracción de tamaño grava. La naturaleza de los fragmentos está directamente relacionada con la de la roca sobre la que se forma, si bien ocasionalmente el suelo puede contener fragmentos de origen externo, como consecuencia de procesos de transporte y depósito contemporáneos con la formación del suelo. En cualquier caso,

son siempre heredados, y nos permiten identificar si el proceso de edafogénesis ha tenido o no aportes externos.

- **Minerales de la arcilla.** Son minerales también muy abundantes en el suelo, constituyendo la matriz general del mismo, la componente intergranular entre la fracción arenosa y los fragmentos de roca. Son minerales que proceden de la alteración de los que componen la roca sobre la que se producen los procesos de meteorización.
- **Sulfatos.** La presencia de sulfatos en el suelo suele tener la doble vertiente de que pueden ser minerales relativamente comunes, pero al ser compuestos de solubilidad relativamente alta, su acumulación efectiva solo puede producirse bajo condiciones muy determinadas: abundancia de sulfatos (e.g., yesos) en el entorno inmediato, y clima árido o semiárido.
- **Carbonatos.** Los carbonatos son minerales frecuentemente formados por el proceso de edafogénesis, aunque debido a su alta solubilidad su acumulación no suele producirse en el horizonte más superficial.
- **Óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio.** son minerales que se suelen acumular en el suelo como consecuencia de procesos de alteración de otros minerales, constituyendo la fase estable del hierro en superficie o condiciones cercanas a la superficie. Se acumulan en forma de agregados. Desde el punto de vista estrictamente químico son muy estables, poco o nada reactivos, pero presentan propiedades sorcitivas (absorción y adsorción) que hacen que su presencia en el suelo tenga implicaciones físico-químicas notables.

4.4.1 Clasificación y nomenclatura de las rocas ígneas (composición mineralógica)

Las rocas ígneas están compuestas fundamentalmente por silicatos, los cuales están constituidos mayoritariamente por silicio (Si) y oxígeno (O). Estos dos elementos, junto con el aluminio (Al), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg) y hierro (Fe), constituyen más del 98% en peso de la mayoría de los magmas que al solidificarse forman las rocas ígneas. Además los magmas contienen pequeñas cantidades de muchos otros elementos como azufre (S), oro (Au), plata (Ag) uranio (U), tierras raras, gases en disolución, etc.

La composición de una roca ígnea dependerá, por tanto, de la composición inicial del magma a partir del cual se ha formado. (www.uam.es, Mayo 2010)

Los diferentes silicatos que constituyen las rocas ígneas cristalizan en un orden determinado, que está condicionado por la temperatura. La Figura 6 presenta la serie de cristalización de Bowen (1928) que muestra el orden de cristalización de los distintos silicatos conforme disminuye la temperatura de un magma.

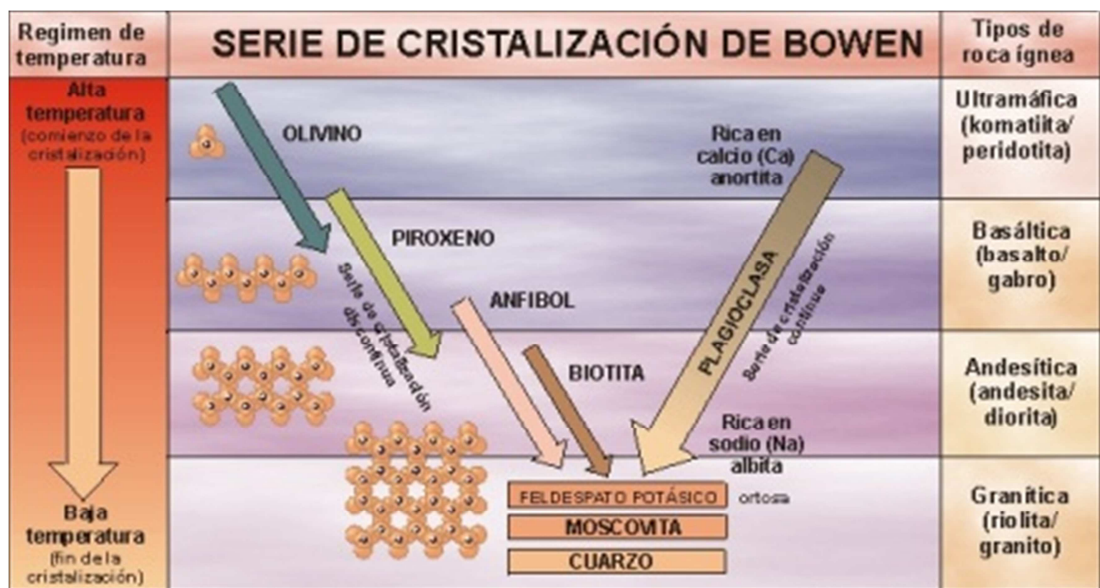


Figura 6. Serie de cristalización de Bowen (<http://www.uam.es> 2010)

En este esquema evolutivo se pueden distinguir tres grupos de minerales:

- Los ferromagnesianos denominados así por su alto contenido en hierro y magnesio (olivino, piroxenos, anfíboles, biotita). Debido a su composición son minerales de colores más oscuros. Forman una serie de cristalización discontinua y cristalizan en un rango de temperaturas altas.
- Las plagioclasas. Forman una serie de cristalización continua entre la anortita y la albita. Cristalizan también en un intervalo de temperaturas altas - medias.
- Silicatos no ferromagnesianos (cuarzo, moscovita y ortosa). Son los minerales que cristalizan a menor temperatura. Estos minerales contienen una mayor proporción de aluminio (Al), potasio (K), calcio (Ca) y sodio (Na), que de hierro y magnesio.

A las rocas con un alto contenido en minerales ferromagnesianos se les denomina máficas (máfico, del latín magnesium y ferrum). Suelen tener un índice de color alto (tonalidades oscuras). Y a las rocas con alto contenido en minerales no ferromagnesianos (cuarzo, moscovita, feldespato K, plagioclasa y feldespatoídes) se les denomina félsicas (félsico, proveniente de feldespato y sílice). Son rocas con un índice de color bajo (tonalidades claras).

4.4.2 Clasificación de las rocas ígneas en función de la textura y composición química

La clasificación de las rocas ígneas se realiza en función de la textura y de la composición química que presentan (Figura 7):

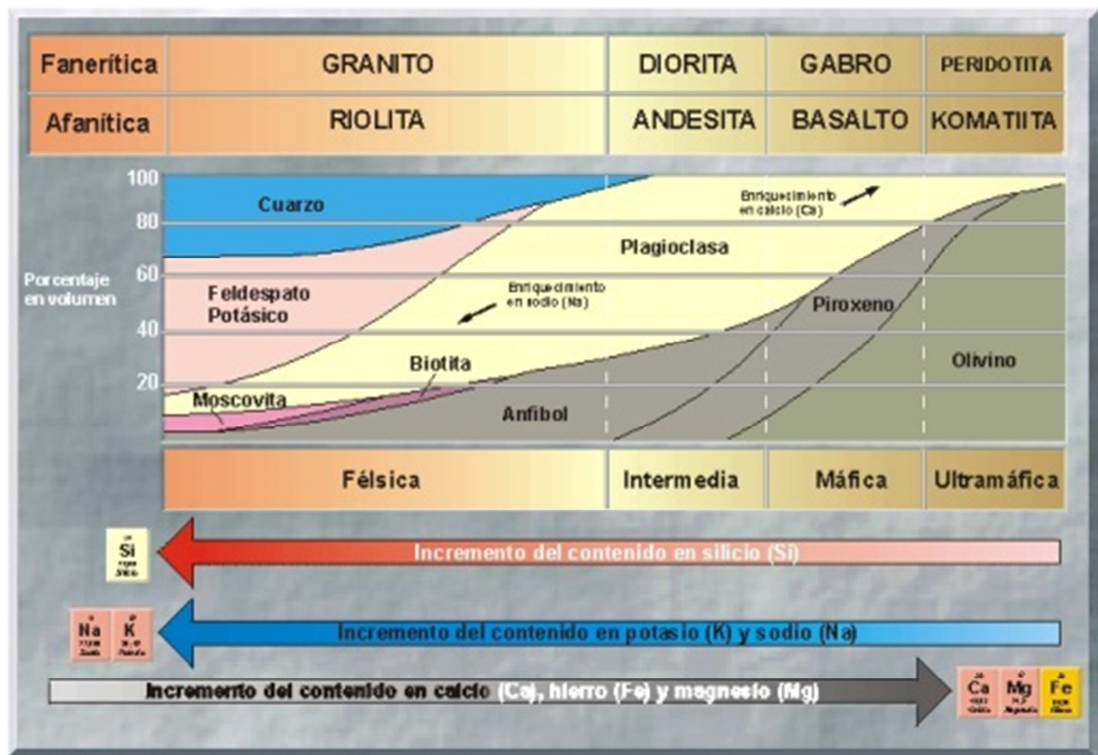


Figura 7. Clasificación de las rocas ígneas de acuerdo a la textura y la composición química. (<http://www.uam.es> 2010)

4.4.3. Mineralogía de los suelos tropicales

La mineralogía de los suelos residuales *in situ* varía considerablemente; parte de ella es heredada de las rocas o de los suelos de los que se derivan, y parte es debida a los procesos de meteorización durante su génesis (Fookes, 2004).

Los iones y cationes más frecuentes en el suelo son a saber (Jaramillo, 2002):

- Iones: OH^- , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- , $H_2PO_4^-$, $H_2BO_3^-$, F^- , HPO_4^{2-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , MoO_4^{2-} , SeO_4^{2-}
- cationes: H^+ , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Si^{4+}

La capacidad que posee un suelo de retener cationes se conoce como Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y depende directamente de la cantidad de cargas negativas presentes en su superficie (Cruz, 2003). A partir de la Capacidad de Intercambio Catiónico se puede obtener algún indicativo de la composición mineralógica de la fracción arcilla, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Capacidad de intercambio catiónico típicas de los minerales de arcilla (Valencia 2005)

Mineral	CIC
Caolinita	3-15
Haloysita	5-50
Ilita	10-40
Clorita	10-40
Esmectita	60-150
Vermiculita	100-150
Montmorillonita	80-150
Materia orgánica	200-400

En la tabla 2 se observa la gravedad específica de algunos minerales:

Tabla 2. Gravedad específica de varios minerales (Fredlund y Rahadjo, 1993)

Mineral	Gravedad específica, Gs
Cuarzo	2.65
K-Feldespatos	2.54-2.57
Na-Ca-Feldespatos	2.62-2.76
Calcita	2.72
Dolomita	2.85
Moscovita	2.7-3.1
Biotita	2.8-3.2
Clorita	2.6-2.9
Pirofilita	2.84
Serpentina	2.2-2.7
Caolinita	2.61 a 2.64±0.02
Haloysita	2.55
Ilita	2.84 ^a ; 2.60-2.86
Montmorillonita	2.74 ^a ; 2.75-2.78
Attapulgita	2.3

Los minerales originales de las rocas se conocen como minerales primarios, donde los menos resistentes desaparecen transformándose en otros minerales denominados minerales secundarios. Los principales grupos de minerales primarios corresponden a silicatos, aunque también se presentan óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfatos, sulfuros y fosfatos, entre otros. Los minerales secundarios, producidos por la alteración de los minerales primarios, corresponden a los filosilicatos y a los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, abundantes en suelos residuales de regiones tropicales. (Valencia 2005)

En los suelos tropicales los minerales de arcilla más comunes son los aluminosilicatos hidratados, con estructura en capas o láminas, pertenecientes al grupo de los filosilicatos, constituidos por diversos patrones de apilamiento de capas de tetraedros de Si y octaedros de Al, Mg, Fe, entre otros (Valencia 2005).

Los minerales de menor a mayor grado de resistencia a la alteración según Jaramillo (2002), son:

olivino<augita<hornblenda<biotita<oligoclasa<albita
<ortoclasa<magnetita<cuarzo

En los suelos de nuestra región abunda el cuarzo al que siguen en orden de abundancia, los feldespatos, los anfíboles y las micas (Malagón, 1995).

4.5. Métodos de clasificación de los suelos

Existen diversas normatividades para la clasificación de los suelos, dentro de las que se pueden destacar:

USCS – Unified Soil Classification System

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM – American Society For Testing And Materials

HRB – Highway Research Board

MCT – Miniatura, Compactada, Tropical

NORMAS UNE – AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación)