

**Caracterización Geotécnica de un Regolito de Derivación Granítica/Gnéisica en la
Región Este de la Ciudad de Campinas-SP, Brasil: Contribuciones para el Mapa de
Materiales No Consolidados de la Región.**

Oscar Javier Andrade Rios

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

**Juan Diego Colegial Gutiérrez
Doctor en Ingeniería Geológica**

Codirector

**Jefferson de Lima Picanço
Doctor en Geociencias**

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2018**

DEDICATORIA

A Rosalba, madre luchadora y entregada, quien cree siempre en mí y me impulsa a ser cada vez mejor.

A Elvita[†] y Vicky[†] quienes siempre me guían e iluminan mi camino.

AGRADECIMIENTOS

A Liliana y Laura por sus enseñanzas, apoyo incondicional, confianza y aguante.

A mi nono Carlos por ser mi compinche y estar a mi lado en cada aventura.

*A mi padre por inculcarme su orden y disciplina, siempre necesaria para cumplir mis metas,
y a Sofía por enseñarme esa otra cara de la moneda que siempre quise vivenciar.*

*A mis grandes amigos por las experiencias y enseñanzas, indispensables para concluir esta
etapa y a Dana por su cariño y motivación cuando más lo necesitaba.*

*A la UNICAMP por los recursos y equipos brindados para el desarrollo de esta
investigación. A Jefferson por su cálido recibimiento y su orientación siempre con la mejor
disposición, a Ana Elisa por sus enriquecedoras enseñanzas, a Joel Viltus por su gran ayuda
y amistad desinteresada, a los técnicos de laboratorio por su oportuna colaboración y a todos
los compañeros, amigos y docentes que marcaron positivamente mi intercambio académico.*

*A la UIS y la oficina de relaciones exteriores por facilitarme la maravillosa experiencia de
movilidad académica donde comencé a desarrollar este proyecto. Al grupo Geomática por
prestarme sus espacios y servicios técnicos. Al profesor Juan Diego y a mi mentor Guillermo
por su disposición y oportunas correcciones. A Santiago por acompañarme y ayudarme en
las largas noches de esfuerzo. A mis compañeros, colegas y todos aquellos que de una forma
u otra dejaron su huella a lo largo de mi vida universitaria.*

Tabla de Contenido

Introducción	18
1. Planteamiento del problema	20
2. Alcance e impacto social	21
3.1. Objetivo general	23
3.2. Objetivos específicos	23
4. Caracterización del área de estudio	24
4.1. Localización	24
4.2. Antecedentes	26
4.2.1. Geología	28
4.2.2. Geomorfología	37
4.2.3. Pedología	40
4.2.4. Condiciones hidrológicas	44
4.2.5. Clima	47
4.2.6. Sismicidad	48
5. Marco teórico	48
5.1. Mecánica de suelos	49
5.1.1. Suelos: Origen y formación	50
5.1.2. Tipos de suelos	50

5.1.3. Características principales de los suelos	51
5.1.4. Sistemas de clasificación de los suelos	56
5.2. Cartografía geotécnica	61
5.2.1. Clasificación de los productos geotécnicos	62
5.2.2. Operaciones realizadas para la confección de mapas	65
5.2.3. Mapa de materiales no consolidados	68
5.3. Estabilidad de taludes	69
5.3.1. Estabilidad de taludes en suelos residuales	70
5.3.2. Análisis de estabilidad	71
6. Metodología	73
6.1. Propuesta metodológica	74
6.2. Etapas metodológicas	76
6.2.1. Etapa 1: Levantamiento bibliográfico	76
6.2.2. Etapa 2: Adquisición de datos del medio físico	78
6.2.3. Etapa 3: Ensayos de laboratorio	81
6.2.4. Etapa 4: Análisis de resultados y elaboración de productos	89
7. Resultados	90
7.1. Mapas temáticos	91
7.1.1. Mapa de documentación	91
7.1.2. Geología del área de estudio	92
7.1.3. Geomorfología del área de estudio	93
7.1.4. Pedología del área de estudio	95
7.2. Caracterización geotécnica	96

7.2.1. Peso específico de los sólidos.....	96
7.2.2. Análisis granulométrico	97
7.2.3. Límites de consistencia	100
7.2.4. Corte directo.....	102
7.3. Mapa de materiales no consolidados	107
8. Análisis de resultados.....	109
8.1. Caracterización de los materiales no consolidados.....	109
8.1.1. Definición de unidades	109
8.1.2. Descripción de unidades de materiales no consolidados	111
8.2. Estabilidad de los materiales no consolidados en taludes antrópicos	117
8.2.1. Modelos de estabilidad.....	117
8.2.2. Análisis de estabilidad.....	119
9. Discusión	127
10. Conclusiones	131
11. Recomendaciones	132
Referencias bibliográficas	134
Apéndices.....	140

Lista de Tablas

Tabla 1. Resumen de la cronoestratigrafía del municipio de Campinas.	30
Tabla 2. Descripción de las unidades geológicas presentes en el área de estudio.....	36
Tabla 3. Características morfológicas, morfométricas y morfodinámicas del municipio de Campinas.	37
Tabla 4. Descripción de las unidades pedológicas del área de estudio.....	41
Tabla 5. Escalas para el mapeamiento geotécnica usadas según su detalle.	63
Tabla 6. Clasificación jerárquica de documentos cartográficos del mapeamiento geotécnico...	66
Tabla 7. Peso específico de las muestras alteradas recolectadas.....	96
Tabla 8. Porcentaje del tamaño de las fracciones granulométricas de las muestras alteradas. .	97
Tabla 9. Clasificación granulométrica de los suelos según el tamaño y disposición de los granos.	99
Tabla 10. Límites de consistencia de Atterberg y clasificación del grado de plasticidad de los suelos.....	100
Tabla 11. Clasificación de los suelos según la carta de plasticidad de Casagrande.	102
Tabla 12. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna de la muestra OP3.....	104
Tabla 13. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna de la muestra OP5.....	105
Tabla 14. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna de la muestra OP6.....	107
Tabla 15. Atributos geotécnicos de la Unidad II de materiales no consolidados.	112

<i>Tabla 16. Atributos geotécnicos de la Unidad III de materiales no consolidados.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 17. Atributos geotécnicos de la Unidad IV de materiales no consolidados.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 18. Atributos geotécnicos de la Unidad V de materiales no consolidados.</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 19. Atributos geotécnicos de la Unidad VI de materiales no consolidados.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 20. Atributos geotécnicos de la Unidad VII de materiales no consolidados.</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 21. Atributos geotécnicos de la Unidad VIII de materiales no consolidados.</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 22. Atributos geotécnicos de la Unidad IX de materiales no consolidados.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 23. Atributos geotécnicos de la Unidad X de materiales no consolidados.</i>	<i>117</i>

Lista de Figuras

Figura 1. Localización detallada del área de estudio.....	25
Figura 2. Mapa geológico del municipio de Campinas.....	33
Figura 3. Mapa geomorfológico del municipio de Campinas	38
Figura 4. Mapa pedológico semidetallado del municipio de Campinas.....	42
Figura 5. Mapa de cuencas hidrográficas del municipio de Campinas	45
Figura 6. Gráfico de distribución granulométrica mediante el cual se clasifican los suelos según el tamaño de sus partículas.....	53
Figura 7. Gráfico de plasticidad de Casagrande para clasificar limos y arcillas	54
Figura 8. Sistema Unificado de Calcificación de Suelos en la Ingeniería bajo la normas de la ASTM.....	57
Figura 9. Tipos de roturas en suelos.....	72
Figura 10. Diagrama metodológico empleado para obtener el mapa de materiales no consolidados y el análisis de estabilidad de taludes.	75
Figura 11. Árbol lógico utilizado para establecer las unidades de materiales no consolidado..	76
Figura 12. Diagrama resumen de las etapas de actividades desarrolladas en la investigación.	77
Figura 13. Perfiles de suelo donde fueron tomadas algunas de las muestras alteradas en campo.	80

Figura 14. Procedimiento empleado para recolectar las muestras inalteradas en los perfiles de suelo.....	81
Figura 15. Procedimiento empleado para la preparación de muestras de suelo alteradas.....	82
Figura 16. Procedimiento empleado para la preparación de muestras de suelo inalteradas.....	83
Figura 17. Procedimiento experimental para determinar el peso específico de los suelos.....	84
Figura 18. Procedimiento para determinar la granulometría de los suelos mediante tamizado.....	85
Figura 19. Procedimiento de sedimentación para determinar la granulometría de los suelos...	86
Figura 20. Aparato de Casagrande utilizado para determinar el límite líquido de los suelos. ..	87
Figura 21. Procedimiento del ensayo de cizallamiento directo para determinar la resistencia al corte.....	88
Figura 33. Mapa de documentación del área de estudio exhibiendo los puntos de muestreo.....	91
Figura 34. Mapa geológico del Área de Estudio	92
Figura 35. Mapa geomorfológico del área de estudio.....	93
Figura 36. Mapa de formas del terreno del área de estudio.....	94
Figura 37. Mapa pedológico del área de estudio	95
Figura 22. Curvas de distribución granulométrica acumulada de las muestras analizadas	99
Figura 23. Clasificación de plasticidad de los suelos según la carta de plasticidad de Casagrande	101
Figura 24. Gráfico de tensión de cizalla vs deformación específica para la muestra OP3	103
Figura 25. Gráfico de variación vertical del volumen vs deformación específica de la muestra OP3	103
Figura 26. Gráfico de Tensión Normal vs Tensión de cizalla máxima de la muestra OP3.....	104

Figura 27. Gráfico de tensión de cizalla vs deformación específica para la muestra OP5	104
Figura 28. Gráfico de variación vertical del volumen vs deformación específica de la muestra OP5	105
Figura 29. Gráfico de Tensión Normal vs Tensión de cizalla máxima de la muestra OP5.....	105
Figura 30. Gráfico de tensión de cizalla vs deformación específica para la muestra OP6.	106
Figura 31. Gráfico de variación vertical del volumen vs deformación específica de la muestra OP6	106
Figura 32. Gráfico de Tensión Normal vs Tensión de cizalla máxima de la muestra OP6.....	107
Figura 38. Mapa de unidades de materiales no consolidados presentes en el área de estudio	108
Figura 42. Aplicación del árbol lógico para la definición de las unidades de MNC	109
Figura 39. Modelo de estabilidad para el Talud 1 y sus características.....	118
Figura 40. Modelo de estabilidad para el Talud 2 y sus características.....	118
Figura 41. Modelo de estabilidad para el Talud 3 y sus características.....	119
Figura 43. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Bishop Simplified para el Talud 1.....	120
Figura 44. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Jambu Simplified para el Talud 1.....	121
Figura 45. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método de Spencer para el Talud 1.....	121
Figura 46. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Bishop Simplified para el Talud 2.....	123
Figura 47. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Jambu Simplified para el Talud 2.....	123

Figura 48. Superficie critica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método de Specer para el Talud 2..... 124

Figura 49. Superficie critica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Bishop Simplified para el Talud..... 125

Figura 50. Superficie critica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Jambu Simplified para el Talud 3..... 125

Figura 51. Superficie critica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método de Spencer para el Talud 3..... 126

Lista de Apéndices

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la
Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Resultados ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.

Apéndice B. Tablas de parámetros geotécnicos de los materiales no consolidados.

Apéndice C. Productos cartográficos del mapeamiento geotécnico.

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE UN REGOLITO DE DERIVACIÓN GRANÍTICA/GNÉISICA EN LA REGIÓN ESTE DE LA CIUDAD DE CAMPINAS-SP, BRASIL: CONTRIBUCIONES PARA EL MAPA DE MATERIALES NO CONSOLIDADOS DE LA REGIÓN*

AUTOR: OSCAR JAVIER ANDRADE RIOS**

Palabras clave: Geotecnia, unidades superficiales, cartografía geotécnica, expansión urbana, suelos residuales, estabilidad de taludes.

El mapeamiento geotécnico es una importante herramienta para la caracterización de los diferentes atributos del medio físico, debido a que detalla informaciones importantes que son útiles en la aplicación de proyectos de planeación y obras de ingeniería. En Brasil, raramente se consideraban las limitaciones del medio, generando el uso y ocupación inadecuada del territorio. Por ello, se hace necesaria la producción de elementos cartográficos, enfocados en la geotecnia, con el fin de conocer el comportamiento de los diferentes materiales que componen el medio y así diferenciarlos correctamente para diversos fines como la orientación en el proceso de expansión urbana y la correcta ocupación territorial.

En el presente trabajo se elabora el mapa de materiales no consolidados a escala 1:25.000 de una porción de 25km² del área de expansión urbana al este de Campinas-SP, Brasil, con el objetivo de caracterizar el comportamiento geotécnico de dichos materiales al estar asociados a protolitos granítico/gnéisicos en climas tropicales. La metodología empleada consistió en la caracterización cartográfica de componentes del medio físico como la geología, geomorfología, pedología y condiciones hidro-climáticas, y la caracterización geotécnica de los suelos por medio de ensayos de laboratorio como el peso específico de los granos, análisis granulométrico, límites de Atterberg y corte directo. A partir de los resultados de laboratorio y los mapas temáticos obtenidos, se definen y describen 10 unidades de materiales no consolidados mediante el árbol lógico modificado de Zuquette y Gandolfi (2004). Y una vez caracterizados sus parámetros físicos y geotécnicos se realiza el análisis de estabilidad para tres taludes compuestos por suelos residuales a través de modelos determinísticos, obteniendo altos valores de factores de seguridad para superficies críticas de ruptura, evidenciando una baja probabilidad de presentar fenómenos de movimientos en masa en estos materiales.

*** Trabajo de grado**

**** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez, Doctor en Ingeniería Geológica.**

ABSTRACT

TITLE: GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION OF A GRANITIC/GNEISSIC DERIVATION REGOLITH IN THE EAST REGION OF CAMPINAS-SP CITY, BRAZIL: CONTRIBUTIONS FOR THE REGION'S UNCONSOLIDATED MATERIALS MAP*

AUTHOR: OSCAR JAVIER ANDRADE RIOS**

Key words: Geotechnics, unconsolidated materials, geotechnical cartography, urban expansion, residual soils, slope stability.

Geotechnical mapping is an important tool for the characterization of the different attributes of the physical environment because it details important information that is useful in the application of planning projects and engineering works. In Brazil, the limitations of the environment were rarely considered, generating the inappropriate use and occupation of the territory. Therefore, it is necessary to produce cartographic elements, focused on geotechnics, to know the behavior of the different materials composing the environment and differentiate them correctly for purposes such as orientation in the correct process of urban expansion and territorial occupation.

In the present work, the map of unconsolidated materials at scale 1: 25,000 is elaborated from a 25km² portion of the urban expansion's east area of Campinas-SP, Brazil, with the objective of characterizing the geotechnical behavior of those materials in tropical climates as they are associated to granitic/gneissic protolites. The methodology used consisted in the cartographic characterization of physical environment components such as geology, geomorphology, pedology and hydro-climatic conditions, and the geotechnical characterization of soils through laboratory tests such as specific weight, granulometric analysis, Atterberg limits and direct cut. Based on the laboratory results and the thematic maps obtained, 10 units of unconsolidated materials were defined and described by the modified logical tree of Zuquette and Gandolfi (2004). Once the physical and geotechnical parameters were characterized, the stability analysis is performed for three slopes composed of residual soils through deterministic models, obtaining high values of safety factors for critical rupture surfaces, showing a low probability of presenting mass movement phenomena in these materials.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez, PhD Geological Engineering.



Introducción

En las últimas décadas, el interés de la sociedad por los estudios geo-ambientales y geotécnicos ha crecido considerablemente, principalmente por sus aplicaciones en áreas que van desde la planeación urbana y obras de ingeniería hasta el análisis de riesgos e impactos ambientales (Fiori & Carmignani, 2009). La creciente expansión del uso de la cartografía geotécnica y de su conocimiento como herramienta de contribución a las diferentes ramas de la ciencia, como las áreas de las ciencias de la tierra y de la ingeniería, ha llevado a su empleo desde proyectos de planeación hasta el diagnóstico del medio físico (Barreto Franco, Gomes Marques, Calijuri, & Lima Gomes, 2010). La causa del mayor número de producción de cartas y/o mapas geotécnicos, para fines de planeamiento y gestión, está relacionada al crecimiento desordenado de las ciudades y las intensas actividades antrópicas que transforman el medio ambiente, causando problemas de naturaleza física, social y económica.

En este contexto, la búsqueda por la sustentabilidad en los municipios es cada vez mayor, y para ello se crean instrumentos de planeamiento y de gestión de políticas públicas (Rodrigues & Augusto Filho, 2007). Sin embargo, en Brasil raramente consideran las limitaciones del medio físico, dando como resultado el uso y ocupación inadecuada del territorio, lo que lleva a la exigencia de gastos elevados para implantar los proyectos de ocupación urbana y/o para restaurar las áreas que ya han sido desfiguradas (Zuquette, 1987).

Por ello, se hace necesaria la producción de elementos cartográficos, enfocados en la geotecnia, que contribuyan a la disminución del impacto social, económico, ambiental y político, especialmente en zonas de expansión urbana contempladas en las periferias de los territorios, principalmente, de grandes ciudades susceptibles a procesos acelerados de expansión y ocupación.

Para generar dichos productos cartográficos, se requiere conocer a detalle las características del medio físico. Lo cual se puede realizar mediante el estudio de áreas de las ciencias de la tierra tales como la geología, geomorfología, pedología, hidrología, entre otras; en conjunto con la mecánica de suelos y la cartografía geotécnica, las cuales ayudan a mejorar el entendimiento de características intrínsecas de los materiales que componen el medio y posteriormente las representa en cartas o mapas, con el fin de diferenciar y describir las unidades los materiales que sean de interés en un área determinada.

Uno de los productos base de la cartografía geotécnica es el mapa de materiales no consolidados (mapa de unidades geológicas superficiales en Colombia), que tiene como objetivo caracterizar el regolito (material presente desde el tope de la roca inalterada hasta la superficie), abordando características del suelo como su origen, textura, espesor y composición. Estos materiales tienen una edad y espesor variables, formando paquetes discontinuos que están ligados a la interacción de los materiales litológicos y los procesos naturales que estos sufrieron a través del tiempo. Las variaciones de los tipos de materiales y su distribución espacial tienen gran influencia en la eficiencia del uso y ocupación del suelo, condicionando procesos de manejos y rehabilitación de áreas (Zuquette & Gandolfi, 2004). Por lo que la diferenciación de estos materiales, su descripción y representación gráfica es de gran importancia en el ámbito técnico, social y político para el

planeamiento y desarrollo adecuado de territorios destinados a la expansión urbana y a la protección ambiental.

En este trabajo se determinan las características geológico-geotécnicas de los suelos residuales y transportados asociados al protolito granítico/gnéisico al este del área de expansión urbana de Campinas, São Paulo(SP), Brasil; diferenciando y caracterizando los diferentes materiales no consolidados, con el fin de cartografiarlos y elaborar el mapa de materiales no consolidados mediante el software ArcGIS 10.5.

Una vez identificados y analizados, se realiza un análisis aproximado de estabilidad de taludes mediante el software Slide de Rocscience, generando el modelo geométrico de tres taludes compuestos por los materiales residuales identificados en el área de estudio y, a través de métodos determinísticos, se determinan las características de estabilidad de los materiales que componen el talud tales como el orden de magnitud del factor de seguridad y la superficie crítica de falla para cada uno de ellos.

1. Planteamiento del problema

Se trata del área de expansión urbana al este de la ciudad de Campinas, São Paulo, Brasil, donde el reconocimiento de las características de los suelos es fundamental para la toma de decisiones técnicas referentes al uso y ocupación del suelo de la región. Debido a que aún no se conoce con detalle el comportamiento, desde el punto de vista de la geología para ingeniería, de los suelos

saprolíticos de gneises y granitos en climas tropicales, es necesario hacer un reconocimiento detallado de las características geológicas (tipo de suelo y génesis, composición litológica, etc.) y geotécnicas (propiedades de las partículas, índices de consistencia, cohesión, ángulo de fricción interna, entre otros) de dichos suelos.

También se debe tener en cuenta que, desde el punto de vista de la ingeniería, se suele asumir erróneamente a los materiales no consolidados como un conjunto que hace parte de la roca inalterada, siendo necesaria su diferenciación y caracterización apropiada, separándolo de los materiales litológicos consolidados y representándolos correctamente. Una vez se haya mejorado el entendimiento de este tipo de materiales, se torna necesario contribuir al desarrollo de la base cartográfica geotécnica desarrollada por los diferentes entes gubernamentales de la región, especialmente de mapas temáticos elementales que caracterizan el medio físico, como lo son el mapa de materiales no consolidados, mapa geológico, mapa de pendientes, mapa geomorfológico, entre otros; los cuales son esenciales a la hora de elaborar planes de ordenamiento territorial, desarrollo urbano y protección del medio ambiente.

2. Alcance e impacto social

La cartografía geotécnica, al registrar las informaciones de los diferentes componentes del medio físico, atiende objetivos de carácter técnico, político y social para diferentes usuarios y/o entidades. La elaboración del mapa de materiales no consolidados del área de estudio y el

correspondiente análisis de estabilidad de los taludes analizados, contribuye a la base de datos cartográficos y geotécnicos del municipio de Campinas, que está siendo desarrollada y compilada por diferentes miembros de entidades públicas de la Prefeitura de Campinas y la Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Al caracterizar los parámetros geotécnicos de los suelos y al cartografiar y contribuir con el mapa de materiales no consolidados de la región a una escala semi-detallada, se genera un gran impacto social, ya que su futura aplicación beneficiará tanto a las entidades previamente mencionadas, como a la población en general, especialmente en las zonas periféricas de la ciudad donde ocurre una expansión urbana de forma acelerada y desordenada, pues la caracterización de dichos materiales y su compilación es primordial para la toma de decisiones referentes al uso y ocupación del suelo de la región, ayudando a direccionar los diferentes proyectos urbanos, manteniendo la conciencia social y ambiental.

El alcance de este trabajo se encuentra restringido a un escenario climático seco y sismicidad normal, bajo una pluviosidad anual promedio de 1424.5mm con unos picos entre los 900mm y los 2000mm según el Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI), unas condiciones de sismicidad bajas a nulas y en una escala temporal de decenas a centenas de años, pues las propiedades físicas y químicas de los materiales no consolidados en ambientes tropicales varían rápidamente a través del tiempo.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Determinar las características geológico-geotécnicas de los suelos residuales y transportados asociados al protolito granítico/gnéisico presente en la zona de expansión de la región este del municipio de Campinas, SP, Brasil, con el fin de cartografiar y detallar los materiales no consolidados a escala 1:25.000.

3.2. Objetivos específicos

- Sintetizar la información bibliográfica y cartográfica del área de interés elaborando mapas temáticos de atributos físicos como la geología, geomorfología, pedología y cuencas hidrográficas.
- Caracterizar los parámetros geotécnicos intrínsecos de cada material no consolidado describiendo y analizando muestras de suelos alteradas e inalteradas por medio de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos tales como: análisis granulométrico, índices de consistencia, peso específico de las partículas y corte directo.

- Identificar, definir y mapear las unidades de materiales no consolidados del área de estudio a escala 1:25.000 mediante el software ArcGIS 10.5.
- Realizar un análisis aproximado de la estabilidad de taludes compuestos por materiales no consolidados residuales, a través de modelos determinísticos generados en el software Slide de Rocscience.

4. Caracterización del área de estudio

En el presente capítulo se exhibe a detalle la localización geográfica del área de estudio y se describen las características principales del medio físico correspondientes al municipio de Campinas, repasando las investigaciones que fueron realizadas por diferentes autores en la región, enfocándose particularmente en lo que concierne a los aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e hidro-climáticos.

4.1. Localización

El municipio de Campinas está ubicado en la región sureste de Brasil, específicamente en el estado de São Paulo (SP), ocupando un área de 790km² entre los meridianos 47°15'W y 46°45'W y las latitudes 22°43'S y 23°05'S (Instituto Geológico, 1993). Con una población estimada de

1'200.000 habitantes y un área urbana de 240 km², es conocida como la segunda ciudad de mayor influencia del estado paulista, justo después de su capital São Paulo.

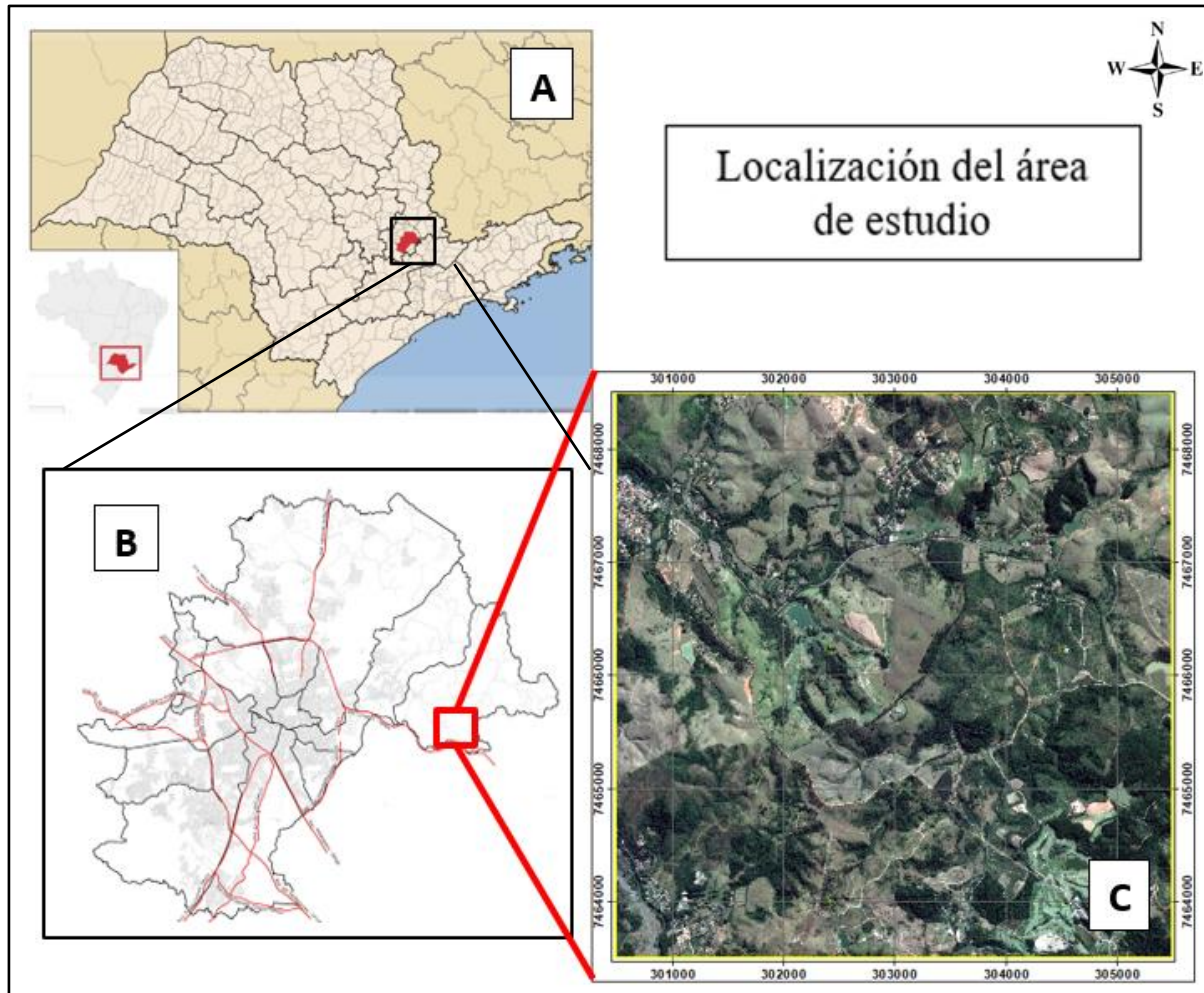


Figura 1. Localización detallada del área de estudio. A. Límite del estado de São Paulo destacando el municipio de Campinas. Tomado de: http://vereadores.wikia.com/wiki/Campinas_no_mapa. B. Mapa del límite del municipio de Campinas con el área de estudio en destaque. Tomado y modificado de: Áreas de Planejamento e Unidades Territoriais Básicas (SEPLAMA, Plano diretor, 2006). C. Fotografía aérea de la zona de estudio. Tomada de Google Earth y modificada mediante el software ArcGIS 10.5.

El área de estudio se localiza aproximadamente a 15km del casco urbano del municipio de Campinas, específicamente en la zona rural del distrito de Joaquim Egidio. Este territorio corresponde a la “Macrozona 1 – Área de protección ambiental” según el mapa de Áreas de Planejamento e Unidades Territoriais Básicas, desarrollado por la Prefeitura Municipal de Campinas y a cargo de la Secretaria de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente (SEPLAMA, 2006).

Siguiendo el sistema de coordenadas proyectadas SIRGAS_2000_UTM_Zone_23S, la zona de trabajo de campo está limitada geográficamente por las longitudes 300500mE–305500mE y las latitudes 7463500mS-7468500mS, cubriendo un área de 25 km² dentro de la plancha SF-23-Y-A-VI-3 confeccionada por el Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1973).

4.2. Antecedentes

Uno de los principales trabajos elaborados sobre Cartografía Geotécnica en el estado de São Paulo es la tesis doctoral elaborada en 1987 por Lazaro Valentín Zuquette bajo la orientación del Profesor Doctor Nilson Gandolfi, titulada *Análise Crítica da Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para Condições Brasileiras*. Este trabajo es considerado por muchos autores el pilar de la Cartografía Geotécnica en el país brasileiro, pues realiza una gran compilación de las principales metodologías y sistemáticas para la elaboración de mapas y cartas en el mundo, teniendo en cuenta los diferentes bancos de datos disponibles a la época, y propone su propia metodología, que se adecua a las características del medio físico brasileño, donde jerarquiza los diferentes productos geotécnicos y especifica cuáles son los parámetros necesarios para el

desarrollo de cada uno de estos. También establece las diferentes clasificaciones para la composición de mapas, las operaciones ejecutadas para su confección y los mecanismos para definir unidades en mapas geotécnicos. Además, aplica su propuesta metodológica para desarrollar el mapeamiento geotécnico del municipio de Campinas a escala 1:50.000, teniendo en cuenta diferentes aspectos fisiográficos y componentes del medio físico para elaborar cartas interpretativas como la de condiciones hidrogeológicas, fundaciones, erosividad, rellenos sépticos, condiciones de escavabilidad, entre otras.

El Instituto Geológico del estado de São Paulo, frente a la necesidad de responder las necesidades de la población y de las entidades públicas, implementó el programa de *Cartas Geológicas y Geotécnicas para o Planejamento Ambiental na Região entre Sorocaba e Campinas*, analizando lo referente al planeamiento del uso y ocupación del suelo en vista a la intensa degradación ambiental provocada por las actividades antrópicas y el vertiginoso proceso de ocupación urbana (IG, 1993). Dentro de este programa, en 1993 se desarrolló el proyecto de *Subsídios do Meio Físico-Geológico ao Planejamento do Município de Campinas (SP)*, en donde se elabora un análisis interdisciplinar que engloba estudios geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y de recursos minerales a escala 1:50.000 para el municipio de Campinas, caracterizando y clasificando las áreas estudiadas en función de su adecuación a la ocupación urbana, industrial o agrícola con base en los procesos morfodinámicos, la caracterización de las rocas y el relieve, la erosividad y la vulnerabilidad natural de los acuíferos. A su vez, en este proyecto, Yoshinaga et al. (1995) en *Subsídios ao planejamento territorial de campinas: A aplicação da abordagem de tipos de terreno*, desarrollaron el mapa de Tipos de terreno, potenciales y fragilidades, aportando a la base cartográfica de la región.

La dependencia de la Secretaria de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente (SEPLAMA) perteneciente la Prefeitura de Campinas elaboraron el *Plano Diretor de Campinas* en el 2006 en colaboración con entidades privadas de la región, estableciendo un conjunto de principios y reglas orientadas al ordenamiento y la ocupación físico-territorial-ambiental del municipio de Campinas (SEPLAMA, 2006). En este plan municipal se desarrollaron mapas fundamentales para la elaboración de mapas y cartas geotécnicas tales como el mapa de uso real del suelo, mapa de tipos de terreno, mapa de cuencas hidrográficas, mapa de macrozonas ambientales, mapa de áreas de planeamiento y unidades territoriales, entre otros.

Por otra parte, Fernandes de Andrade (2005), en su tesis de maestría elaboró el mapeamiento geotécnico preliminar de la zona de expansión de la ciudad de Uberlândia-MG, a partir de sondeos, recolección de muestras de suelos, ensayos de laboratorio y fotointerpretación, obteniendo como producto principal el mapa de materiales no consolidados. A su vez, ya haciendo referencia al municipio de Campinas, Gomes Pinto (2016) y Nicoletti y Picanço (2017) contribuyeron en la caracterización del regolito presente en diferentes áreas de expansión del distrito de Souzas, identificando las diferentes unidades y aportando al mapa de materiales no consolidados de la región a escala 1:25.000, el cual será complementado con el presente trabajo.

Una cantidad importante de autores han estudiado los diferentes parámetros del medio físico del área metropolitana del municipio, de los cuales se destacan la geología, geomorfología, pedología, hidrología y clima, que son descritos a detalle a continuación:

4.2.1. Geología. El municipio de Campinas está compuesto principalmente por tres terrenos geológicos, dos de ellos pertenecen a la Cuenca de Paraná y el otro corresponde a un

Complejo Cristalino (IG, 1993). En la Cuenca de Paraná, al suroeste se encuentran las rocas sedimentarias del Subgrupo Itararé y al noroeste las Diabasas de la Formación Serra Geral. El complejo cristalino está formado por rocas metamórficas de grado medio y alto del Complejo Itapira y por rocas ígneas de las Suites Graníticas Jaguariúna y Morungaba, ubicadas al este de la región. Además, se encuentran depósitos aluviales cuaternarios a lo largo de todo el municipio (Senna & Kazzuo, 2010) y se evidencian Milonitas asociadas a la Zona de Cizallamiento de Campinas (ZCC) y a la Zona de Cizallamiento de Valinhos (ZCV). Estas zonas de cizallamiento presentan una dirección Suroeste-Noreste y la mayoría de las estructuras y foliaciones encontradas en la región se encuentran paralelas a ellas.

La evolución geológica del municipio de Campinas se resume en una serie de eventos que van desde el precámbrico hasta la actualidad. Inicia con una yuxtaposición de terrenos en el meso-proterozoico, los cuales sufrieron migmatización, generando varias estructuras por las cuales se presentaron intrusiones graníticas en el neo-proterozoico, formando así, el complejo cristalino. Posteriormente, el complejo cristalino fue cubierto por rocas sedimentarias en un ambiente depositacional de alta complejidad durante el pérmico y carbonífero, las cuales fueron intruídas por diques de diabasa durante el desarrollo de eventos tectónicos extensionales en el cretácico inferior. Y finalmente, se presentan manchas de depósitos aluviales recientes correspondientes a arenas gruesas a medias angulosas y mal seleccionadas.

Las edades de las rocas encontradas en el municipio de Campinas varían desde el Precámbrico hasta el Cuaternario, siendo que más del 70% del área es representada por rocas del Fanerozoico, constituidas principalmente por sedimentos de la Cuenca Paraná (Morais, 1999).

Tabla 1. Resumen de la cronoestratigrafía del municipio de Campinas.

Era	Periodo	Terreno	Grupo	Subgrupo/ Formación	Litología y características litológicas
Cenozoico	Cuaternario	Cuaternario Aluvial			Depósitos aluviales arenosos intercalados con finos. Su origen está relacionado con litologías arenosas de la Cuenca Paraná y gneises del Complejo Cristalino.
Mesozoico	Jurásico-Cretácico	Cuenca Paraná	São Bento	Fm Serra Geral	Rocas intrusivas básicas (Diabasas) que cortan las rocas del subgrupo Itararé y en algunos locales las rocas del Complejo Itapira.
Paleozoico	Carbonífero Superior		Tubarão	Subgrupo Itararé	Materiales glaciares continentales y marinos fluviales, deltaicos-lacustres y marinos. Las litologías más comunes son areniscas de granulometría variada, arcosas, conglomerados, ritmitos y unas capas de carbón.
Neo-Proterozoico		Complejo Cristalino	Zonas de Cizallamiento (ZCC y ZCV)		Proto milonitas, milonitas y ultra milonitas de composición granítica con lineaciones de estiramientos pronunciadas.
			Suite Granítica Morungaba		Granitos biotíticos, cuarzo-monzonitas, granodioritas y granitos porfiríticos, equigranulares a inequigranulares con bajo porcentaje de máficos menor al 15%.
			Suite Granítica Jaguariúna		Granitos con hornblenda y biotita, porfiríticos y foliados con porcentajes de máficos entre el 5 a 20%. Granodioritas con hornblenda y biotita con 25% de máficos.
Meso-Proterozoico		Complejo Cristalino	Complejo Itapira	Granitoides gnéisicos	Granitoides gnéisicos con biotita-hornblenda o granate, turmalina y moscovita de matriz media a fina inequigranular.
				Gneises	Gneises bandeados (biotita-hornblenda), esquistosos (moscovita-granate-biotita-sillimanita) o indiferenciados con foliación paralela a las zonas de cizallamiento.

Nota: Tomado y modificado de Análise Crítica da Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para Condições Brasileiras (Zuquette, 1987)

Las rocas precámbricas se sitúan en el contexto regional de la Provincia de Matiqueira y en la porción suroeste del Macizo de Guaxupé según (Almeida, Hasui, & Brito Neves, 1976), sin embargo, trabajos desenvueltos en la década de los 80s e inicio de los 90s reformularon la estructuración de la región (IG, 1993). En dichos trabajos se caracteriza una megaestructuración representada por la yuxtaposición entre terrenos de alto grado, correspondientes al Dominio de Nappe Soxorro-Guaxupé sobre terrenos meta-vulcanosedimentarios y gnéisico-migmatíticos de la Faixa Alto Rio Grande (Campos Neto, Basei, Alves, & Vasconcellos, 1984), esta yuxtaposición se ve reflejada en una unidad que envuelve predominantemente asociaciones metamórficas con granulitos, granitoides gnéisicos y migmatitos, los cuales corresponden en el municipio de Campinas al Complejo Itapira. Para las secuencias metasedimentarias del Complejo Itapira y sus rocas relacionadas, se obtuvieron edades del Meso-Proterozoico alrededor de los 1400ma (Tassinari & Campos Neto, 1988). Estas rocas al sufrir migmatización, generaron varias estructuras que dieron paso a la intrusión de granitoides correspondientes a la Suite Granítica Jaguariúna, y posteriormente, durante un periodo distensivo de la Zona de Cizallamiento de Valinhos, a la intrusión de la Suite Granítica Morungaba durante el Neo-Proterozoico (IG, 1993).

La generación de rocas miloníticas asociadas a las zonas de cizallamiento de Valinhos y Campinas se presentó desde el Neo-Proterozoico hasta el Cámbrico y Ordovícico. Varios elementos estructurales indican que la deformación dúctil de estas zonas de cizallamiento es de naturaleza transcurrente mostrando un comportamiento dextral con componente normal. Sin embargo, posteriormente presentó un comportamiento frágil-dúctil sinistral que dio paso a la intrusión de diques porfiríticos asociados al magmatismo de los granitos del Macizo Morungaba.

Al occidente, las rocas pre-cámbricas son sobrepuestas en contacto erosivo y discordante por las rocas del Subgrupo Itararé, que pertenece al Grupo Tubarão de la Cuenca Paraná, con edades del Pérmico y el Carbonífero. Existe gran dificultad para correlacionar las columnas estratigráficas obtenidas del Subgrupo Itararé, debido a que su ambiente depositacional es altamente complejo. Sin embargo, se ha llegado a un acuerdo en el que se describe a la base una sedimentación continental, con una posterior sedimentación marina, probablemente interglaciar, de plataforma o transicional representado por sedimentos finos. Estos sedimentos finos fueron cubiertos por areniscas correspondientes a un sistema deltaico progradante, sobre en el cual están presentes diamictitos que se asocian a la acción de periodos helados asociados a periodos glaciares. Entre las litologías del Subgrupo Itararé se incluyen areniscas, limolitas, arcillolitas, ritmitos, diamictitos y capas de carbón (IG, 1993).

En el Cretácico Inferior, el Subgrupo Itararé es intruido por diques y silos de diabasas junto con derrames basálticos toleíticos, constituyendo la Formación Serra Geral (Almeida , Hasui, Brito-Neves, & Fuck, 1981). Las intrusiones se presentaron gracias a eventos extensionales que corresponden a la cuarta fase evolutiva de la Cuenca Paraná. En Campinas, la Formación Serra Geral se evidencia al noroeste del municipio, donde se encuentran distribuida no uniformemente en forma de diabasas con edades correspondientes entre los 110 y 135ma (IG, 1993).

Por último, se evidencian depósitos aluviales recientes correspondientes a arenas gruesas a medias angulosas y mal seleccionadas, en discordancia con el Subgrupo Itararé.

Las principales estructuras del municipio corresponden a la Zona de Cizallamiento de Campinas (ZCC) y la Zona de Cizallamiento de Valinhos (ZCV), ambas con una dirección SW-NE, las cuales afectan a la foliación principal del Complejo Itapira y en parte a las Suites Granítica de Jaguariúna

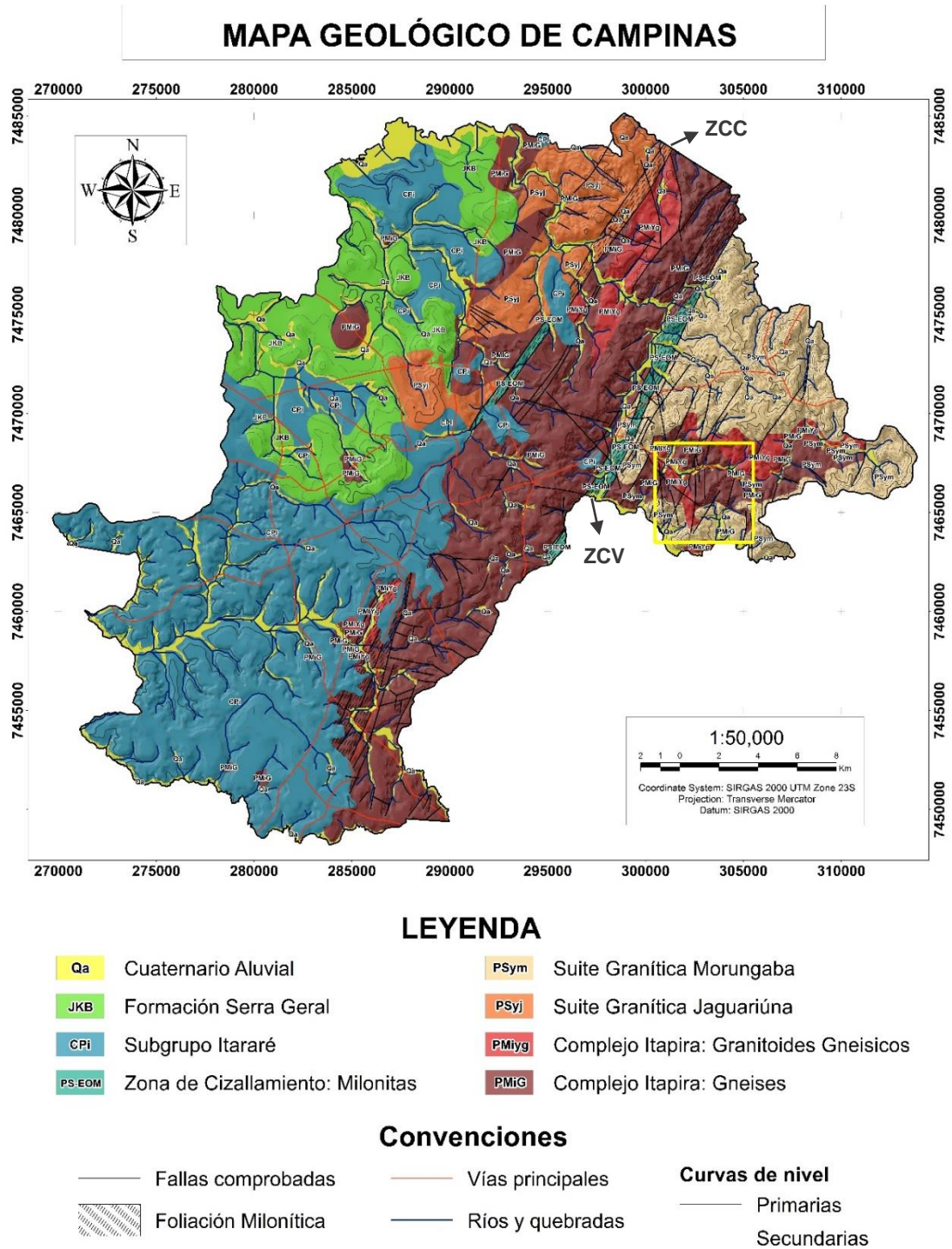


Figura 2. Mapa geológico del municipio de Campinas. Tomado y modificado de: Fernandes, Azevedo Sobrinho, & Teixeira (1993)

(SGJ) y Morungaba (SGM), dividiendo la región en tres dominios estructurales distintos según el IG (1993): El dominio occidental, al oeste de la ZCC, ocurren las rocas de la SGJ presentando foliación gnéssica predominante con orientación NE. El dominio intermedio en la zona central entre la ZCC y la ZCV, presenta rocas muy deformadas con foliación protomilonítica. Y, por último, en el dominio oriental al este de la ZCV predominan los granitos de la SGM donde es maciza y no evidencia foliación, sin embargo, presenta brechas en la zona proximal a la ZCV. Las zonas de cizallamiento son de naturaleza transcurrente oblicua presentando dos fases de deformación: la primera de carácter dúctil, generadora de las milonitas, con un comportamiento de cizallamiento dextral con componente normal, y la segunda con una deformación frágil-dúctil de carácter sinistral, que permitió la intrusión de diques asociados a la SGM.

4.2.1.1. Geología del área de estudio. Según Fernandes, Azevedo Sobrinho y Teixeira (1993), en el área de estudio afloran principalmente tres unidades geológicas: Una unidad metamórfica compuesta por gneises y granitoides gnéssicos correspondientes al Complejo Itapira (PMi), una unidad ígnea donde se evidencian granitos y cuarzo-monzonitas de la Suite Granítica Morungaba (PSYm) y una unidad reciente de depósitos aluviales cuaternarios (QA), las cuales presentan variaciones litológicas y composicionales a lo largo del área, explicadas a detalle en la *Tabla 2*.

El área de estudio se ubica dentro de uno de los tres dominios estructurales de los cuales hace parte en el municipio de Campinas. Este dominio, localizado en la porción oriental del municipio, se encuentra al este de la Zona de Cizallamiento de Valinhos y tiene foliación principal WNW. En él, predominan los granitos de la Suite Granítica Morungaba, en medio de los cuales se sitúa el “Lente gnéssico de Joaquim Egidio”, cuyas rocas se le atribuyen al Complejo Itapira (IG, 1993).

El Complejo Itapira corresponde a rocas supracrustales presentando granitos gnéísicos altamente deformados y gneises con foliación blastomilonítica, encontrándose cuatro diferentes tipos de unidades en el área de estudio según Fernandes, Azevedo Sobrinho y Teixeira (1993): Gneises Bandeados (PMiGb), Gneises Esquistosos (PMiGx), Granitos Gnéísicos Equigranulares (PMiYg) y Gneises Graníticos Facoidales (PMiF). Mostrando variaciones petrográficas y diferencias destacables en los diferentes eventos de deformación que han sufrido cada una de ellas.

La Suite Granítica Morungaba, se encuentra al sur del lente gnéísico de Joaquim Egidio y fue descrita ampliamente por Vlach (1993) en su tesis de doctorado. Cuatro de las siete unidades estratigráficas de granitoides que dicho autor diferencia a partir variables y asociaciones petrográficas, se pueden encontrar en el área de estudio: Granito Biotítico Equigranular Leucocrático (PSYmL), Granito Biotítico Equigranular Hololeucocrático (PSYmH) y Granito Biotítico Equigranular con Moscovita y Granate (PSYmG). Todas ellas haciendo parte del Plutón Oriental que envuelve el Lente gnéísico de Joaquim Egidio.

Estas dos unidades principales se ven limitadas y ampliamente afectadas por la Zona de Cizallamiento de Valinhos, que hace que se presente una gran deformación de dichas rocas, donde se evidencian nuevas foliaciones en el caso de los gneises y brechas en el caso de los granitos. Posterior a la deformación, se depositaron sedimentos del cuaternario correspondientes a aluviones de gran tamaño, que llegan a ser cartografiables a escala 1:25.000.

Cabe resaltar que estas unidades, debido al ambiente tropical en donde se encuentran y a las condiciones climatológicas del medio, han sufrido fuerte intemperismo y evidencian una consistencia media a baja. Además, dichas litologías se ven cubiertas por una espesa capa de

suelos, los cuales son caracterizados y mapeados semi-detalladamente en el ítem de Pedología, basándose en los estudios realizados por el EMBRAPA (2008).

Tabla 2. Descripción de las unidades geológicas presentes en el área de estudio.

Unidad geológica	Nomenclatura	Características litológicas	
Cuaternario Aluvial	QA	Suelos transportados depositados durante el cuaternario.	
Complejo Itapira	Gneises Graníticos Facoidales	PMiF	Granitoides gnéisicos facoidales grises con hornblenda y biotita Leucocrático con matriz media a fina y presenta cuarzos achatados.
	Granitos Gnéisicos Equigranulares	PMiYg	Granitoides gnéisicos biotíticos con Granate, Turmalina y/o Moscovita de color gris a veces rojiza con grano medio a fino, inequigranular.
	Gneises bandeados	PMiGb	Intercalación métrica hasta centimétrica de ortogneis bandeado u homogéneo con biotita, hornblenda y a veces granate.
	Gneises esquistosos	PmiGx	Gneises peraluminosos o gneises esquistosos laminados a bandeados finos a medios con moscovita, granate, sillimanita y biotita.
Suite Granítica Morungaba	Granito Biotítico Equigranular Leucocrático	PSYmL	Granitos biotíticos y cuarzo-monzonitas rojizas a grisáceas de grano medio a grueso, leucocráticas con máficos del 5-15%
	Granito Biotítico Equigranular Hololeucocrático	PSYmH	Granitos biotíticos compactos, rojizos con grano medio a fino, equigranular a inequigranular con menos del 5% de máficos.
	Granito Biotítico Equigranular con Moscovita y Granate	PSYmG	Granitos biotíticos y granodioritas compactas, grises con grano medio a fino, equigranular con 5-10% de máficos, se caracterizan por tener moscovita acompañada por granate.

Nota: Tomado y modificado de: Mapa geológico do município de Campinas (Fernandes, Azevedo Sobrinho, & Teixeira, 1993).

4.2.2. Geomorfología. El relieve de la región pertenece a áreas de transición entre el Altiplano Atlántico, localmente conocido como Altiplano de Jundiá, y una Depresión Periférica. Al este, se presentan formas del terreno accidentadas como montañas correspondientes al altiplano, y formas más suaves como colinas y lomas al oeste, pertenecientes a la depresión periférica.

Según el SEPLAMA (2006) y el IG (1993), la geomorfología del municipio de Campinas está caracterizada por 14 unidades de relieve, las cuales se pueden agrupar en 6 tipos de terrenos, cada uno de ellos con características morfométricas y morfodinámicas particulares:

Tabla 3. Características morfológicas, morfométricas y morfodinámicas del municipio de Campinas.

Tipo de Terreno	Unidades Geomorfológicas	Morfometría	Morfodinámica
Colinoso suavemente ondulado	Colinas medias y amplias (Cma), Colinas amplias (Ca) y Colinas alongadas (Cal)	Pendientes: 2-12% Amplitud: 20-90m	Erosión laminar y en surcos. Cárcavas ocasionales. Erosión de baja a media intensidad. Deposición local de sedimentos.
Colinoso ondulado	Colinas medias (Cm), Colinas pequeñas (Cp) y Colinas disectadas (Cav)	Pendientes: 4-16% Amplitud: 30-80m	Erosión laminar y en surcos de baja intensidad. Cárcavas con erosión de alta intensidad. Deposición local de sedimentos.
Colinoso ondulado a inclinado	Colinas pequeñas y lomas (CpMT), Lomas paralelas (MTp) y Colinas y lomas (CMT)	Pendientes: 5-20% Amplitud: 38-109m	Erosión laminar y en surcos de baja intensidad. Cárcavas con erosión de alta intensidad. Deposición local de sedimentos.
Montañoso ondulado a inclinado	Montañas y colinas de cumbre (MTCc)	Pendientes: 9-21% Amplitud: 30-50m	Erosión laminar y presencia de surcos. Erosión de intensidad baja a media.
Montañoso de inclinación moderada a fuerte	Montaña y lomas (MMT), Escarpes degradados por valles subparalelos (Ev) y Montañas paralelas (Mp)	Pendientes: 12-30% Amplitud: 70-190m	Erosión laminar y en surcos, presencia de cárcavas. Erosión de alta intensidad.
Planicies Fluvial	Planicie fluvial (Pf)	Pendientes: 0-2% Amplitud: >5m	Sedimentación fluvial y por inundación. Baja erosividad.

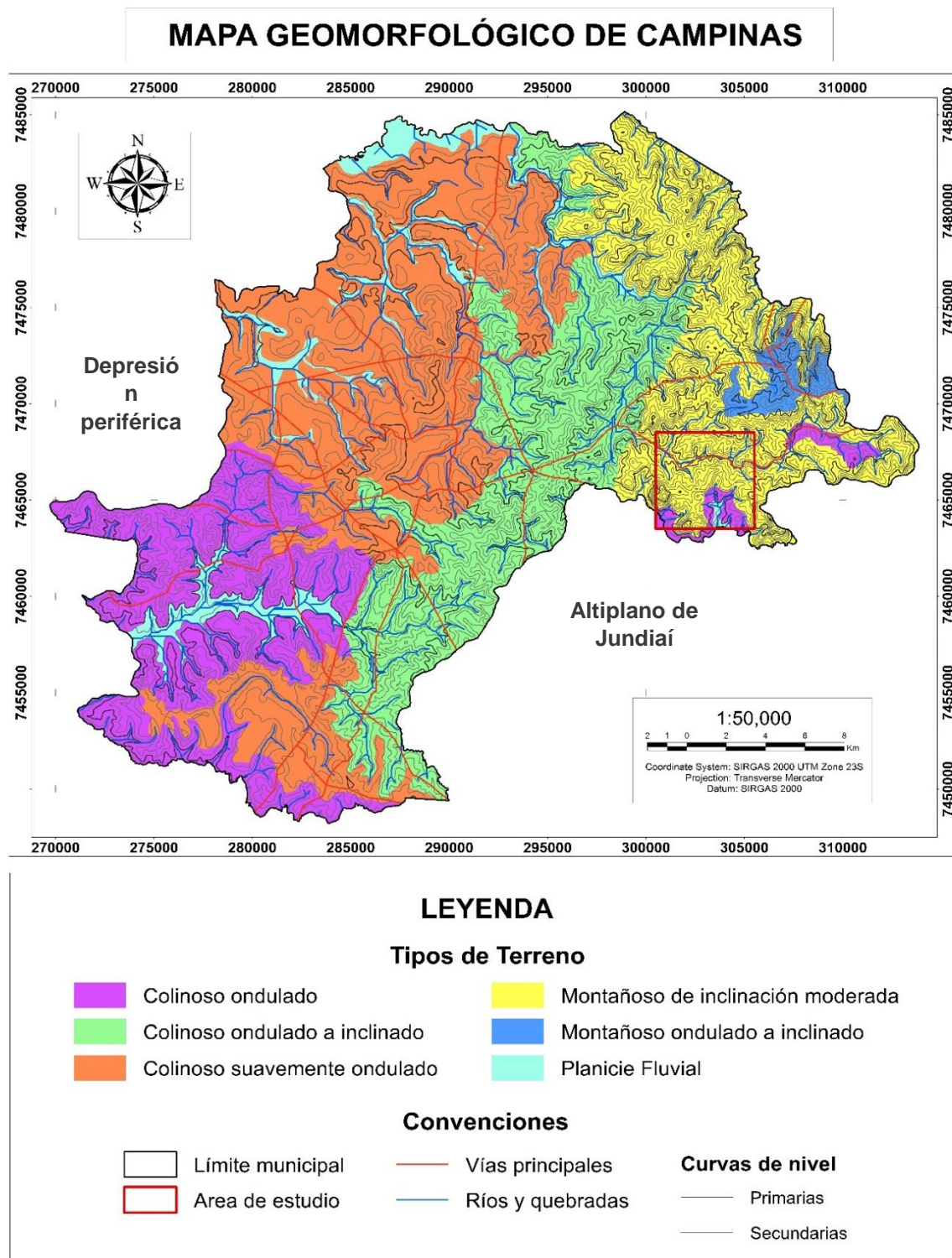


Figura 3. Mapa geomorfológico del municipio de Campinas. Tomado y modificado de: SEPLAMA (2006).

La disposición del relieve se ve influenciada, principalmente, por el tipo de roca que las soportan y sus estructuras asociadas (IG,1993). Como se observa en el Mapa Geomorfológico de Campinas (Figura 4), las geoformas más suaves se ven asociadas a las rocas sedimentarias de la Cuenca Paraná y se ven reflejadas como colinas onduladas y suavemente onduladas, mientras que las más accidentadas se asocian al Complejo Cristalino y a las Zonas de Cizallamiento de Campinas y Valinhos, donde se reflejan como montañas onduladas a inclinadas. La franja de transición entre el Altiplano Atlántico y la Depresión Periférica es la más compleja de toda la región, ya que los límites litológicos no son fácilmente identificables debido a su discontinuidad e irregularidad. La ocupación urbana modificó gran parte de la zona y los materiales no consolidados cubren partes de la franja en cuestión (Zuquette, 1987).

4.2.2.1. Geomorfología del área de estudio. Según el SEPLAMA (2006), el área de estudio hace parte del Altiplano de Jundiaí, donde el tipo de terreno predominante es el montañoso de inclinación moderada, ocupando aproximadamente un 80% de la superficie estudiada. También se encuentran, al sur de la zona, colinas disectadas y planicies fluviales asociadas al Río Atabaía.

Las montañas y lomas (MMT), asociadas al terreno montañoso, tienen formas redondeadas desniveladas, presentando valles erosivos y estrechos, con densidad de drenaje media a alta de tipo subdendrítrico. Están asociadas genéticamente al Complejo Itapira y presentan procesos dinámicos de baja intensidad como la erosión laminar y en surcos, presencia de cárcavas y caídas de bloques ocasionales. En esta unidad se identifican pequeños aluviones a lo largo del curso de los drenajes, que pueden estar condicionados a las estructuras geológicas frágiles locales (IG, 1993). Las colinas disectadas (Cal) presentan formas subniveladas con topes estrechos y convexos, valles erosivos y

acumulativos con planicies aluviales bien desarrolladas. El patrón de drenaje es dendrítico y presenta erosión laminar de baja intensidad y erosividad baja. Está asociado genéticamente a la Suite Granítica Morungaba, y en parte, al Complejo Itapira, rodeando la Zona de Cizallamiento de Valinhos.

Las Planicies fluviales (Pf) comprenden las planicies de inundación y las terrazas aluviales. Estos depósitos pueden presentar hasta 8 metros de espesor y están compuestos por arenas limosas, arenas finas y medias con lentes de arcilla. Poseen formas planas y alargadas a lo largo de los drenajes principales del área, ocurriendo de forma diferenciada.

4.2.3. Pedología. La gran diversidad de la geología y el relieve de Campinas da origen a una gran variedad de suelos en la región (Souza Valladares, Marques Coelho, & Koiti Chiba, 2008). De acuerdo con el *Mapa Pedológico Semidetallado do Município de Campinas* (EMBRAPA, 2008), a escala 1:50.000, la pedología del municipio de Campinas está compuesta por 55 unidades de suelos basándose hasta el cuarto nivel del *SiBCS*, de las cuales fueron definidas 41 unidades simples, 12 asociaciones de suelos y 2 complejos de suelos.

Las unidades denominadas Complejo de Suelos, son formadas por la interacción de diferentes clases de suelos en un espacio reducido, lo cual imposibilita su mapeo de forma separada, incluso en escalas menores a 1:20.000, al contrario de las Asociaciones de Suelos, que normalmente pueden ser separadas a escalas más detalladas (Souza Valladares, Masques Coelho, & Koiti Chiba, 2008).

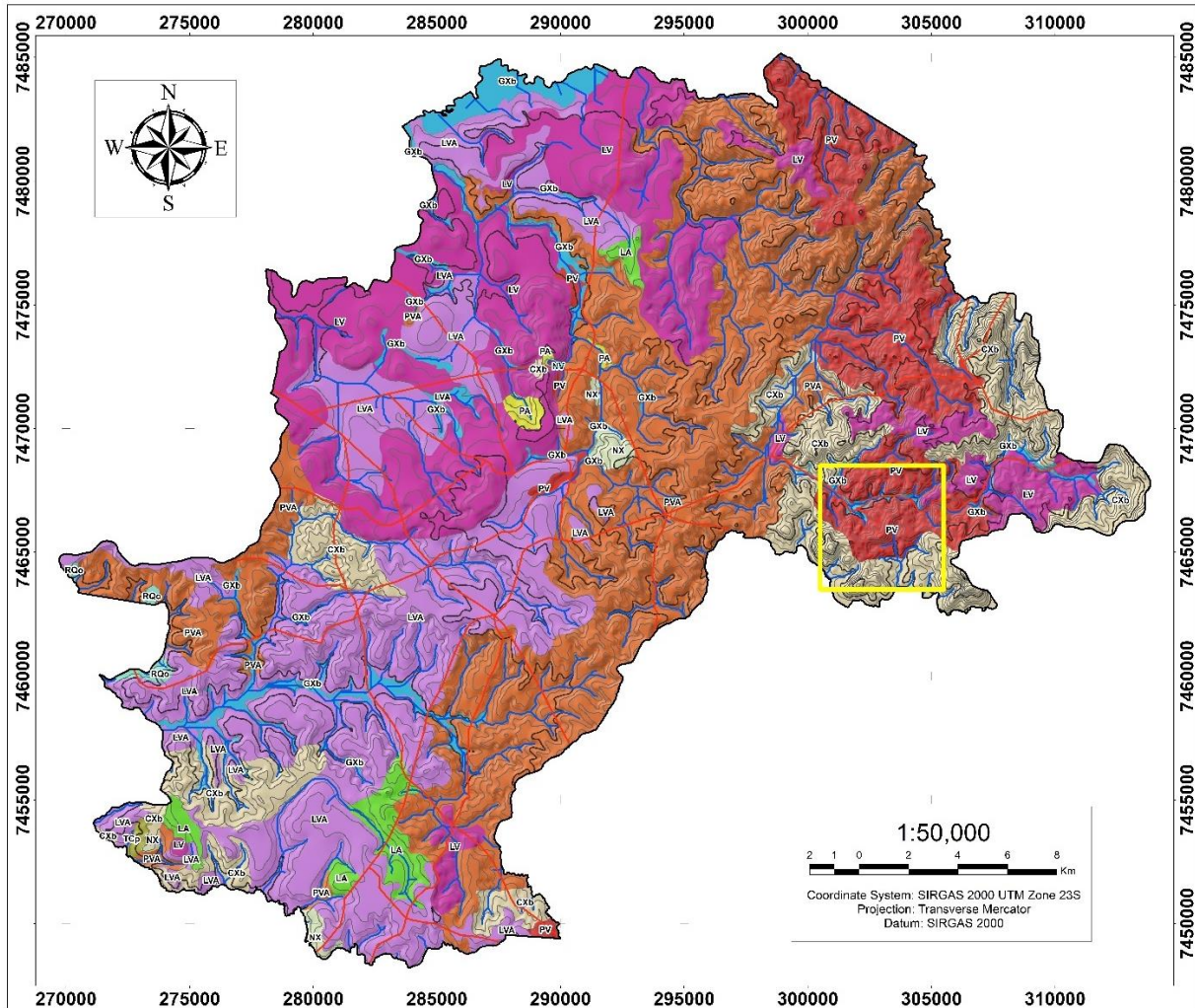
Las 55 unidades clasificadas por el EMBRAPA pueden ser agrupadas en 12 clases de suelos siguiendo el segundo nivel de clasificación del *SiBCS*, donde predominan los Argissoles, Cambissoles, Latossoles, Neossoles, Nitossoles, Luvissoles y suelos complejos fluviales compuestos por Gleissoles, Cambissoles y Neossoles, ocupando hasta el 96% del área del municipio de Campinas. Cada uno de ellos presentan variaciones en su coloración, tipo de horizonte, génesis, textura, relieve, entre otros (*Tabla 4*).

Tabla 4. Descripción de las unidades pedológicas del área de estudio.

Nomenclatura	Unidad Pedológica	Características del suelo
PA	Argissolo Amarelo	Textura media y arcillosa. Horizonte A moderado.
PV	Argissolo Vermelho	Textura media y arcillosa con bloques gravosos. Horizonte A moderado.
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo	Textura media, arcillosa a arenosa. Horizonte A moderado.
CXb	Cambissolo Háptico	Textura media y arcillosa. Horizonte A moderado.
GXb	Complejo de Gleissolo, Neossolo y Cambissolo	Gleissolo háptico, neossolo y cambissolo fluviales con textura diferencial y horizonte A.
LA	Latossolo Amarelo	Textura media y arcillosa. Horizonte A moderado y prominente.
LV	Latossolo Vermelho	Textura arcillosa. Horizonte A moderado y prominente.
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo	Textura media y arcillosa. Horizonte A moderado y prominente.
TCp	Luvissolo Crômico	Textura media y arcillosa. Horizonte A moderado.
RQo	Neossolo Quartzênico	Textura arenosa a media y horizonte A moderado. Asociado en lugares al LVA.
NX	Nitossolo Háptico	Textura arcillosa a muy arcillosa. Horizonte A moderado.
NV	Nitossolo Vermelho	Textura arcillosa. Horizonte A moderado.

Nota: Tomado y modificado de: Mapa Pedológico Semidetalhado do Município de Campinas (EMBRAPA, 2008)

MAPA PEDOLÓGICO DE CAMPINAS



LEYENDA		
Tipo de Suelo		Convenciones
PA	Argissolo Amarelo	 Limite municipal
PV	Argissolo Vermelho	 Área de estudio
PVA	Argissolo Vermelho-Amarelo	 Vías principales
CXb	Cambissolo Háptico	 Ríos y quebradas
Gxb	Gleissolo, Neossolo y Cambissolo	 Curvas de nivel
LA	Latossolo Amarelo	 Primarias
LV	Latossolo Vermelho	 Secundarias
LVA	Latossolo Vermelho-Amarelo	
TCp	Luvissolo Crômico	
RQo	Neossolo Quartzarênico	
NX	Nitossolo Háptico	
NV	Nitossolo Vermelho	

Figura 4. Mapa pedológico semidetallado del municipio de Campinas. Tomado de: EMBRAPA (2008).

La descripción pedológica, tanto del municipio de Campinas como del área de estudio, está basada en el *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)* (EMBRAPA, 2006), el cual se explica detalladamente en el capítulo 5, correspondiente al marco teórico de la investigación.

La diversidad de los suelos de la región se torna evidente cuando los suelos son separados por agrupamientos texturales, atributos químicos y atributos morfológicos. Es común encontrar suelos con textura arenosa a arcillosa, con o sin presencia de gravas, extremadamente ácidos a prácticamente neutros, y con diferentes tipos de horizontes, donde predomina el horizonte A moderado (Souza Valladares, Masques Coelho, & Koiti Chiba, 2008).

4.2.3.1. Pedología del área de estudio. En el área de estudio, se logran diferenciar 4 unidades pedológicas tomando en cuenta hasta el cuarto nivel del *SiBCS*, donde se identifica dos unidades simples, una asociación de suelos y un complejo de suelos asociado al sistema fluvial del Río Atabaía.

El tipo de suelo predominante en el área de estudio es el Argissolo Vermelho-Amarelo, el cual está constituido por material mineral y presenta, en su mayoría, una textura arcillosa con gravas, y un horizonte A moderado, no saturado en bases. En la parte sur de la zona, se encuentra asociado al Cambissolo Háptico, el cual también está constituido por material mineral y presenta una textura media a arcillosa, pero con un horizonte B incipiente.

En el sistema fluvial del Río Atabaía, se identifica un complejo de suelos compuesto por Gleissolos asociados a la acción del nivel freático del río, Neossolos con material orgánico poco

desenvuelto y Cambissolos fluviales, todos con variaciones texturales y de coloración, siendo imposible cartografiarlos separadamente a escala 1:25.000.

Por último, en la porción este de la zona, se observa un Latossolo Vermelho y Vermelho-Amarelo con textura arcillosa muy alterada y baja fertilidad.

4.2.4. Condiciones hidrológicas

4.2.4.1. Hidrología. El agua superficial del municipio de Campinas está caracterizada por 6 cuencas hidrográficas en las que consideran los cursos más importantes para la región, los cuales corresponden a las quebradas Quilombo y Ahumas, y los ríos Capivari, Mirim, Jaguari y Atibaia, siendo en la última donde se encuentra el área de estudio.

Los patrones de la red de drenaje a nivel regional están en concordancia con las variaciones del relieve y secundariamente con las variaciones litológicas. Las rocas del basamento cristalino normalmente controlan las formas de drenaje en las áreas aflorantes (Zuquette, Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras, 1987).

En las áreas de los granitos de la Suite Granítica Morungaba, la isotropía e impermeabilidad de las rocas condicionan el padrón subdendrítico del drenaje y su densidad media a alta (IG, 1993). El patrón de drenaje que se presenta en el área de estudio corresponde a un padrón dendrítico de alta densidad, en donde se presentan valles erosivos y sus canales se encuentran en afloramientos rocosos (SEPLAMA, 2006).

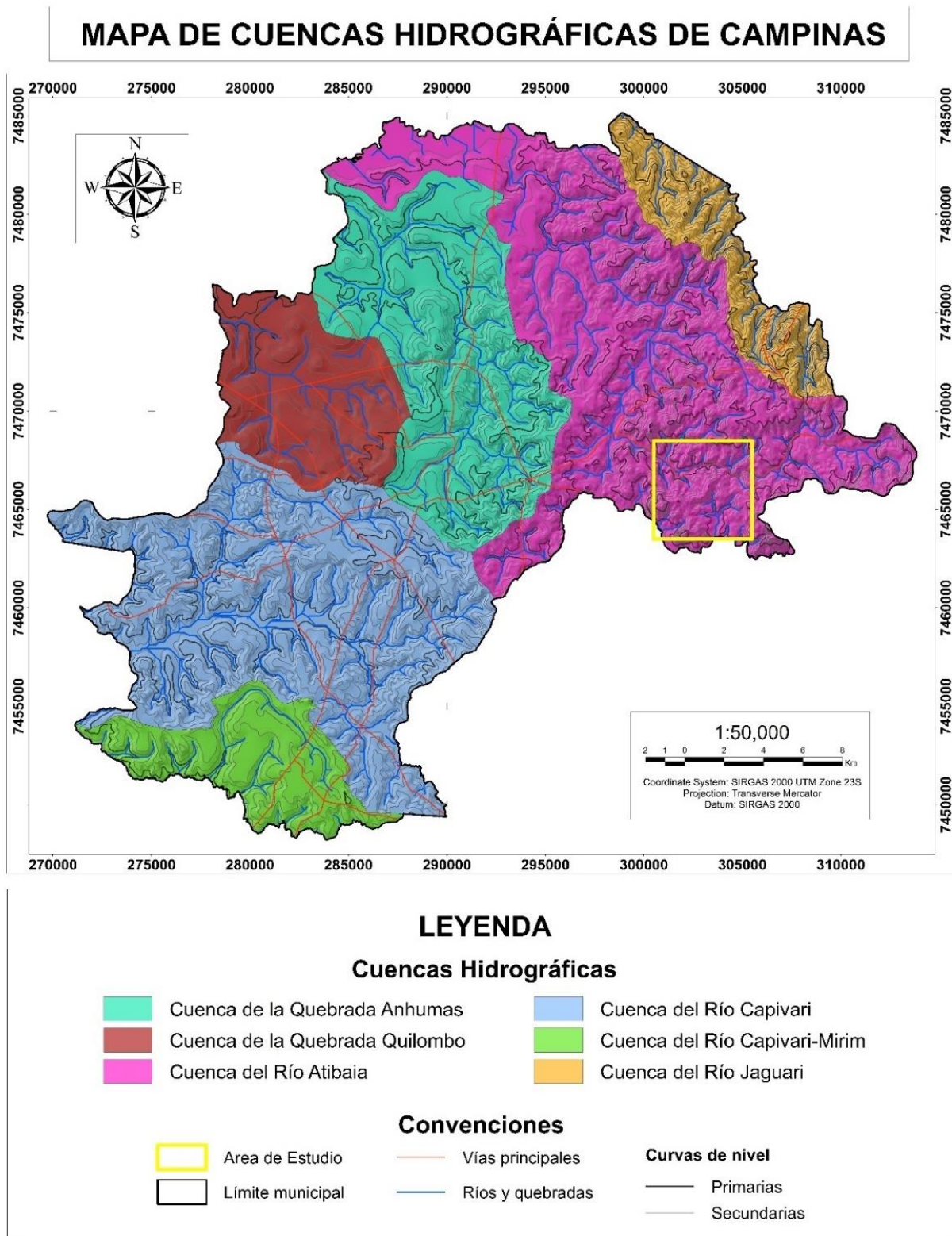


Figura 5. Mapa de cuencas hidrográficas del municipio de Campinas. Tomado de: SEPLAMA (2006).

4.2.4.2. Hidrogeología. En cuanto a las aguas subterráneas, según Zuquette (1987) y el IG (1993), en la región se destacan principalmente tres grandes sistemas acuíferos: Acuífero Cristalino, Acuífero Itararé y Acuífero Diabásio.

El Acuífero Cristalino, es constituido por rocas del basamento cristalino y aflora en la porción este, ocupando cerca del 50% del área del municipio. Está caracterizado por ser de tipo libre, discontinuo, heterogéneo y anisotrópico. Su porosidad varía dependiendo de las fisuras presentes en la litología.

El Acuífero Itararé hace parte del gran Acuífero Tubarão, que está soportado por las rocas sedimentarias del Subgrupo Itararé, ocupando cerca del 30% del área del municipio. Es considerado semiconfinado a confinado, pudiendo ser libre localmente en algunas áreas. Su porosidad varía en función de la litología del subgrupo, siendo regionalmente considerado heterogéneo, anisotrópico y continuo.

El Acuífero Diabásio está constituido por rocas intrusivas básicas y conforma cerca del 20% del área del municipio. Es considerado libre a semiconfinado con su porosidad dependiendo en función de las fisuras presentadas en la litología; es considerado regionalmente disperso, discontinuo, heterogéneo y anisotrópico.

Además de los tres sistemas acuíferos principales, entre los diversos materiales no consolidados se caracteriza el Acuífero Cenozóico, el cual es de tipo libre y se puede separar en tres subtipos: Arenoso, Residual del Cristalino y No consolidados restantes.

El Arenoso ocurre principalmente al suroeste y al ser libre, es utilizado por la población rural, no obstante, es altamente propenso a ser contaminado debido a las industrias y haciendas ubicadas

en la zona. El Residual del Cristalino se presenta principalmente en los valles y en coluviones, son explorados por la población donde su espesor es mayor a 10 metros y no presenta alta cantidad de gravas y bloques. Y los No consolidados restantes son compuestos por material fino y no es explorado ni explotado en la mayoría de la región.

El área de estudio se encuentra sobre el acuífero cristalino, el cual está compuesto por los gneises del Complejo Itapira y la Suite Granítica Morungaba. Este acuífero es considerado libre, ya que presentan diversos tipos de fractura que permiten la transmisión y almacenamiento de agua subterránea (Yoshinaga & Silva , 1997).

Además, en el manto de alteración posee un comportamiento semejante a la de un acuífero de rocas sedimentarias, debido a que su porosidad pasa a ser granular a causa del intemperismo que sufrió la roca inalterada. Su constitución varía de arenosa a arcillosa en función de la composición mineralógica de la roca madre y posee características más homogéneas que la roca fracturada (Instituto Geológico, 1993).

4.2.5. Clima. Según el SEPLAMA (1996), el clima del municipio de Campinas, al estar ubicado entre los 560 y 1080 metros sobre el nivel del mar, es descrito como Subtropical de Altitud y tiene como característica principal que es húmedo en el verano y seco en el invierno.

Según los datos tomados en la UNICAMP por el Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura entre los años 1988 y 2008, las temperaturas medias anuales variaron en torno de los 22.4°C, siendo los meses de junio y julio los más fríos, alcanzando temperaturas medias mínimas de 16.8°C, y los meses de enero y febrero los más cálidos, alcanzando temperaturas medias máximas de 35.8°C. En cuanto a las precipitaciones, la

pluviosidad media anual del municipio para intervalo de años es de 1424.5 mm, siendo normalmente el periodo más lluvioso entre los meses de octubre a marzo y los más secos entre junio y agosto, presentando en años pluviosidades medias entre los 900mm y los 2000m, cuando se registraron fenómenos meteorológicos como El niño.

4.2.6. Sismicidad. Brasil, al estar localizado en una provincia geológica conformada en su mayoría por cratones y escudos, raramente se ve afectado por movimientos telúricos y por lo tanto es considerado estable en términos de sismicidad. El municipio de Campinas no es la excepción, ya que según el Centro de Sismología USP no se han registrado sismos con epicentro en esta ciudad en toda su historia. A su vez, el estado de São Paulo históricamente registra sismos con epicentros localizados en el litoral, a más de 200 km de Campinas, y siempre han sido de baja magnitud. Por ende, el municipio de Campinas es considerado un municipio con riesgo sísmico bajo a nulo.

5. Marco teórico

En este capítulo se expone la base teórica sobre la cual este trabajo de investigación se fundamenta, en otras palabras, los conceptos básicos relacionados con la geotecnia, la mecánica de suelos y la cartografía geotécnica, que son necesarios para lograr entender los diferentes estudios que envuelven el medio físico y que son empleados en este caso de aplicación.

5.1. Mecánica de suelos

La mecánica de suelos es una disciplina que aplica las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería asociados a sedimentos y materiales no consolidados de producidas ya sea por desintegración mecánica y/o la descomposición química de las rocas (Terzaghi , Peck, & Mesri, 1948).

Según Caputo (1967), a pesar de ser considerada una ciencia joven, la mecánica de suelos es un requisito previo para el desarrollo de cualquier obra en la que se requiera información geológica local, donde en la mayoría de los casos la heterogeneidad es la regla y la homogeneidad es la excepción.

El objeto principal de estudio de esta ciencia son los suelos, ya sean residuales o transportados, y por medio de ella, se pueden obtener las propiedades intrínsecas de estos materiales que componen el medio físico. Cabe resaltar que la mecánica de suelos es una ciencia multidisciplinar, por lo que para conseguir entender sus fundamentos es indispensable conocer los estudios referentes a ramas de las ciencias de la tierra como la mineralogía, petrología, geología estructural, geotectónica, geomorfología, geofísica, pedología, hidrología, mecánica de rocas e inclusive meteorología.

La mecánica de suelos en Brasil está representada por la Associação Brasileira de Mecânica dos Solos y los estudios que conciernen esta rama son regidos bajo las normas establecidas por la Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sobre las cuales se realizaron los ensayos de laboratorio empleados en este estudio.

5.1.1. Suelos: Origen y formación. El suelo puede ser considerado como un conjunto de partículas sólidas que encierran vacíos de formas y tamaños variados que, a su vez, pueden estar rellenos por agua, aire o ambos. Dicha masa de suelo, desde el punto de vista de la geotecnia y la ingeniería, puede ser descrita por sus propiedades físicas (peso específico, tenor de humedad, índice de vacíos, etc.) y por sus propiedades mecánicas (resistencia al corte, ángulo de fricción, cohesión, etc.) (Fiori & Carmignani, 2009).

Todos los suelos se originan de la descomposición de las rocas que constituían inicialmente la corteza terrestre (Pinto, 2006), en otras palabras, los suelos son materiales que resultan del intemperismo o de la meteorización de las rocas, ya sea por desintegración mecánica o descomposición química (Caputo, 1967).

Por desintegración mecánica, son formados a través de agentes como el agua, la temperatura, la vegetación y el viento, formándose gravas y arenas (suelos de partículas gruesas), limos (partículas intermedias) y, en condiciones especiales, arcillas (partículas finas). Y por descomposición química se entiende el proceso en que hay modificación química o mineralógica de las rocas de origen. El principal ente es el agua y los principales mecanismos son la oxidación, hidratación, carbonatación y los efectos químicos de la vegetación (Caputo, 1967).

5.1.2. Tipos de suelos. Según Castañeda y Del Toro (1993), el material resultante del intemperismo físico y químico de las rocas puede permanecer en el mismo lugar donde se realizó la transformación a suelo, o puede haber sido llevado a otro sitio por acción de agentes físicos o geológicos, siendo depositados en otra zona. En el primer caso se llama suelo residual y en el segundo caso se llama suelo transportado.

5.1.2.1. Suelos residuales o autóctonos. Son aquellos que permanecen en el lugar de la roca de origen, observándose una transición gradual del suelo hasta la roca (Caputo, 1967). Estos suelos se encuentran en el mismo lugar de su formación, directamente sobre la roca de la cual provienen y es caracterizado por dos principios fundamentales que permiten su identificación: El perfil de alteración y las estructuras heredadas por la roca madre (Castañeda & Del Toro, 1993).

5.1.2.2. Suelos transportados o alóctonos. Son aquellos que sufren la acción de agentes transportadores, pudiendo ser de carácter aluvial, coluvial, eólico o glaciario, variando texturalmente con el tipo de agente que lo transportó y la distancia de transporte (Caputo, 1967). En otras palabras, los que se han depositado en un lugar diferente al de la roca de la cual proviene y pueden ser transportados por acción aislada o conjunta de agentes como el agua, el hielo, el viento, la gravedad, movimientos volcánicos y sísmicos y/o la acción del hombre.

5.1.3. Características principales de los suelos. Los suelos pueden ser caracterizados desde diferentes campos de la ciencia, entre ellos la pedología, edafología, agrología, etc. Sin embargo, en este estudio se analizan las principales características de los suelos desde el punto de vista de la geotecnia, donde se destacan particularmente características como las propiedades de las partículas sólidas, los índices físicos del suelo, su plasticidad y consistencia, las propiedades hidráulicas y las propiedades mecánicas como la resistencia al corte, entre otros. A continuación, se describen las características de los suelos que son consideradas fundamentales para el entendimiento del presente trabajo:

5.1.3.1. Propiedades de las partículas del suelo. Según Caputo (1967), entre las propiedades de las partículas sólidas de los suelos se destacan la naturaleza de las partículas, su peso específico, su forma y granulometría.

- **Naturaleza de las partículas:** Los suelos están constituidos en su mayoría por granos minerales y, en algunos casos, por materia orgánica. Estos granos minerales presentan dos tipos de naturaleza, las fracciones gruesas, que son predominantemente granos compuestos por silicatos, mientras que los granos de fracciones muy finas pertenecen a minerales arcillosos, los cuales hacen parte de tres grupos principales: la caolinita, la montmorillonita y la illita.

- **Forma de los granos:** Entre las formas de los granos se distinguen principalmente las partículas redondeadas o poliédricas (predominantemente limos, arenas y gravas), las partículas laminares o escamosas (minerales arcillosos) y las partículas fibrosas (característica de las turbas).

- **Peso específico de los sólidos (γ_g):** Esta propiedad corresponde a la relación entre el peso de la sustancia sólida y el volumen de la masa de suelo. Su valor se puede determinar teóricamente mediante la fórmula $\gamma_g = \frac{P_s}{V_s}$ o experimentalmente bajo el procedimiento clásico del picnómetro, explicado a detalle en el capítulo de Metodología.

- **Granulometría:** Es el fraccionamiento del suelo en diferentes porciones según el tamaño de sus partículas, siendo separadas por medio de mallas o tamices. Las fracciones constituyentes son clasificadas según las dimensiones de las partículas del suelo en gravas, arenas, limos y arcillas, siendo sus límites dimensionales establecidos en Brasil por la ABNT.

El análisis granulométrico es representado gráficamente por la Curva Granulométrica, donde se traza sobre un diagrama semi-logarítmico en el que se relaciona el tamaño de los granos con el contenido en porcentaje de las partículas, mostrando si el suelo es bien graduado, mal graduado o

de graduación uniforme, y clasificándolo según la dimensión de sus granos por diferentes autores en las categorías previamente mencionadas.

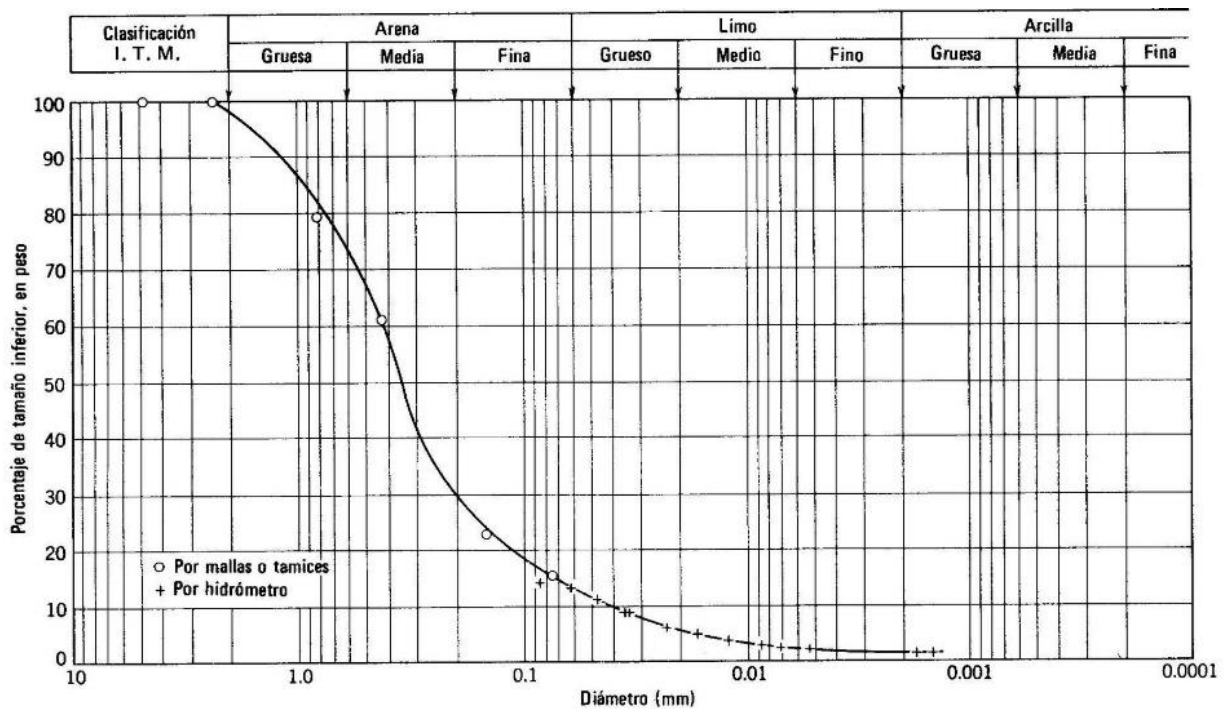


Figura 6. Gráfico de distribución granulométrica mediante el cual se clasifican los suelos según el tamaño de sus partículas. Tomado de: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/curva-granulometrica/>

5.1.3.2. Plasticidad y consistencia. Se denomina plasticidad a la propiedad que tienen algunos materiales de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variar su volumen en forma apreciables y sin desmoronarse o agrietarse (Castañeda & Del Toro, 1993).

El comportamiento plástico de un suelo puede ser analizado mediante los límites de consistencia, también llamados Límites de Atterberg, pues los suelos varían su estado de consistencia, dependiendo del contenido de humedad, desde un estado líquido a un estado sólido

o viceversa. Los límites en donde la masa de suelo al variar su humedad cambia de estado fueron denominados por Atterberg como Límite líquido y Límite plástico.

- **Límite líquido (LL):** Es el punto donde el suelo con cierto contenido de agua pasa de estar de estado líquido a estado plástico.

- **Límite plástico (LP):** Es cuando el suelo al perder humedad pasa de estar de un estado plástico a un estado semisólido o sólido.

La diferencia entre estos dos límites nos da una característica importante de los suelos, la cual es denominada el Índice de Plasticidad (IP), que mide la magnitud del intervalo de humedades en el que el suelo se comporta de manera plástica.

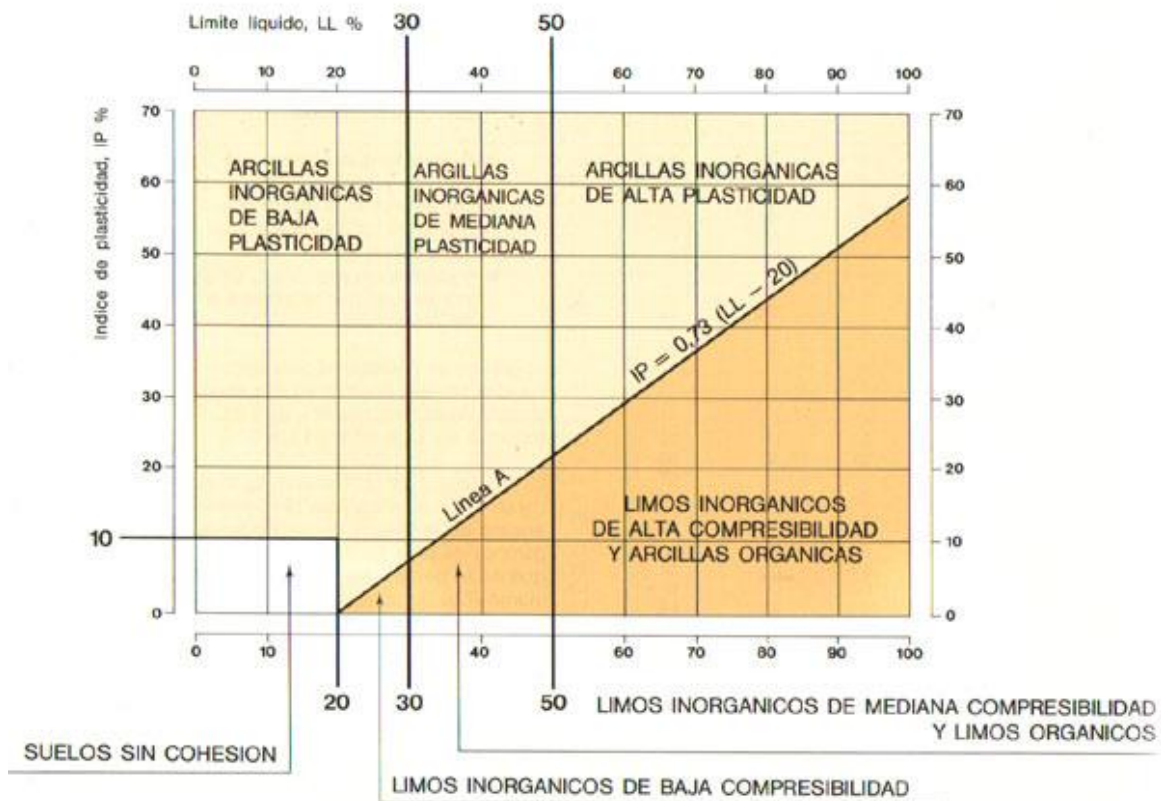


Figura 7. Gráfico de plasticidad de Casagrande para clasificar limos y arcillas. Tomado de:

http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s08.htm

Dicha magnitud se puede calcular mediante la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, y establece el carácter arcilloso de un suelo, donde entré más grande sea el IP, el suelo será más plástico, y por ende este va a ser más arcilloso. En el caso de los suelos arenosos, se dice que el índice de plasticidad es nulo o no plástico (NP), pues en este tipo de suelos el material no posee plasticidad.

Para clasificar los materiales plásticos, tanto arcillosos como limosos, se utiliza el gráfico de plasticidad de Casagrande. En donde se relaciona el LL con el IP, dividiendo los limos y las arcillas en ocho categorías diferentes en donde se destaca su tasa de plasticidad y compresibilidad.

5.1.3.3. Resistencia al esfuerzo cortante o al cizallamiento. La propiedad de los suelos en soportar cargas y conservar su estabilidad, depende de la resistencia al cizallamiento del suelo, pues toda masa de suelo se rompe cuando esta resistencia es excedida (Caputo, 1967).

Según Castañeda y Del Toro (1993), la capacidad de un suelo para soportar esfuerzos de corte depende de dos características principales: la cohesión y la fricción entre las partículas, como se puede observar en la ecuación de Coulomb: $\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\varphi$, donde τ es la resistencia al esfuerzo cortante, c es la cohesión y $\sigma \operatorname{tg}\varphi$ es la contribución de la fricción entre los granos a la resistencia.

La cohesión es el efecto resultante de la atracción entre las partículas debido a las fuerzas electroquímicas que se desarrollan entre ellas, siendo una característica de los materiales arcillosos (Castañeda & Del Toro, 1993). Por ende, en las arenas se debe despreciar esta propiedad por más que presente una cohesión aparente, que se puede presentar cuando el agua se encuentra en estado de presión capilar entre los granos de arena. Cabe resaltar que, si la cohesión llegase a ser 0, la resistencia al cizallamiento del suelo también puede llegar a 0 (Pinto, 2006).

La fricción es la resistencia entre las partículas del suelo a un ángulo formado entre dos fuerzas, una de ellas normal y la otra tangencial al plano (Pinto, 2006). El término de contribución de la fricción entre los granos está compuesto por el esfuerzo normal σ y el factor de fricción $tg\varphi$ donde φ corresponde al ángulo de fricción interna del material, el cual es el ángulo límite que un material puede resistir antes de sufrir una ruptura.

Junto con la compresibilidad y la permeabilidad, la correcta determinación de la resistencia al cizallamiento de un suelo es uno de los problemas más complejos de la mecánica de suelos, y para que pueda ser determinada correctamente, se debe utilizar una muestra que se encuentre en su estado natural, o sea que no haya sufrido ningún tipo de deformación (muestra inalterada). En caso de que la muestra haya sido alterada, se deben reproducir las condiciones adecuadas en las que se pretende alcanzar en el proyecto.

Para determinar experimentalmente la resistencia al corte de un suelo, se puede realizar tres tipos de ensayos en el laboratorio: cizallamiento o corte directo, compresión confinada o simple y compresión triaxial. En este trabajo se usó el primero de estos tres métodos, el cual es detallado en la base metodológica del presente libro.

5.1.4. Sistemas de clasificación de los suelos. Debido a que muchas ramas de la ciencia estudian los suelos, y cada una de ellas los analizan con un objetivo diferente, en la literatura se encuentran variados sistemas de clasificación de suelos. Entre ellos se destacan los sistemas de clasificación con fines agrológicos, edafológicos, pedológicos, ingenieriles, etc. En este caso, se hace hincapié en los sistemas de clasificación utilizados en Brasil que se enfocan en la genética de los suelos (pedológica) y los que se aplican en la ingeniería y la geotecnia.

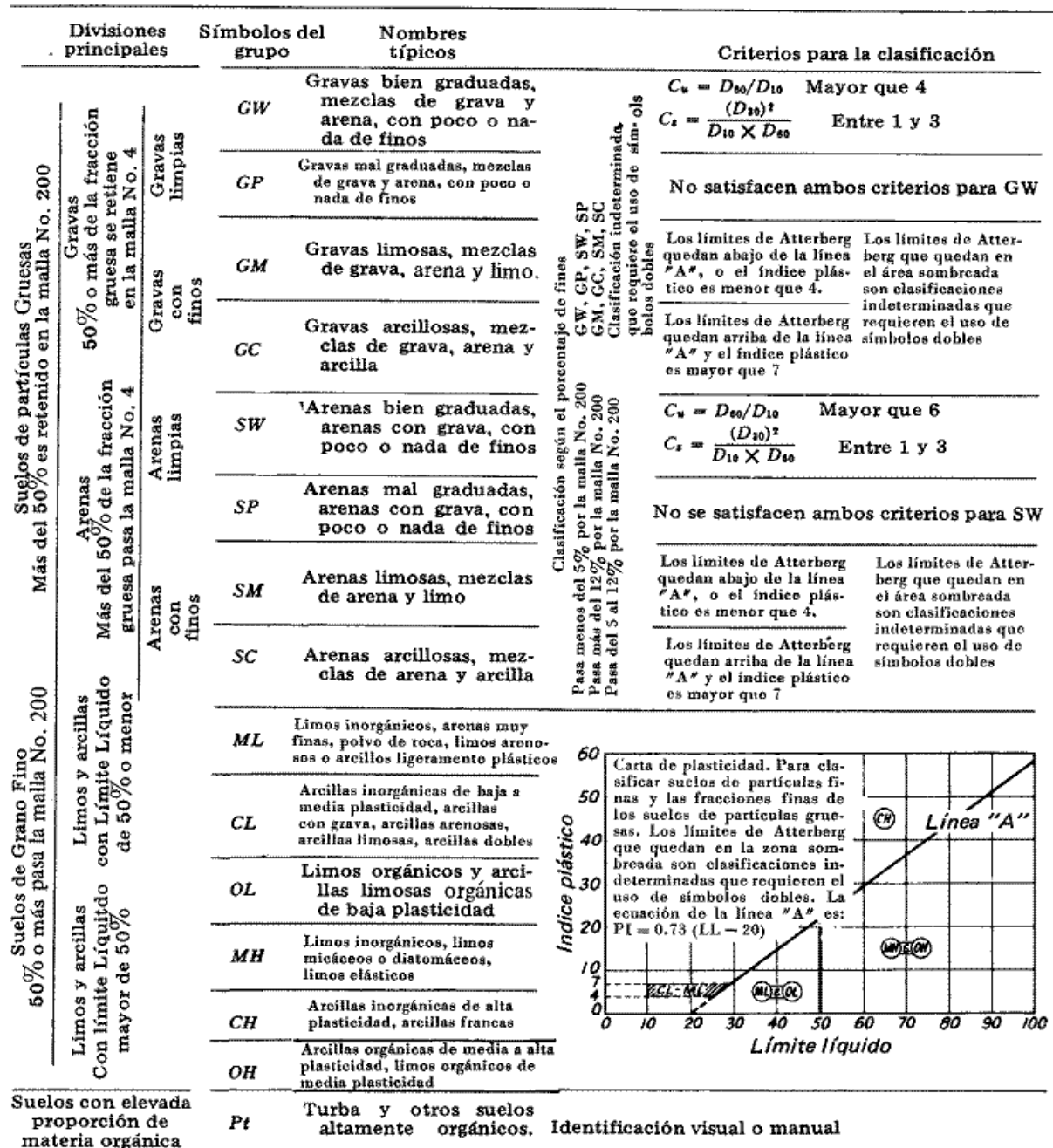


Figura 8. Sistema Unificado de Calcificación de Suelos en la Ingeniería bajo las normas de la ASTM. Tomado de: http://civildocs.blogspot.com/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos_2161.html

5.1.4.1. Clasificación geotécnica de suelos. En la geotecnia, los suelos son clasificados cualitativamente teniendo en cuenta las características mecánicas e hidráulicas de los mismos, siendo el Sistema Unificado de Clasificación (USC) el principal sistema de clasificación usado en Brasil, adoptado de los Estados Unidos de América.

En general, en este sistema los suelos son clasificados en tres grandes grupos: Suelos gruesos (tamaño superior a 0.074 mm), suelos finos (tamaño inferior a 0.074 mm) y turbas (suelos altamente orgánicos). Y los subdivide en varios grupos categóricos basándose en la granulometría y la plasticidad de las partículas más finas de los suelos (figura 8).

En los casos que el suelo no es rico en materia orgánica y más del 50% de las partículas son gruesas, se clasifica como un suelo grueso, de lo contrario, será clasificado como suelo fino. La clasificación de los suelos gruesos y finos se puede detallar en 15 tipos diferentes analizando los resultados de laboratorio que se ven reflejados en la curva granulométrica, los límites de Atterberg y el gráfico de plasticidad.

5.1.4.2. Clasificación pedológica de los suelos. En Brasil, la clasificación pedológica de los suelos está regida por el Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), elaborado por el EMBRAPA (2006), el cual aborda aspectos tales como la formación del suelo, sus atributos y las diferentes clases del suelo encontradas en el territorio brasileño, desde el punto de vista genético.

El SiBCS clasifica los diferentes tipos de suelos mediante la caracterización morfológica de propiedades como el color, textura, consistencia, porosidad, cohesión y presencia de nódulos, concreciones y minerales magnéticos, entre otros. Y por medio de los atributos y los horizontes

que presenta el perfil de suelo, realizan el diagnóstico de estos y clasificándolos jerárquicamente en seis niveles categóricos: órdenes, subórdenes, grandes grupos, subgrupos, familias y series.

Además de la morfología, fisicoquímica y mineralogía del suelo, también se toman en cuenta los aspectos ambientales que afectan el local donde se encuentra localizado el perfil del suelo, tales como el clima, la vegetación, el tipo de relieve, el material originario, las condiciones hídricas y las relaciones del suelo con el paisaje local.

Los órdenes de la clasificación pedológica de los suelos brasileños según el EMBRAPA (2006) son los siguientes:

- **Argissolos:** Agrupación de suelos con horizonte B textural, con arcilla de baja o alta actividad conjugada con baja saturación por base o que el tenor de aluminio sea extraíble en alguno de sus horizontes.
- **Cambissolos:** Agrupación de suelos poco desarrollados con un horizonte B incipiente, o sea que el suelo no está muy degradado, pero tampoco presenta más de la mitad del volumen con las características de la roca original.
- **Chernossolos:** Agrupación de los suelos con horizonte A espeso, oscuro y con estructura del suelo desarrollada. Debe contar con arcilla de alta actividad y alta saturación por base, con o sin acumulación de carbonato de calcio.
- **Espodossolos:** Agrupación de suelos con horizonte B, el cual tiene como principal característica la presencia de acumulación de materia orgánica humificada combinada con aluminio y pudiendo o no contener hierro.

- **Gleissolos:** Agrupación de suelos que sufrieron gleización (proceso hidromórfico donde por exceso de agua, periódico o permanente, aparecen horizontes con precipitaciones de hierro y colores verdosos).
- **Latossolos:** Agrupación de suelos con horizonte B con estado de intemperización alta, presentando minerales muy alterados y oxidados en conjunto con el cuarzo y otros minerales resistentes al intemperismo.
- **Luvisolos:** Agrupación de suelos con horizonte B textural, actividad alta de fraccionamiento de las arcillas y alta saturación por bases.
- **Neossolos:** Agrupación de suelos con poca evolución, sin presencia de un horizonte B diagnóstico bien definido.
- **Nitossolos:** Agrupación de suelos con horizonte B no hidromórfico y muy arcilloso, la actividad de la arcilla es baja y puede que el tenor de aluminio sea extraíble en alguno de sus horizontes.
- **Organossolos:** Agrupación de suelos orgánicos, los constituyentes orgánicos son mayores que los minerales.
- **Planossolos:** Agrupación de suelos minerales con horizonte B que presenta una abrupta transición con respecto al horizonte suprayacente, ya sea horizonte A o E, en relación con la textura.
- **Plintossolos:** Agrupación de suelos con laterización evidente, presentado acumulaciones de óxido de hierro en forma de nódulos con coloración rojiza.
- **Vertissolos:** Agrupación de suelos minerales con presencia de un horizonte subsuperficial con estructura cuneiforme y/o en forma de paralelepípedo, debido a la expansión y compresión de las arcillas.

5.2. Cartografía geotécnica

Según Diniz (2012), la cartografía geotécnica es considerada como una técnica de integración, síntesis y representación de informaciones del medio físico enfocados para la planeación y gestión urbana territorial, reuniendo informaciones pertinentes que orientan el uso y la ocupación del suelo formulando modelos de previsibilidad del comportamiento de los terrenos con el fin de anticipar los diferentes problemas geológico-geotécnicos.

Cerri (1990) afirma que el objetivo de las cartas y mapas geotécnicos es mejorar la utilización del espacio físico disponible, responder por la conservación y protección ambiental de los recursos naturales, exponer los criterios técnicos para la ocupación del territorio y la recuperación de áreas deterioradas, garantizar la seguridad de edificaciones y la población mediante la previsión y prevención de los riesgos geológicos, optimizar los recursos públicos y privados, y orientar estudios específicos para obras de ingeniería.

Cabe resaltar que los datos incluidos en los mapas geológicos permiten deducir información valiosa sobre las propiedades de los materiales, sin embargo, no son suficientes para las aplicaciones que precisa la ingeniería. Por ello se deben considerar aspectos como la descripción geotécnica de suelos y rocas, las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, las condiciones hidrogeológicas y geomorfológicas, y los diferentes aspectos dinámicos que afectan el medio físico (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Estas informaciones son representadas por medio de documentos cartográficos conocidos como cartas o mapas, los cuales comúnmente son utilizados como sinónimos, pero presentan amplias diferencias. Según Zuquette (1987), hay tres tipos de productos cartográficos: el mapa geotécnico, la planta geotécnica y la carta geotécnica. El mapa representa los atributos geotécnicos levantados, sin realización de análisis interpretativa a una escala inferior a 1:10.000. La carta representa los resultados de la interpretación de los atributos que están en un mapa. Y la planta es la representación gráfica realizada a grandes escalas, mayores que 1:10.000, normalmente aplicada en locales donde serán ejecutadas obras específicas.

Diferentes autores han establecido sus aplicaciones y objetivos, los cuales varían según el tipo de carta o mapa y el nivel de detalle deseado en el estudio. Sin embargo, todas las opiniones convergen en que las cartas y mapas geotécnicos sirven como instrumento de planeamiento y orientación de obras (Zaine, 2000).

5.2.1. Clasificación de los productos geotécnicos. En Brasil, el mapeamiento geotécnico tuvo su inicio en la década de los 70's, donde los trabajos realizados hasta 1987 seguían las clasificaciones y líneas metodológicas extranjeras. Sin embargo, esas normas al ser adaptadas al territorio brasileño no conseguían ajustarse a las condiciones ambientales, tecnológicas y socioeconómicas del país. Por lo que Zuquette en 1987 desarrolló una metodología de mapeamiento geotécnico que privilegiaba los medios alternativos para la obtención de atributos del medio físico que se adecuaban a las condiciones socioeconómicas brasileñas y a la baja densidad de informaciones preexistentes, sin perder de vista la calidad de las informaciones.

Desde aquella época, los trabajos de cartografía geotécnica desarrollados en Brasil se rigieron bajo esta nueva metodología, la cual, dependiendo del tipo de carta o mapa, estipula diferentes atributos o características específicas del medio para su correcta elaboración. A continuación, se presentan las diferentes clasificaciones que se emplean para el mapeamiento geotécnico en Brasil, donde se establecen las recomendaciones básicas para el correcto desarrollo del mapeamiento geotécnico, el orden jerárquico de los mapas y la escala en la cual deben ser elaborados.

5.2.1.1. Clasificación según su escala y finalidad. Las escalas adoptadas en el mapeamiento geotécnico están directamente relacionadas con los objetivos a ser alcanzados y con los productos a ser obtenidos (Collaço, 2002). Zuquette (1993) afirma que el detalle de la escala está directamente relacionado con la finalidad del mapeamiento, proponiendo la siguiente división:

Tabla 5. Escalas para el mapeamiento geotécnica usadas según su detalle.

Tipo de escala	Intervalo de Escala
Escala General o Básica	Menor que 100.000
Escala regional	1:100.000 – 1:25.000
Escala semidetallada o detallada	1:25.000 – 1:2.000

Nota: Tomado y modificado de Importância do mapeamento geotécnico no uso de ocupação do meio físico: Fundamentos e guia para elaboração. (Zuquette, 1993)

En cuanto a su finalidad, las escalas generales orientan la planeación de áreas externas y seleccionan áreas específicas para la realización de futuros mapeamientos geotécnicos en escalas más de talladas, mientras que las escalas regionales y semidetalladas tienen como objetivo auxiliar en la ocupación de diversas áreas, obteniendo una mejor forma de ocupación.

5.2.1.2. Clasificación según la forma de presentación de los resultados. Los resultados pueden ser presentados de las siguientes maneras:

- **Mapas de condiciones geotécnicas:** Presentan todos los atributos del medio físico sin zonificar áreas similares para posibles usos, siendo elaborados en escalas generales.
- **Mapa de zonificación geotécnica general:** La separación es realizada a través de áreas similares, describiendo solo sus características sin establecer sus posibles usos de ocupación específica.
- **Mapa de zonificación geotécnica específica o Carta de aptitud geotécnica:** Son elaboradas en escalas semidetalladas o detalladas, presentando diferentes criterios asociados a una finalidad única (fundaciones, escavabilidad, depositación de rellenos sanitarios, estabilidad de taludes, etc.).

5.2.1.3. Clasificación jerárquica según el tipo de carta o mapa. Cerri (1990) reconoce tres tipos de cartas geotécnicas, denominadas cartas geotécnicas clásicas, cartas de susceptibilidad y cartas de riesgo. Según Zaine (2000), las cartas y/o mapas geotécnicos pueden ser agrupados en cuatro tipos: geológico-geotécnico, de riesgos geológicos, de susceptibilidad o de atributos y/o parámetros. Zuquette (1987), clasifica los principales documentos elaborados en el mapeamiento geotécnico en mapas básicos fundamentales, mapas básicos opcionales, mapas auxiliares y cartas derivadas o interpretativas.

- **Mapas básicos fundamentales:** Son utilizados para mapear cualquier región en cualquier escala, representando el medio físico. Entre ellos se encuentran el mapa topográfico, mapa geológico y el mapa de aguas (superficiales y subterráneas).

- **Mapas básicos opcionales:** Son mapas complementarios a los mapas básicos fundamentales, que, dependiendo de las características peculiares de cada región, se pueden tornar en fundamentales. Entre ellos se encuentran el mapa pedológico, los mapas geofísicos, los mapas climáticos y los mapas de ocupación.

- **Mapas auxiliares:** Son denominados mapas de documentación o de datos, siendo de usos indispensable, pues registran los datos cualitativos y cuantitativos, como el tipo, la forma y la localización de la obtención de los datos.

- **Cartas derivadas o interpretativas:** Contienen informaciones obtenidas de la interpretación derivada de otros mapas (auxiliares, básicos fundamentales y básicos opcionales), representando informaciones de las diversas condiciones del medio físico para una o más finalidades.

Posteriormente, en su obra *Cartografía Geotécnica* (2004), Zuquette junto a Gandolfi clasificaron jerárquicamente los mapas y las cartas, estableciendo un orden que separa por niveles los diferentes documentos cartográficos empleados en el mapeamiento geotécnico previamente mencionados, donde incluyen sus características principales y las recomendaciones básicas para su elaboración.

5.2.2. Operaciones realizadas para la confección de mapas. Según Zuquette y Gandolfi (2004), los datos e informaciones que se pretenden representar en un mapa deben ser comprensibles para cualquier usuario y mostrados de la mejor manera posible. Por ello, surge la necesidad de tratarlos mediante operaciones cartográficas hasta que se obtenga el producto deseado, respetando las normas internacionales.

Tabla 6. Clasificación jerárquica de documentos cartográficos del mapeamiento geotécnico.

Nivel Jerárquico	Tipo de documento	Características	Recomendaciones básicas
I	Fundamental Básico	Registra características del medio físico, biológico y antrópico por medio de la variación espacial de los atributos.	Obtención de los atributos y la producción de los documentos pueden ser hechas por diferentes procedimientos y métodos
II	Fundamental de Síntesis	Su objetivo es sintetizar las informaciones de una región sin propiciar análisis para un fin específico	Representar todas las informaciones en un único documento luego de un filtro de atributos. Escalas pequeñas mayores a 1:100.000. Carta de zonificación geotécnica general. (CZGG).
III	Carta derivada e interpretativa	Se produce para condiciones predefinidas, considerando los resultados de análisis. Su finalidad es clasificar unidades del medio frente a una determinada condición de uso.	Cartas de zoneamiento geotécnico específico (CZGE). Delimitación de unidades que presenten niveles de heterogeneidad mínimos compatibles con la escala de trabajo. Se emplean diferentes metodologías de jerarquización y combinación de datos.
IV	Carta analítica básica	Elaborada con base a las informaciones del medio relacionadas a la probabilidad de ocurrencia de un o más eventos naturales.	Son cartas elaboradas a partir de los documentos anteriores con el análisis referente a la ocupación, riesgos y superposición de eventos controlada (manual o automatizada)
V	Carta de pronóstico de riesgos, problemas y limitaciones	Elaborada considerando la interacción de características de los componentes del medio ambiente.	Cartas producidas a partir de análisis de cartas anteriores.
VI	Carta de procedimiento	Tiene en cuenta la ocupación y control de los riesgos.	Considerar las ventajas y limitaciones de las diferentes zonas.
VII	Carta de viabilidad o de potencial	Debe tener como base todas las informaciones del medio ambiente, considerando las relaciones entre los diferentes vectores de ocupación.	Aspectos del medio ambiente, el factor socioeconómico y antrópico deben ser considerados en documentos de escalas detalladas (menores a 1:50.000)
VIII	Carta de orientaciones y conclusiones	Tiene como objetivo permitir la toma de decisiones administrativas y/o económicas.	Se basa en documentos de las fases anteriores y estudios de las demandas futuras considerando el vector de ocupación.

Nota: Tomado y modificado de: Cartografía geotécnica (Zuquette & Gandolfi, 2004).

Un mapa geotécnico requiere para su realización operaciones básicas de adición, selección, generalización y transformaciones de las informaciones especiales referentes a la litología, estructuras de los suelos y rocas, hidrogeología, geomorfología y procesos geológicos (Varnes, 1974). A continuación, se definen las operaciones cartográficas más comunes a la hora de elaborar mapas geotécnicos:

- **Generalización:** Cuando las informaciones detalladas se encuentran organizadas de manera compleja o su representación es confusa, es necesario simplificar dichas informaciones mediante la generalización. Este proceso retira las pequeñas unidades que son envueltas por unidades mayores y suaviza las rugosidades excesivas de los límites, disminuyendo la heterogeneidad, pero a su vez perdiendo el detalle. Por ende, se debe evitar que dichos cambios alteren negativamente el producto, para así no disminuir su calidad.

- **Selección:** Consiste en la separación de las informaciones deseadas y adecuadas para un fin determinado, evitando situaciones complejas sin utilidad alguna. Se debe verificar la relación de el atributo seleccionado con los otros atributos, en especial cuando este está ausente. Cabe resaltar que este proceso se debe realizar anterior a la adición y transformación.

- **Adición:** Es cuando se añaden atributos en áreas mapeadas o no mapeadas, o se realiza la adición de atributos en otro mapa existente. En el primer caso, solo se ve afectada la información que contiene cada unidad, y en el segundo caso, al aplicar la adición se presenta la superposición de mapas, donde al unir los atributos se obtiene un resultado diferente.

- **Covariación:** Cuando se adicionan informaciones a un mapa existente, pueden cambiar sus límites o surgir nuevas unidades, generando informaciones que pueden ser o no covariantes. Las unidades covariantes pueden ser requeridas o exigidas, siendo en el primer caso, cuando las informaciones adicionadas no presentan relación genética con las unidades, generando una

covariación espacial. Por otra parte, en el segundo caso son analizados los atributos que probablemente no presentan los mismos límites de cambios, regionalizando las unidades para lograr definir las correctamente.

5.2.3. Mapa de materiales no consolidados. El mapa de materiales no consolidados procura representar, en forma de unidades homogéneas, todos los materiales suprayacentes a la roca ya sean residuales o transportados, mostrando las características referentes al origen, textura, espesor y comportamiento laterítico de los niveles de alteración (Fernandes de Andrade, 2005).

La importancia del material no consolidado se centra en la evaluación del uso del suelo y las variaciones que dicho proceso puede propiciar. Las variaciones de los tipos de materiales y su distribución espacial tienen gran influencia en la eficiencia del uso del suelo y su ocupación, condicionando procesos de rehabilitación de áreas y manejos (Zuquette & Gandolfi, 2004).

En la clasificación del mapeamiento geotécnico, el mapa de materiales no consolidados corresponde a los mapas básicos fundamentales del nivel jerárquico I, pues muestra informaciones que representan el medio físico sin brindar ningún tipo de interpretación.

Según Zuquette y Gandolfi (2004), para representar correctamente los materiales no consolidados, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los materiales no consolidados no suelen ser continuos y su espesor es variable.
- La ley de superposición no se aplica para los materiales no consolidados.
- Los materiales presentan poca uniformidad, formando capas de formas, edades y posiciones espaciales variables.

- La interacción de los procesos naturales con los materiales geológicos tiene relación directa con los materiales no consolidados.
- Es más sencillo prever el comportamiento geotécnico y ambiental de los materiales rocosos inalterados que el de los materiales no consolidados.

Por ende, es de suma importancia, no solo considerar las características geológicas del material, sino también las características geotécnicas de los materiales a profundidad y en la superficie, con el fin de obtener la mayor cantidad de criterios posibles que ayuden a separar los materiales.

Los materiales no consolidados son separados inicialmente según su origen en dos grupos: residuales y retrabajados. Cottas (1983), diferencia y describe estos dos regolitos de la siguiente manera:

- **Materiales no consolidados retrabajados:** Comprenden los depósitos sedimentarios no consolidados pudiendo ser divididos según su génesis y geomorfología en depósitos coluviales, depósitos aluviales y depósitos de talud.
- **Materiales no consolidados residuales:** Corresponde a aquellos materiales que son producto de la alteración de la roca “in situ”, por lo tanto, no ocurre el transporte del material. Se pueden diferenciar de acuerdo con el grado de alteración causado por el intemperismo, espesor, distribución granulométrica y roca génesis, entre otros.

5.3. Estabilidad de taludes

Bajo el nombre genérico de talud denominamos a la superficie inclinada, con respecto a la horizontal, que adoptan permanentemente o provisionalmente las estructuras de tierra. Estos

pueden ser artificiales, cuando están contruidos por el hombre en sus obras de ingeniería (terraplén o desmonte), o naturales (laderas). Asimismo, pueden ser de suelos, rocas o mixtos, variando a su vez la metodología de estudio (Valiente Sanza, Sobrecases Martí, & Díaz Orrego, 2015).

5.3.1. Estabilidad de taludes en suelos residuales. Los suelos residuales presentan, en lo que se refiere a la estabilidad de sus taludes, algunas particularidades. Entre ellas, se destacan tres conceptos que desempeñan un papel muy importante a la hora de analizar la estabilidad de un talud en suelos: El perfil de meteorización, las estructuras heredadas y el efecto del agua subterránea. Por ende, en los taludes de suelos residuales la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas son las características endógenas que determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud.

Para lograr determinar de forma adecuada la estabilidad de un talud, es necesario el conocimiento geológico y geomecánico de los materiales que forman el talud, de los posibles modelos o mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002). Estos factores pueden ser exógenos (afectando el talud desde el exterior como el clima y la sismicidad) o endógenos (las características geológicas, geométricas y geomecánicas).

5.3.1.1. Factores influyentes en la estabilidad de un talud. La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores

hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geomecánicos (resistencia y deformabilidad). Estos factores son considerados condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales.

La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible el movimiento de un volumen de masa de suelo o roca. La posible rotura de un talud a favor de una superficie depende de la resistencia al corte de esta. En primera instancia, esta resistencia depende de la cohesión y la fricción interna del material.

5.3.1.2. Tipos de roturas en suelos residuales. Los taludes pueden presentar superficies críticas con diferentes tipos de geometría dependiendo de la estructura y homogeneidad de los materiales lo compongan. Los taludes compuestos por suelos residuales generalmente presentan roturas a favor de superficies curvas, siendo su forma condicionada por la morfología y estratigrafía del talud, llegando a ser aproximadamente circular, con su extremo inferior en el pie del talud (deslizamiento de pie), cuando está formado por materiales homogéneos, o semi-circular, pero pasando por debajo del pie del talud (deslizamiento profundo). Bajo ciertas condiciones, como la existencia de estratos o capas de diferente competencia, puede tener a lugar una rotura de superficie planar o de tipo poligonal.

5.3.2. Análisis de estabilidad. Según González de Vallejo et al. (2002), los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento fisicomatemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Estos métodos se pueden agrupar en:

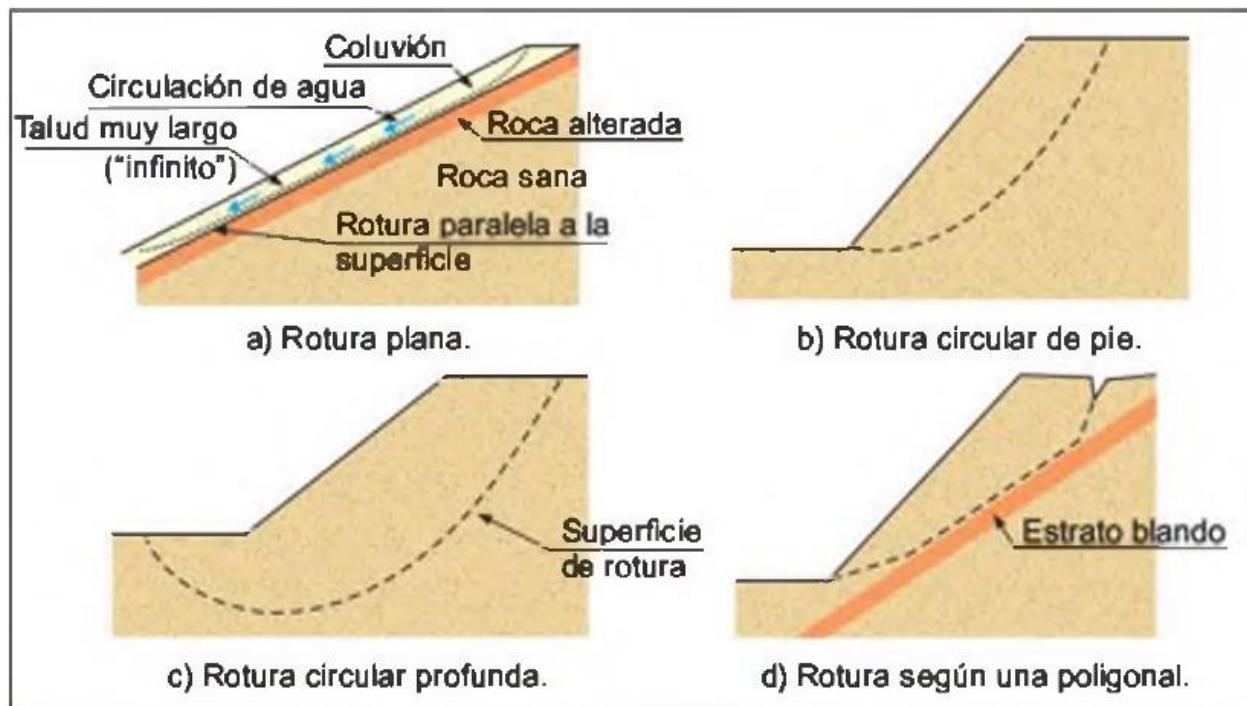


Figura 9. Tipos de roturas en suelos (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

- **Métodos determinísticos:** Estos métodos indican si el talud es o no estable una vez son conocidas o supuestas las condiciones en que se encuentra un talud. Consisten en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para, a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el factor de seguridad del talud. Existen dos grupos: métodos de equilibrio límite y métodos tenso-deformacionales.

- **Métodos probabilísticos:** Consideran la probabilidad de rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas. Es necesario conocer las funciones de distribución de los diferentes valores considerados como variables aleatorias en los análisis, realizándose a partir de ellas los cálculos del factor de seguridad mediante procesos iterativos. Se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad del factor de seguridad, y curvas de

estabilidad del talud, con el factor de seguridad asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia.

La elección del método de análisis más adecuado en cada caso dependerá de las características geológicas y geomecánicas de los materiales, los datos disponibles del talud y su entorno (geométricos, geológicos, geomecánicos, hidrogeológicos, etc.) y el alcance y los objetivos del estudio, grado de detalle y resultados que se espera obtener.

Una vez conocidas las características del talud y la metodología a emplear para su análisis de estabilidad, se procede a elaborar modelos de los taludes donde se evidencien las características determinadas y mediante un software aplicar la metodología de análisis escogida, para así obtener las informaciones sobre una superficie de rotura en particular o realizar un análisis crítico donde se encuentre la superficie que ofrezca menor resistencia en base a los factores de seguridad determinados en el modelo.

6. Metodología

Según Abreu, Augusto Filho e Hirai (2006), hay dos líneas para abordar la realización del mapeamiento geotécnico: el abordaje sintético y el abordaje analítico. En el abordaje sintético, el medio físico es entendido como un conjunto indisociable de factores, donde su dinámica e interrelación es analizada de forma integrada, siendo las causas de los fenómenos identificadas a medida que se entiende el conjunto de procesos instalados en el área de estudio. En el abordaje

analítico, el medio físico es subdividido en los atributos que lo componen, siendo mapeados y entendidos separadamente, para posteriormente recomponer todo como un conjunto.

Este estudio se realizó mediante el abordaje analítico, descomponiendo el medio físico en los atributos que caracterizan los materiales no consolidados, estudiándolos y analizándolos separadamente, para que luego de ser comprendidos, unificar dichas informaciones para la definición y caracterización adecuada de cada uno de los materiales y realizar su respectivo análisis de estabilidad en taludes específicos del área de interés.

6.1. Propuesta metodológica

Para cumplir con los objetivos de la investigación, se estableció el diagrama metodológico representado en la Figura 10, el cual inicia con la recopilación de información bibliográfica y cartográfica, donde se levantan los datos disponibles del medio físico previamente mencionados y, a partir de ello, se caracteriza el área de estudio por medio de dos partes principales: la caracterización cartográfica y la caracterización geotécnica.

En la caracterización cartográfica se corroboran por medio de fotogeología y trabajo de campo los datos que se encontraron en las bases cartográficas preexistentes, logrando así el mapeamiento de los diferentes atributos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidro-climáticos que componen el medio. Y en la caracterización geotécnica, se recolectan muestras de suelos y se caracterizan mediante ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, con el fin de obtener los parámetros geotécnicos intrínsecos de los suelos que se encuentran en el área.

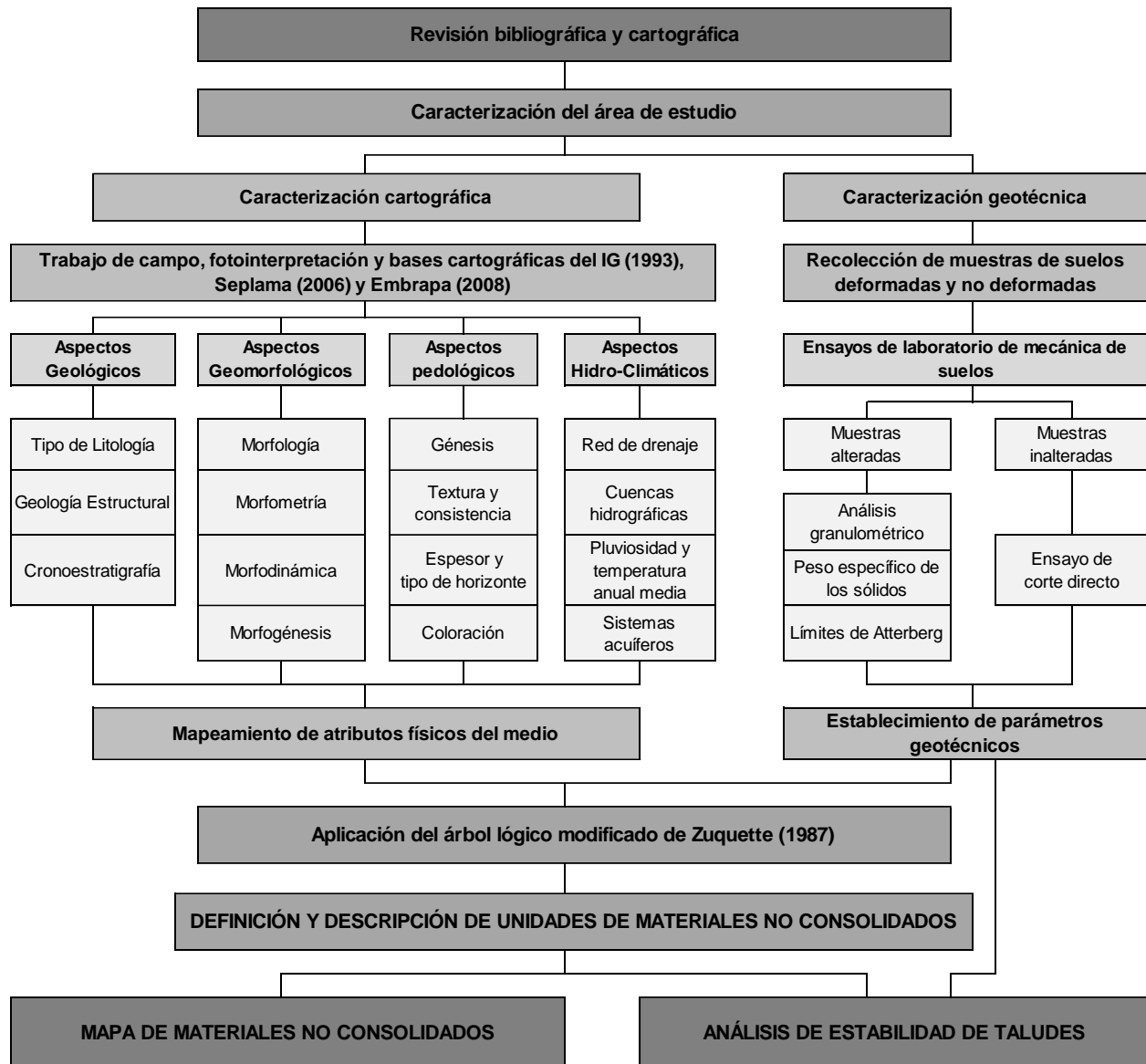


Figura 10. Diagrama metodológico empleado para obtener el mapa de materiales no consolidados y el análisis de estabilidad de taludes.

A partir de la unificación de los mapas e informaciones de los parámetros físicos y geotécnicos, se identifican y definen las unidades de materiales no consolidados por medio del árbol lógico modificado de Zuquette (1987) y, finalmente, se elaboran los dos productos principales de la

investigación: el mapa de materiales no consolidados y el análisis de estabilidad de taludes de algunos suelos residuales de específico interés.

La metodología adoptada para la definición de las unidades de materiales no consolidados se basó en el árbol lógico (Figura 11) modificado de Zuquette y Gandolfi (1987), pues este permite considerar informaciones tanto cualitativas como cuantitativas, desarrollando un gran número de atributos correspondientes a la base cartográfica y a la caracterización y clasificación de los suelos analizados. Los atributos considerados para definir las unidades fueron la génesis del material (si es residual o transportado), el tipo de litología correspondiente a la roca inalterada, la morfología y morfometría del terreno (landform) y los parámetros geotécnicos obtenidos en los ensayos de laboratorio.



Figura 11. Árbol lógico utilizado para establecer las unidades de materiales no consolidado. Tomado y modificado de Zuquette y Gandolfi (1987).

6.2. Etapas metodológicas

6.2.1. Etapa 1: Levantamiento bibliográfico. La primera etapa consistió en el levantamiento bibliográfico enfocado en los conceptos básicos relacionados con la mecánica de suelos, la cartografía geotécnica y la estabilidad de taludes, los cuales son fundamentales para el entendimiento del comportamiento de los suelos de la región y el correcto desarrollo de esta

investigación. Para ello se utilizaron las bases de datos tanto de la Universidade Estadual de Campinas como de la Universidad Industrial de Santander, disponibles en las bibliotecas de cada una de las universidades de forma virtual y presencial.

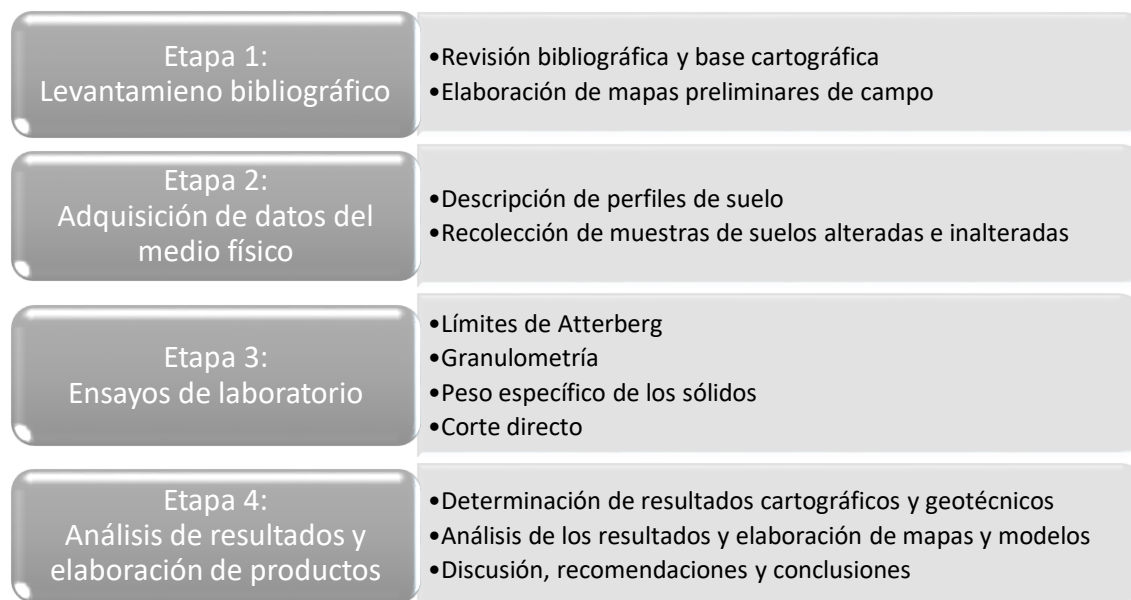


Figura 12. Diagrama resumen de las etapas de actividades desarrolladas en la investigación.

También se consultaron los antecedentes de trabajos realizados en la región, tales como tesis de pregrado y posgrado, artículos científicos y bases cartográficas relacionadas al municipio de Campinas, extraídas principalmente del Instituto Geológico de São Paulo y de identidades gubernamentales como el EMBRAPA y el SEPLAMA, centrando su búsqueda en aquellos datos que estaban enfocados en las características físicas y geológicas del medio, y que se encontraban a una escala adecuada, preferiblemente 1:25.000 o al mayor detalle disponible.

Basándose en dichas bases teóricas y cartográficas, se elaboraron los mapas preliminares de campo usando la información existente de la geología y geomorfología de la región en conjunto con fotografías aéreas. A partir de la superposición de estos datos, se obtuvo una noción de los

diferentes materiales que se podían encontrar en la zona y con base en ello, se plantearon los puntos objetivo para la descripción de los perfiles de suelos y su respectivo muestreo.

Por último, se consultaron las normas técnicas estipuladas por la *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*, las cuales brindan las especificaciones técnicas para el adecuado desarrollo de las actividades de campo y laboratorio tales como el muestreo de los suelos y los ensayos de mecánica de suelos.

6.2.2. Etapa 2: Adquisición de datos del medio físico. La adquisición de los datos del medio físico se dio por el conjunto de las informaciones obtenidas de forma directa (descripción en campo) e indirecta (fotointerpretación) de los materiales del área de estudio. Las informaciones indirectas se obtuvieron por medio de la interpretación de imágenes aéreas y satelitales junto con el análisis de los datos expuestos en los mapas de la base cartográfica previamente recopilada, suponiendo la localización aproximada de los límites de los materiales de la zona de interés. Las informaciones directas se hallaron mediante la observación en trabajo de campo, corroborando los datos geológicos y geomorfológicos previamente consultados y adquiriendo datos referentes a los materiales no consolidados a partir de dos actividades principales: la descripción detallada de diferentes perfiles de suelo aflorantes y la recolección de muestras de suelos alteradas e inalteradas en dichos perfiles siguiendo la normatividad estipulada por la ABNT (1986a).

6.2.2.1. Descripción de perfiles de suelo en superficie. Para la descripción de los perfiles de suelo se detallaron las siguientes características morfológicas y geológico-geotécnicas:

- Dimensiones del afloramiento y espesor del perfil del suelo en superficie.

- Grado de alteración de la roca y consistencia relativa.
- Composición mineralógica de los materiales y datos estructurales de las discontinuidades presentes en el afloramiento.
- Horizontes del perfil de suelo especificando su génesis, coloración, textura y espesor de cada uno de ellos.
- Tipo de substrato rocoso (si fuese posible su identificación).

Este proceso se ejecutó en al menos un perfil de suelo de cada tipo de litología presente en el área de trabajo, con el fin de lograr identificar todos los materiales de carácter residual que se encuentran en la zona.

6.2.2.2. Recolección de muestras de suelo. Una vez descrito el perfil del suelo, se recolectaron muestras de suelos alteradas e inalteradas siguiendo la normatividad estipulada por la NBR 9604 (ABNT, NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas, 1986a). Para ello, era fundamental que en el perfil de suelo aflorante se pudiera extraer el volumen de material necesario para la realización de los ensayos de laboratorio.

Las muestras alteradas son aquellas que se retiran destruyendo o modificando sus características in-situ por medio de la fragmentación del suelo y son usadas para determinar los índices físicos del suelo, las propiedades físicas de las partículas que lo componen y su plasticidad y consistencia. Según la norma, se estima que se debe recolectar al menos 5 kilogramos de material disgregado, sin importar si se da la mezcla de los materiales de los diferentes horizontes, para poder realizar con éxito las diferentes pruebas de laboratorio.

Se recolectaron 10 muestras alteradas pertenecientes a 5 perfiles de suelo de carácter residual. En los casos donde el perfil de suelo estaba cubierto por materia orgánica, fue necesario retirarla completamente y, una vez retirada la costra orgánica, se fragmentó y se recolectó el suelo disgregado. En el caso donde el perfil era homogéneo, se recolectó solo una muestra de suelo alterada. Cuando el suelo era heterogéneo, se identificaron los diferentes horizontes y se recolectó una muestra para cada uno de ellos.

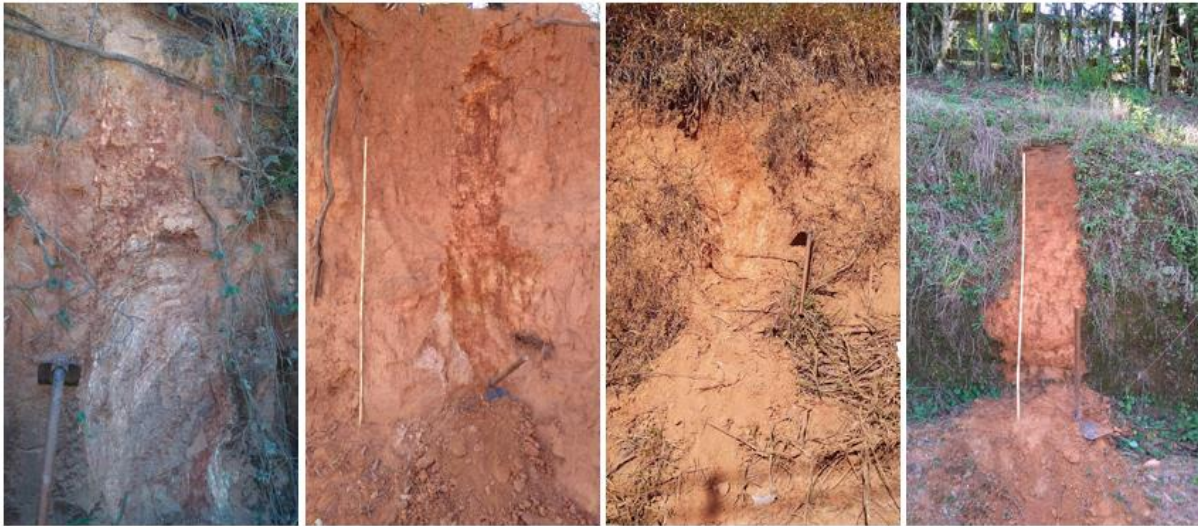


Figura 13. Perfiles de suelo donde fueron tomadas algunas de las muestras alteradas en campo.

Las muestras inalteradas, son extraídas de tal forma que no sufran alteraciones y conserven sus características “in-situ”. Estas muestras deben ser recolectadas en forma de bloque, cuidadosamente recortadas y debidamente condicionadas para que conserven sus características de humedad y estructura. Para ello deben ser aisladas del medio ambiente y guardadas estratégicamente para que no se vean alteradas sus propiedades intrínsecas, ya que dichas características serán analizadas posteriormente en el laboratorio.

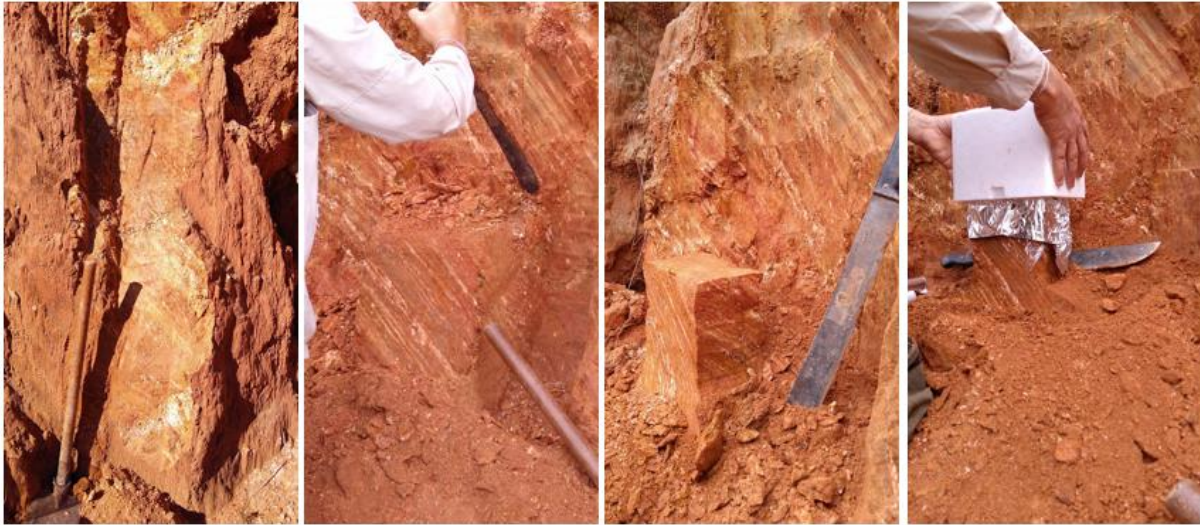


Figura 14. Procedimiento empleado para recolectar las muestras inalteradas en los perfiles de suelo.

Se recolectaron 3 muestras inalteradas pertenecientes a 3 perfiles de suelo aflorantes, siendo moldeadas y guardadas en cajas de poliestireno expandido de 3 litros, de manera que no sufrieran ningún tipo de compactación o disgregación del material. Para evitar la pérdida de humedad, las muestras fueron recubiertas en papel filme o vinipel y papel aluminio, preservando las características “in-situ” de las muestras.

6.2.3. Etapa 3: Ensayos de laboratorio. En el *Laboratório de Mecânica dos Solos*, ubicado en la Facultad de Ingeniería Civil de la UNICAMP, se realizaron cuatro ensayos de laboratorio con el fin de caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos recolectados. Los ensayos desarrollados fueron la determinación del peso específico de los sólidos, el análisis granulométrico de las partículas, los límites de consistencia de Atterberg y la resistencia al corte directo.

Para obtener los resultados deseados en los diferentes ensayos de laboratorio se realizó la preparación de las muestras siguiendo la norma NBR 6457 (ABNT, NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compatação e ensaios de caracterização, 1986b).

En el caso de las muestras alteradas, se separaron y machacaron los granos con el fin de evitar su acumulación en forma de grumos y homogenizar la muestra. Una vez separados, se secaron en el horno hasta perder totalmente su humedad.

Posterior al secado, fueron tamizados los granos de las muestras despreciando las partículas de tamaño grava y dividiéndolas en dos porciones, la primera con el tamiz 10 (2 mm) para el ensayo de análisis granulométrico por tamizado, y la segunda con el tamiz 40 (0,42 mm) para los ensayos restantes.



Figura 15. Procedimiento empleado para la preparación de muestras de suelo alteradas.

En el caso de las muestras inalteradas, se deben preparar en un cuarto húmedo o, en caso tal que no haya disponibilidad de cuarto húmedo, realizar el moldeo de ellas en el menor tiempo posible, con el fin de mantener las características naturales de la muestra intactas.

En esta práctica, se modelaron cuidadosamente las muestras, sin realizar ningún cambio en la estructura original, en forma cilíndrica con ayuda de anillos metálicos del diámetro requerido en la prensa de corte directo (6,35 cm), y posteriormente fueron nuevamente cubiertas para mantener sus propiedades intrínsecas.



Figura 16. Procedimiento empleado para la preparación de muestras de suelo inalteradas.

6.2.3.1. Peso específico de los sólidos. Este ensayo se realiza bajo las directrices de la norma NBR 6508 (ABNT, 1984a), la cual orienta como determinar la densidad de las partículas sólidas que constituyen el suelo y, a partir de ello, calcular el peso específico de los sólidos.

Primeramente, se pesó un picnómetro vacío y los 50g de suelo individualmente, se depositó el suelo en el picnómetro con ayuda de un embudo y se calculó su peso en la báscula. Posteriormente, se le agregó agua al picnómetro y con ayuda de una bomba de vacío se removió el aire que se encontraba dentro de las partículas del suelo. Una vez retirado el aire, se vertió agua con cuidado, evitando filtrar aire en los poros del suelo, hasta la línea de aforo y se pesó el conjunto picnómetro + suelo + agua.

Por último, se midió la temperatura de la muestra y se pesó el picnómetro solo con agua, con el fin de obtener la curva de calibración del picnómetro, la cual se usa para determinar el factor de corrección usado para despreciar la influencia de la temperatura en el ensayo.



Figura 17. Procedimiento experimental para determinar el peso específico de los suelos.

6.2.3.2. Análisis granulométrico. Para determinar la composición textural de los suelos, se realizó el análisis granulométrico conjunto, donde obtienen las curvas de distribución granulométrica y el porcentaje granulométrico acumulado de los suelos mediante el tamizado de las partículas y el análisis de taza de sedimentación de los limos y arcillas siguiendo la norma NBR 7181 (ABNT, 1984d).

El tamizado se usó para determinar las fracciones de las partículas con tamaños mayores a 0,075 mm, pues los granos de tamaños limo y arcilla son determinados a detalle mediante el ensayo de sedimentación. Una vez separadas y secadas, se vertieron las porciones de suelo en un conjunto de tamices, dispuestos en una columna de mayor (#10) a menor diámetro (#200), terminando hasta

los 2 mm de abertura. Una vez realizada la separación mediante agitación, se recolectaban los residuos de cada tamiz y se pesaba el suelo retenido en cada uno de ellos.



Figura 18. Procedimiento para determinar la granulometría de los suelos mediante tamizado.

Para el análisis de las fracciones menores se determinó el diámetro de las partículas de tamaño limo y arcilla por medio del método indirecto basado en la expresión matemática de la Ley de Stokes.

En este ensayo se realizó la inmersión 50g de suelo en agua destilada y se le adicionó un defloculante (usado para que los valores obtenidos en la curva granulométrica sean del tamaño de las partículas aisladas y no de la aglomeración de partículas menores). La mezcla fue depositada en una probeta, dejándola descansar por 12 horas y, después de dicho intervalo, se realizaron las medidas en intervalos de tiempo establecidos con ayuda de un densímetro, un cronómetro y un termómetro, desde 30 segundos hasta 24 horas, con el fin de obtener las velocidades de caída de las partículas en agua mediante la lectura de la densidad de la mezcla dispuesta en la probeta.



Figura 19. Procedimiento de sedimentación para determinar la granulometría de los suelos.

6.2.3.3. Límites de consistencia. Este ensayo tiene como propósito hallar los límites de consistencia de las diferentes muestras de suelo. Para ello, se analizaron el Límite plástico (LP) y el Límite líquido (LL) de cada uno de los materiales, y a partir de ellos, el Índice de Plasticidad (IP) de los mismos.

El Límite Plástico corresponde a la transición entre el estado plástico y el estado semi-sólido de un material y se determinó siguiendo la norma NBR 7180 (ABNT, 1984b). El límite líquido define el contenido de humedad en el cual un suelo pasa de estado plástico a líquido y fue determinado mediante la norma NBR 6459 (ABNT, 1984c).

Inicialmente se estableció para cada muestra si el suelo era o no plástico humedeciendo porciones de suelo y moldeándolas en pequeños cilindros de 3 mm de diámetro. Si el suelo se quebraba antes de llegar al espesor establecido, era automáticamente considerado no plástico. Si la muestra no se quebraba, era moldeada hasta la forma deseada, teniendo en cuenta que debía presentar pequeñas fisuras, y se colocaba en una capsula metálica para someterlo al proceso de

secado en la estufa. Se pesaron las muestras antes y después del secado, con el fin de determinar la pérdida de humedad y así establecer el límite plástico.

Para determinar el límite líquido, la muestra fue colocada en el aparato de Casagrande (Figura 20) de tal forma que cubriera uniformemente su superficie total. Se hizo una abertura, con ayuda de un cincel, justo en la mitad de la muestra y se golpeó la concha de manera constante hasta que la abertura se cerrara totalmente, anotando los golpes que fueron necesarios para el proceso.



Figura 20. Aparato de Casagrande utilizado para determinar el límite líquido de los suelos.

El material dispuesto en la abertura se retiró y se introdujo en una capsula, con el fin de pesar las muestras antes y después del secado. Este proceso se repitió el proceso 3 veces alterando el valor de humedad inicial de la muestra en cada uno de los ensayos.

6.2.3.4. Corte directo. Consiste en someter una muestra cilíndrica del suelo en su estado natural para determinar, bajo una tensión normal (σ), la tensión de cizallamiento (τ) necesaria

para provocar la ruptura. Este ensayo es muy común para determinar los valores de cohesión y ángulo de fricción de manera sencilla y aceptable, y fue realizado bajo la norma americana D3080 (ASTM , 1972).

Una vez preparadas las muestras y dispuestas en forma cilíndrica, se introdujo el material en un recipiente metálico que se inserta en la prensa de corte directo, donde le es aplicada una fuerza normal a lo largo del tope del recipiente y una fuerza de cizallamiento horizontal que deforma la muestra generando un plano de cizalla en donde se ve reflejado el corte. Los ensayos fueron sometidos bajo 3 tensiones diferentes (50 KPa, 100 KPa y 200 KPa) con el objetivo de obtener un promedio de las medidas que fuera confiable y consistente.



Figura 21. Procedimiento del ensayo de cizallamiento directo para determinar la resistencia al corte.

A partir de la magnitud de las fuerzas normal y de cizallamiento, se obtuvieron los gráficos de Tensión de cizalla vs Deformación específica y de Tensión de cizalla máxima vs Tensión Normal, de los cuales se halló la recta que caracteriza la ecuación de Coulomb, determinando la cohesión (corte con el eje y) y el ángulo de fricción interna (en función de la pendiente).

6.2.4. Etapa 4: Análisis de resultados y elaboración de productos. Esta última etapa correspondió a la determinación, análisis e interpretación de datos y resultados, de los cuales se elaboraron los productos finales y se desarrolló el informe final del trabajo de investigación.

6.2.4.1. Determinación de resultados.

- **Parámetros geotécnicos:** A partir de las mediciones de laboratorio, se elaboraron los gráficos y las tablas que exhiben los diferentes parámetros geotécnicos para cada una de las muestras analizadas. Estos resultados fueron determinados y graficados en hojas de cálculo de Excel de la Suite de Microsoft Office.

- **Mapas temáticos:** Mediante el software ArcGIS 10.5 se ejecutó el procesamiento de imágenes y modelos de elevación y, a partir de los datos obtenidos en campo y la fotointerpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, se editaron cada una de las capas necesarias para la confección de los diferentes mapas temáticos, generando los mapas de documentación, geología, morfología, morfometría y pedología del área de estudio.

6.2.4.2. Análisis de resultados.

- **Caracterización geotécnica:** Se realizó la identificación de las unidades de materiales no consolidados del área de estudio por medio de la metodología modificada de Zuquette & Gandolfi (1987) y, a partir de ello, se diseñó el mapa de materiales no consolidados.

Este mapa se generó mediante el procesamiento de los mapas temáticos en el software ArcGIS 10.5. a través de herramientas de geoprocésamiento que permitieron la aplicación de operaciones para la confección de mapas tales como la adición, selección y generalización de atributos.

La descripción y caracterización de cada una de las unidades establecidas se basó en los datos extraídos de la bibliografía consultada, los parámetros obtenidos en los ensayos de laboratorio y el levantamiento de informaciones en campo de los perfiles de suelo.

- **Análisis de estabilidad de taludes:** Una vez fueron definidas y caracterizadas geotécnicamente las unidades de materiales no consolidados, se realizó el análisis de estabilidad para tres taludes puntuales mediante el software Slide 7.0 de Rocscience. A través de modelos determinísticos basados en las características físicas y las propiedades intrínsecas de los materiales, se halló la superficie crítica de falla estableciendo el orden de magnitud de factores de seguridad de cada uno de los taludes.

Las características del modelo y los parámetros utilizados para la determinación del orden de magnitud del factor de seguridad y la superficie de falla principal fueron los siguientes:

- Tipo de material: Suelo residual homogéneo.
- Tipo de resistencia: Mohr-Coulomb
- Parámetros del material: Peso específico, cohesión y ángulo de fricción.
- Parámetros hidrológicos: Superficie de agua nula.
- Tipo de superficie de falla: Circular
- Método de búsqueda de superficies: Auto refinada (20 divisiones, 20 círculos por división y 10 interacciones)
- Métodos de análisis determinístico: Bishop Simplified, Jambu Simplified y Spencer.

7. Resultados

7.1. Mapas temáticos

7.1.1. Mapa de documentación

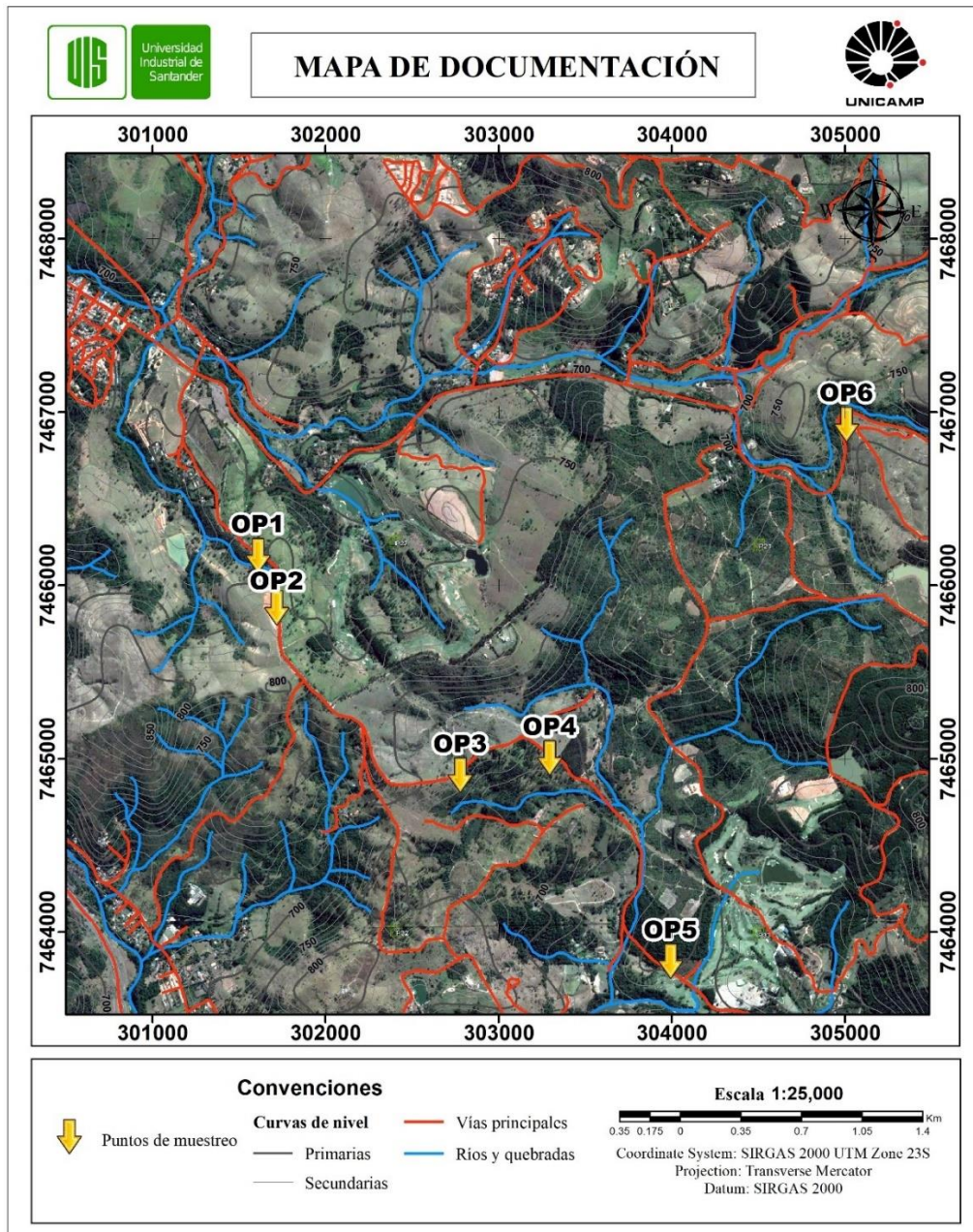


Figura 22. Mapa de documentación del área de estudio exhibiendo los puntos de muestreo.

7.1.2. Geología del área de estudio

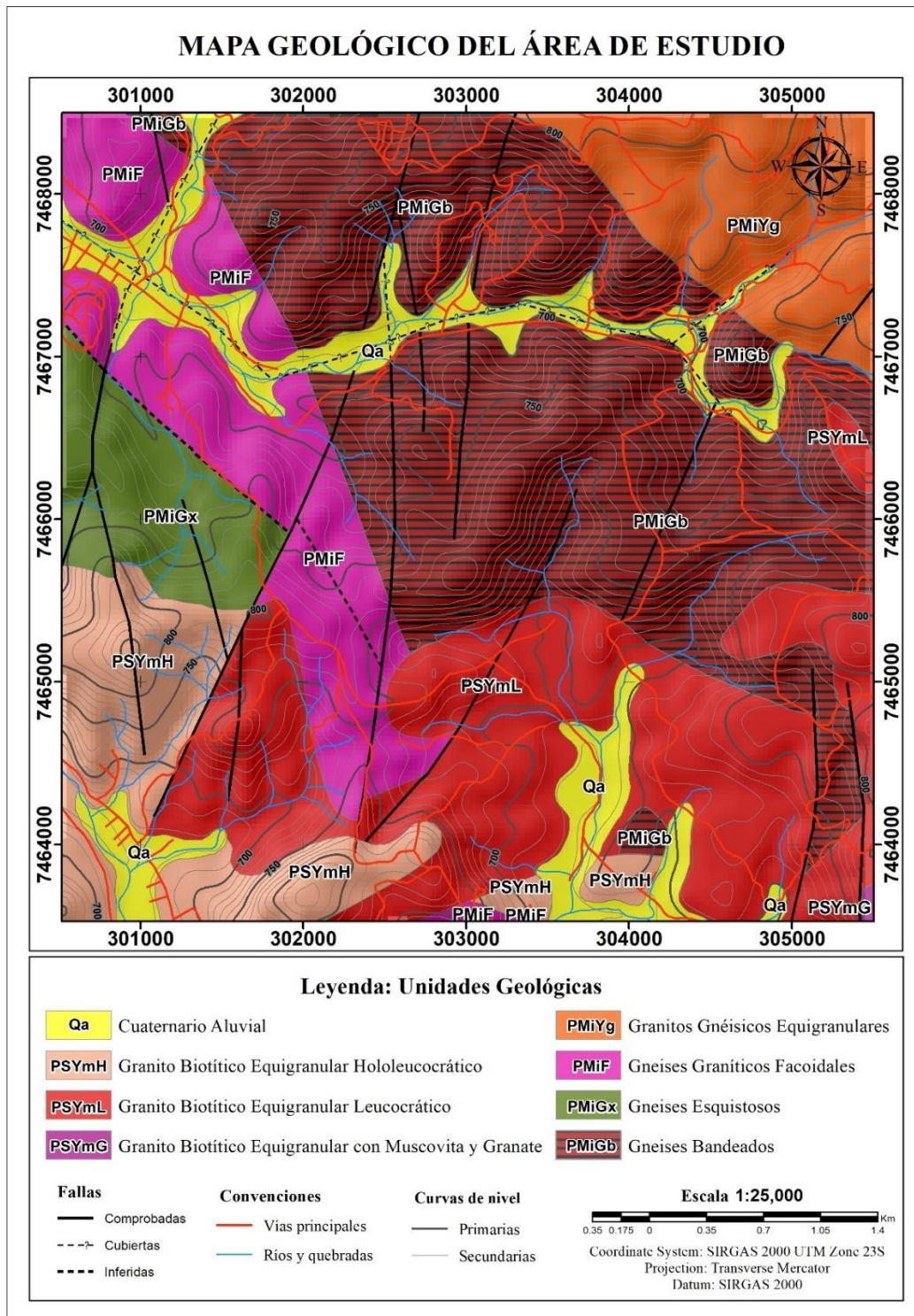


Figura 23. Mapa geológico del Área de Estudio. Modificado de Fernandes et al. (1993)

7.1.3. Geomorfología del área de estudio

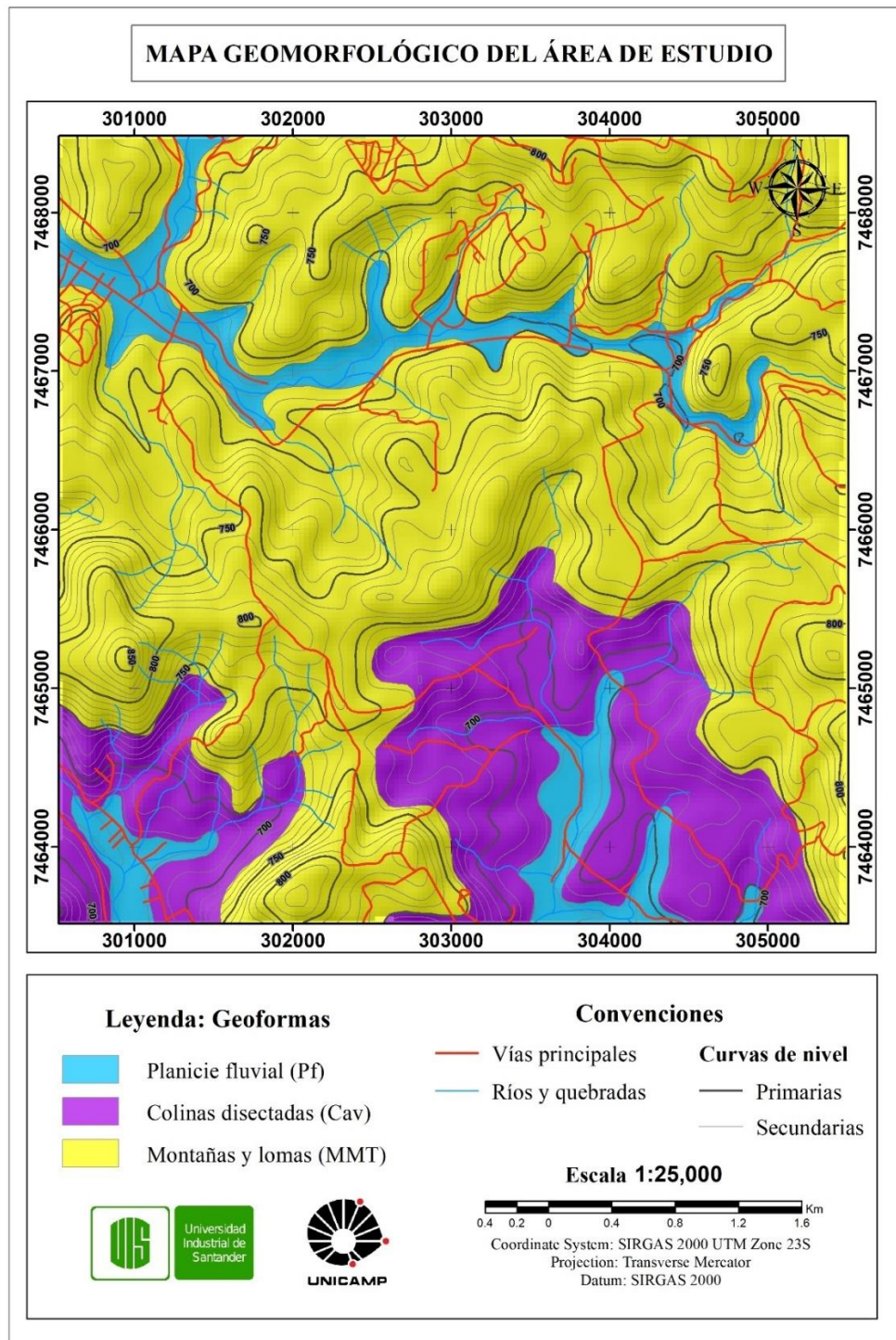


Figura 24. Mapa geomorfológico del área de estudio. Modificado de: SEPLAMA (2006).

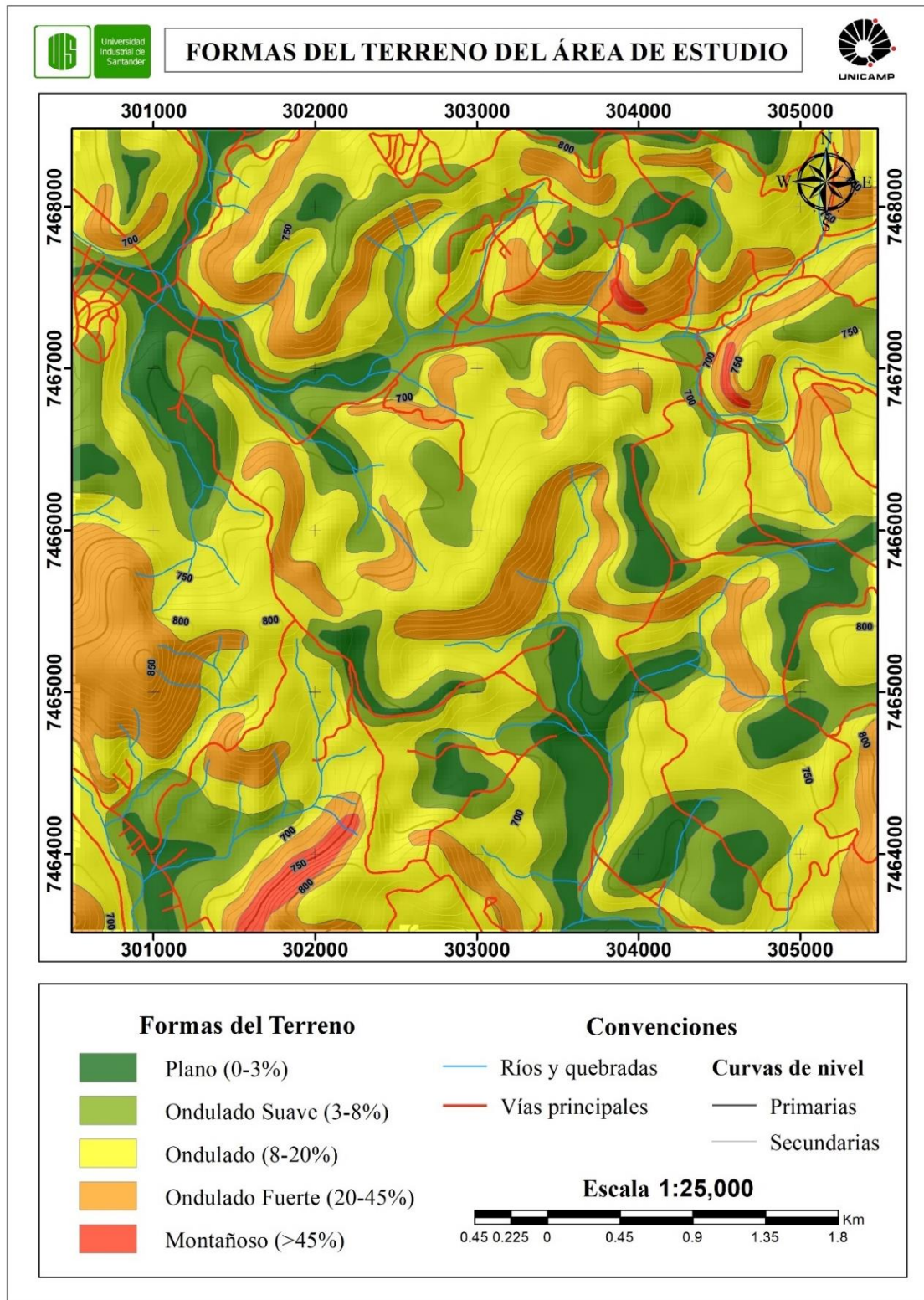


Figura 25. Mapa de formas del terreno, representando la morfometría del área de estudio.

7.1.4. Pedología del área de estudio

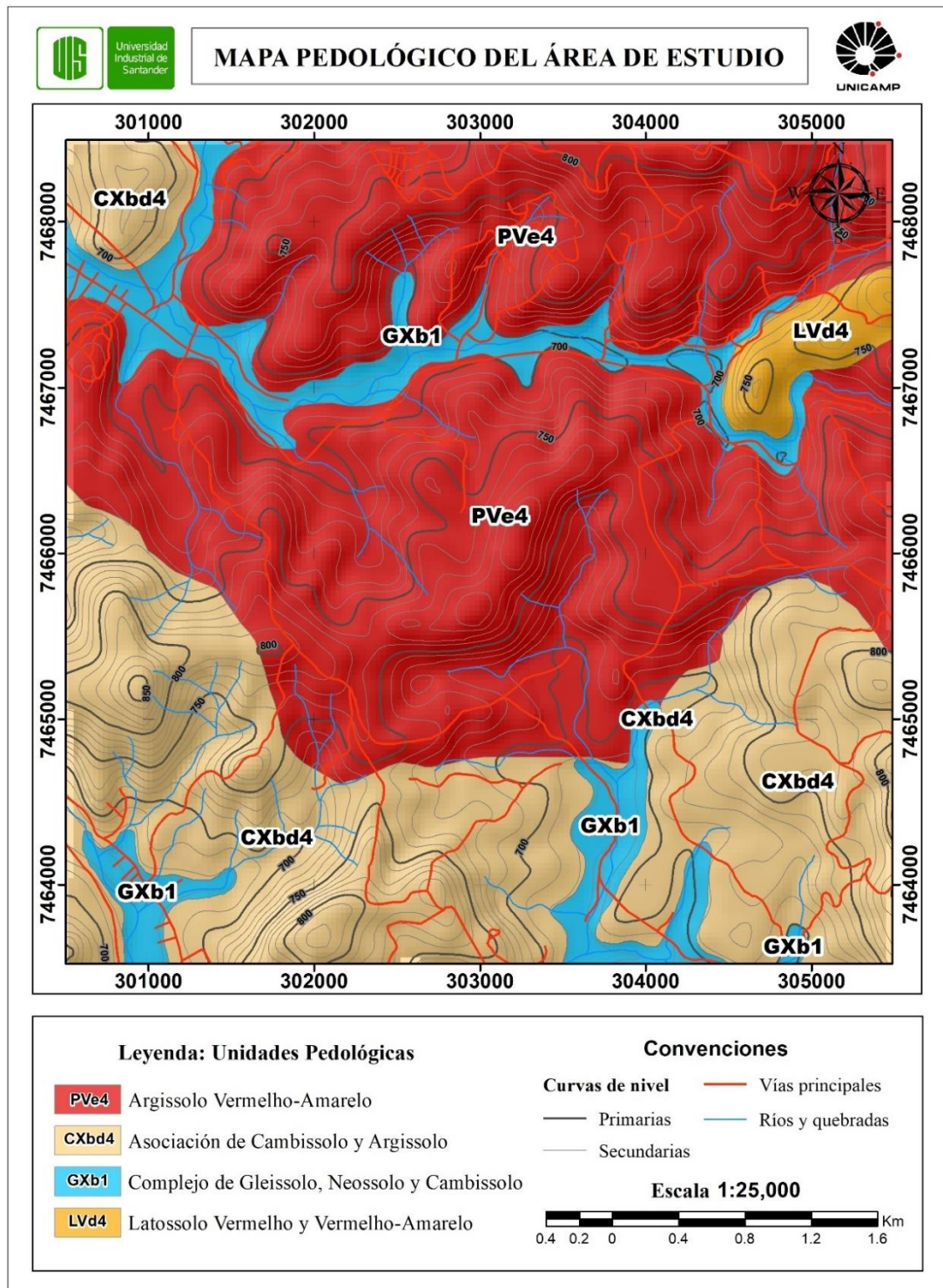


Figura 26. Mapa pedológico del área de estudio. Modificado de EMBRAPA (2008)

7.2. Caracterización geotécnica

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, los cuales exhiben los parámetros geotécnicos de las muestras alteradas e inalteradas recolectadas se muestran a continuación:

7.2.1. Peso específico de los sólidos

Tabla 7. Peso específico de las muestras alteradas recolectadas.

Muestra	Peso específico (γ _s)	Muestra	Peso específico (γ _s)
OP1 - A	2,732	OP3 - A	2,809
OP1 - B	2,782	OP3 - B	2,819
OP2 - A	2,781	OP5 - A	2,729
OP2 - B	2,801	OP5 - B	2,639
OP3 - Col	2,762	OP6	2,668

Las muestras obtenidas en los perfiles presentan un peso específico de los sólidos entre 2,639 y 2,819. Siendo los valores de los perfiles OP5 y OP6 los que presentan menor peso específico y los valores de OP2 y OP3 los de mayor peso específico.

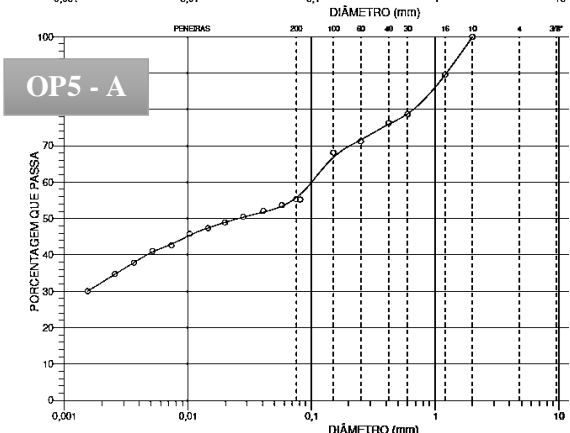
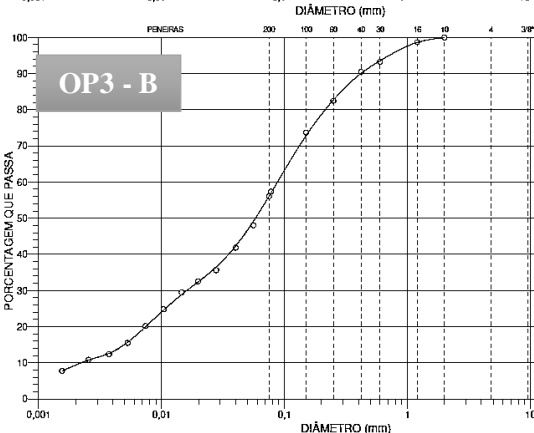
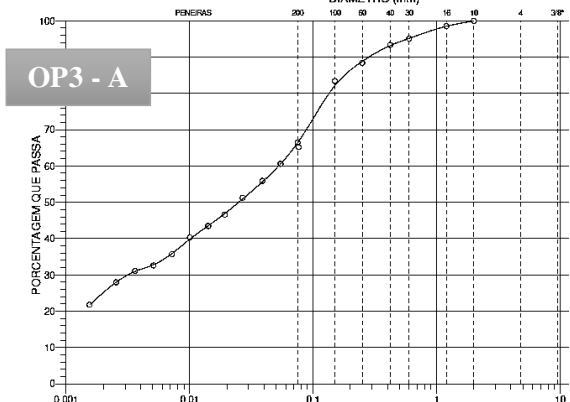
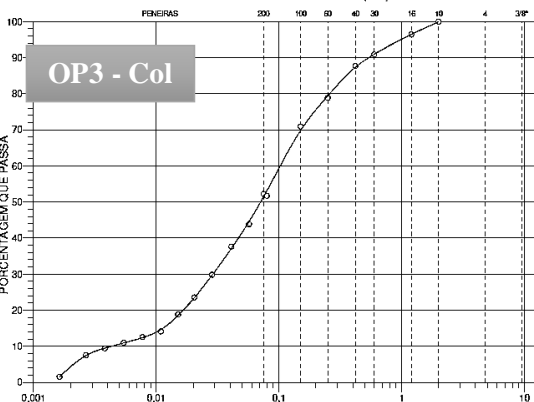
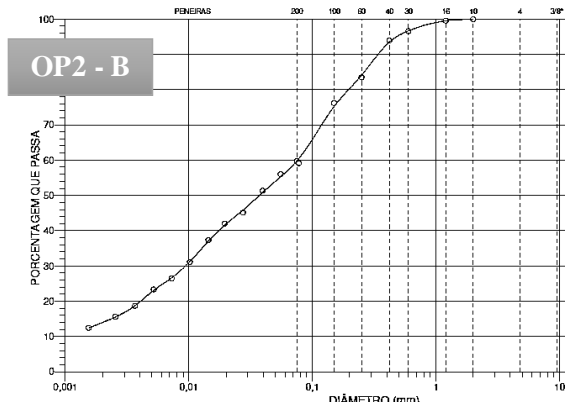
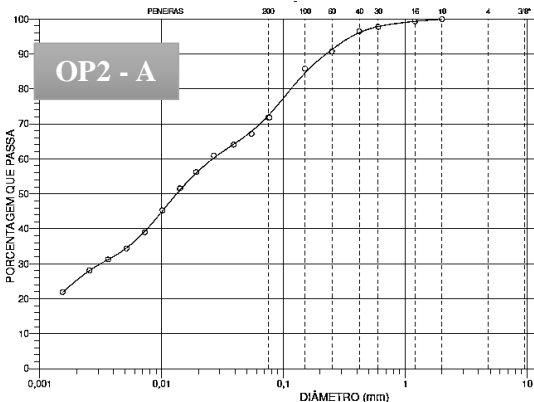
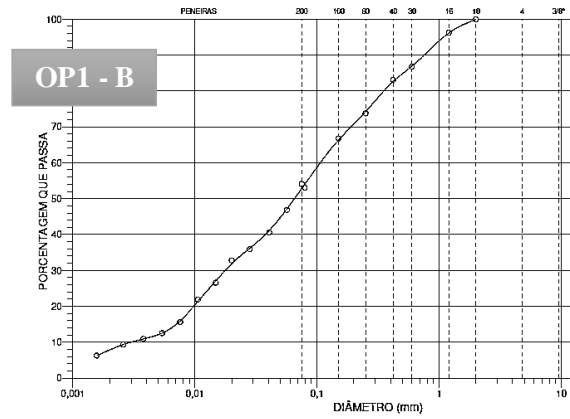
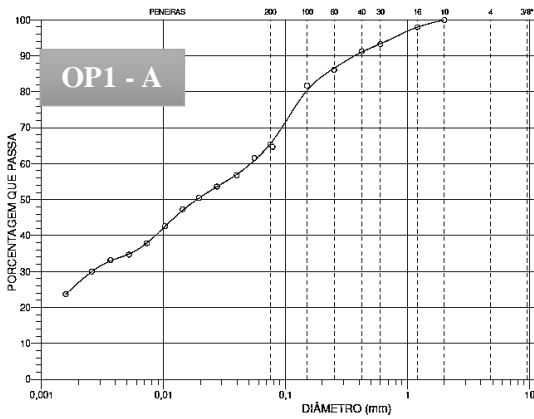
Los valores obtenidos son muy altos, indicando que se trata de un regolito muy desarrollado con alta presencia de óxido de hierro, lo cual corresponde a lo observado en el trabajo de campo.

7.2.2. Análisis granulométrico. A partir de los ensayos de tamizado y sedimentación, se obtuvieron los datos de porcentaje de contenido de partículas según su tamaño para cada una de las muestras alteradas. Estos resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 8. Porcentaje del tamaño de las fracciones granulométricas de las muestras alteradas.

Muestra	% Arcilla	% Limo	% Arena			% Grava	
			Fina	Media	Gruesa	Fina	Media
OP1 - A	26,9	35,1	22,4	9,0	6,7	0,0	0,0
OP1 - B	7,9	40,4	22,5	16,1	13,1	0,0	0,0
OP2 - A	25,2	43,9	19,5	9,2	2,2	0,0	0,0
OP2 - B	14,0	42,5	23,9	16,4	3,3	0,0	0,0
OP3 - Col	4,3	41,5	29,9	15,4	9,0	0,0	0,0
OP3 - A	25,1	37,1	24,2	9,7	4,9	0,0	0,0
OP3 - B	9,4	41,4	28,0	14,8	6,4	0,0	0,0
OP5 - A	32,4	21,3	16,2	9,0	21,1	0,0	0,0
OP5 - B	16,4	25,2	16,1	15,7	26,6	0,0	0,0
OP6	6,0	41,5	25,1	19,0	8,5	0,0	0,0

Basándose en la tabla de porcentaje de partículas según su tamaño de grano, se elaboraron los gráficos de curvas de distribución granulométrica acumulada, los cuales exhiben el porcentaje de partículas acumulado que pasa por cada tamiz en función del diámetro de la partícula. A partir de este gráfico se puede estimar el tipo de suelo según el comportamiento de la curva y se define la homogeneidad de la distribución de los granos según su tamaño, en otras palabras, si están bien, mal o uniformemente graduadas.



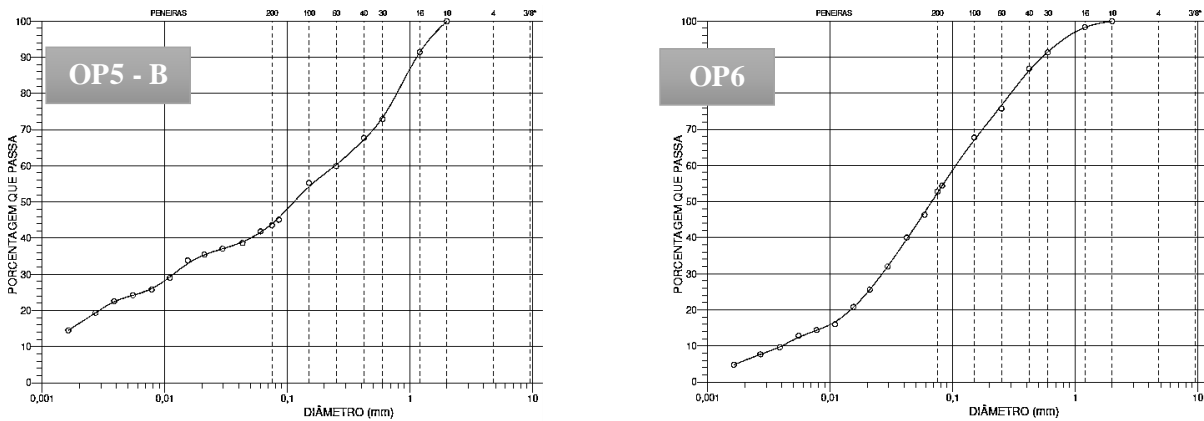


Figura 27. Curvas de distribución granulométrica acumulada de las muestras analizadas.

A partir de los datos obtenidos en la tabla de porcentaje de fracciones granulométricas (Tabla 8) y las curvas de distribución granulométrica acumulada (Figura 22), se estableció la clasificación granulométrica de los suelos en la siguiente tabla:

Tabla 9. Clasificación granulométrica de los suelos según el tamaño y disposición de los granos.

Muestra	Nomenclatura USC	Clasificación granulométrica
OP1 - A	ML	Limo arenoso mal graduado
OP1 - B	SM	Arena limosa mal graduada
OP2 - A	ML	Limo arcilloso bien graduado
OP2 - B	ML	Limo arcilloso bien graduado
OP3 - Col	SC	Arena arcillosa mal graduada
OP3 - A	ML	Limo arcilloso mal graduado
OP3 - B	SM	Arena limosa mal graduada
OP5 - A	MH	Limo arcilloso mal graduado
OP5 - B	ML	Limo arenoso mal graduado
OP6	SM	Arena limosa bien graduada

7.2.3. Límites de consistencia. Se presenta el porcentaje de los valores de límite líquido y plástico obtenidos en el ensayo de laboratorio, y a partir de ellos se determina el Índice de Plasticidad (IP), el cual corresponde a la diferencia entre LL y LP.

Basándose en el IP se pueden clasificar los suelos según su grado de plasticidad, siendo que aquellos con IP con valores entre 1 y 7 considerados débilmente plásticos, los de IP entre 7 y 15 moderadamente plásticos y los de IP mayor a 15 altamente plásticos. Recordando que aquellos materiales a los que no fue posible determinar su límite plástico fueron clasificados como no plásticos.

Tabla 10. Límites de consistencia de Atterberg y clasificación del grado de plasticidad de los suelos.

Muestra	LP	LL	IP	Clasificación
OP1 - A	29,7 %	39,5 %	9,8 %	Medianamente plástico
OP1 - B	-	-	-	No plástico
OP2 - A	30,0 %	47,3 %	17,3 %	Altamente plástico
OP2 - B	30,3 %	39,6 %	9,3 %	Medianamente plástico
OP3 - Col	20,8 %	34,0 %	13,2 %	Medianamente plástico
OP3 - A	26,8 %	42,4 %	15,6 %	Altamente plástico
OP3 - B	-	-	-	No plástico
OP5 - A	32,0 %	50,4 %	18,4 %	Altamente plástico
OP5 - B	29,5 %	42,9 %	13,5 %	Medianamente plástico
OP6	-	-	-	No plástico

Con los datos obtenidos en la Tabla 10 se grafica la Carta de Plasticidad de Casagrande (Figura 23), en la cual se representa el Índice de Plasticidad en función del Límite Líquido, clasificando

los suelos de tamaño limo y arcilla según su plasticidad, compresibilidad y contenido de materia orgánica.

Los materiales que se encuentran sobre la Línea “A” son considerados suelos con comportamiento arcilloso de alta, media o baja plasticidad, dependiendo de su límite líquido. Aquellos materiales que se encuentran bajo la Línea “A” pueden ser suelos orgánicos o suelos inorgánicos limosos de baja, media o alta compresibilidad.

En este caso, se puede observar que todos los suelos están bajo la Línea “A” siendo caracterizados como limos inorgánicos, a excepción de la muestra OP3-Col, que es clasificada como una arcilla de mediana plasticidad.

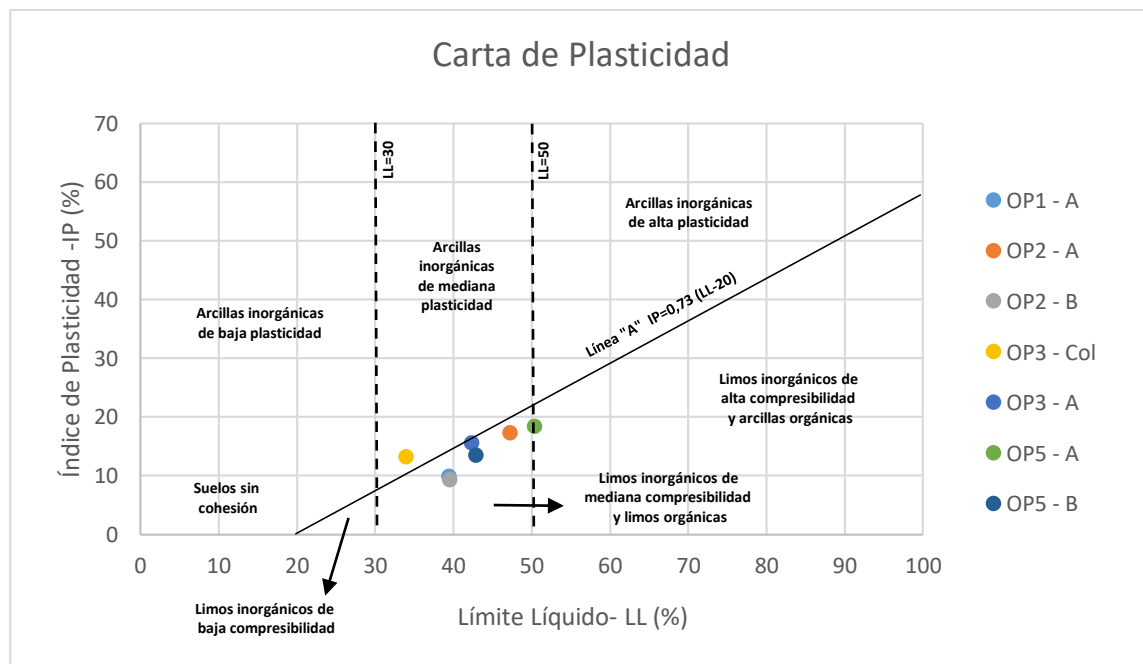


Figura 28. Clasificación de plasticidad de los suelos según la carta de plasticidad de Casagrande.

Tabla 11. Clasificación de los suelos según la carta de plasticidad de Casagrande.

Muestra	Clasificación según la carta de plasticidad
OP1 - A	Limo inorgánico de mediana compresibilidad
OP1 - B	No plástico
OP2 - A	Limo inorgánico de mediana compresibilidad
OP2 - B	Limo inorgánico de mediana compresibilidad
OP3 - Col	Arcillas inorgánicas de mediana plasticidad
OP3 - A	Limo inorgánico de mediana compresibilidad
OP3 - B	No plástico
OP5 - A	Limo inorgánico de alta compresibilidad
OP5 - B	Limo inorgánico de mediana compresibilidad
OP6	No plástico

Se observa que la clasificación obtenida por medio de la carta de plasticidad y la clasificación obtenida a través del análisis de granulometría son congruentes.

7.2.4. Corte directo. Se determinaron los valores de la cohesión y el ángulo de fricción interna de los materiales por medio de la gráfica de los valores de tensión normal en función de la tensión de cizalla máxima. Sin embargo, primero fue necesario hallar estos parámetros mediante las gráficas de tensión de cizalla vs deformación específica y la deformación vertical vs deformación específica.

Al graficar los puntos de tensión normal vs tensión de cizalla máxima, se aplicó una regresión lineal con el fin de trazar la línea que refleja la tendencia de dichos puntos y así conseguir determinar la ecuación de dicha recta, la cual corresponde a la ecuación de Coulomb. A partir de dicha ecuación se hallan los valores de cohesión (corte con el eje y) y el ángulo de fricción interna

(a partir de la pendiente de la curva). Este proceso fue realizado para las tres muestras inalteradas recolectadas y sus resultados son presentados a continuación:

- **Muestra OP3**

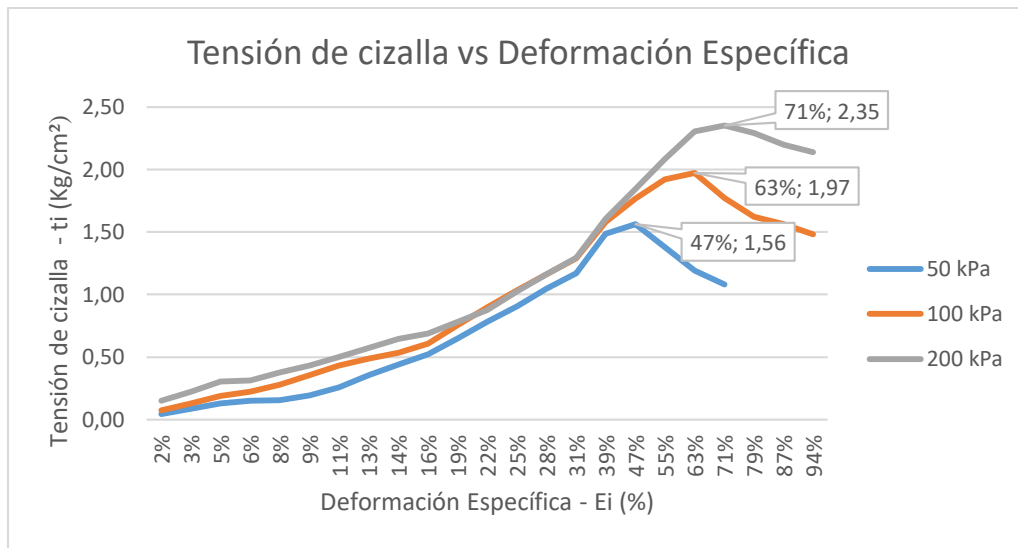


Figura 29. Gráfico de tensión de cizalla vs deformación específica para la muestra OP3.

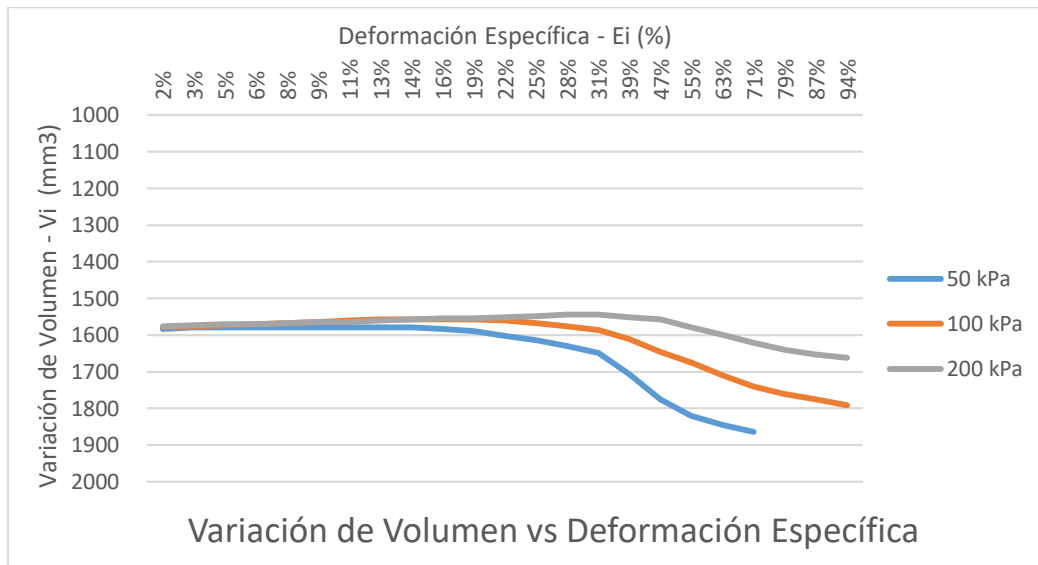


Figura 30. Gráfico de variación vertical del volumen vs deformación específica de la muestra OP3.

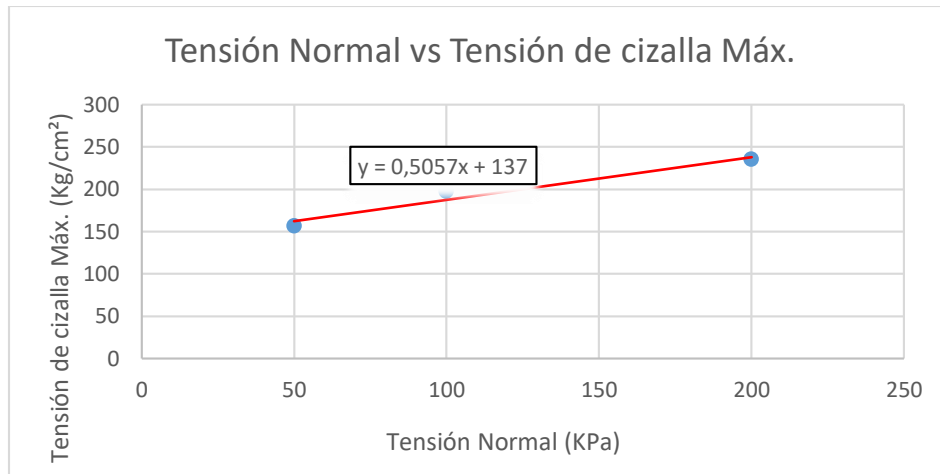


Figura 31. Gráfico de Tensión Normal vs Tensión de cizalla máxima de la muestra OP3.

Tabla 12. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna de la muestra OP3.

Tensión normal	Tensión de cizalla máx.	Cohesión	Ángulo de fricción interna
50	156	137 Kpa	26.10°
100	197		
200	235		

- Muestra OP5

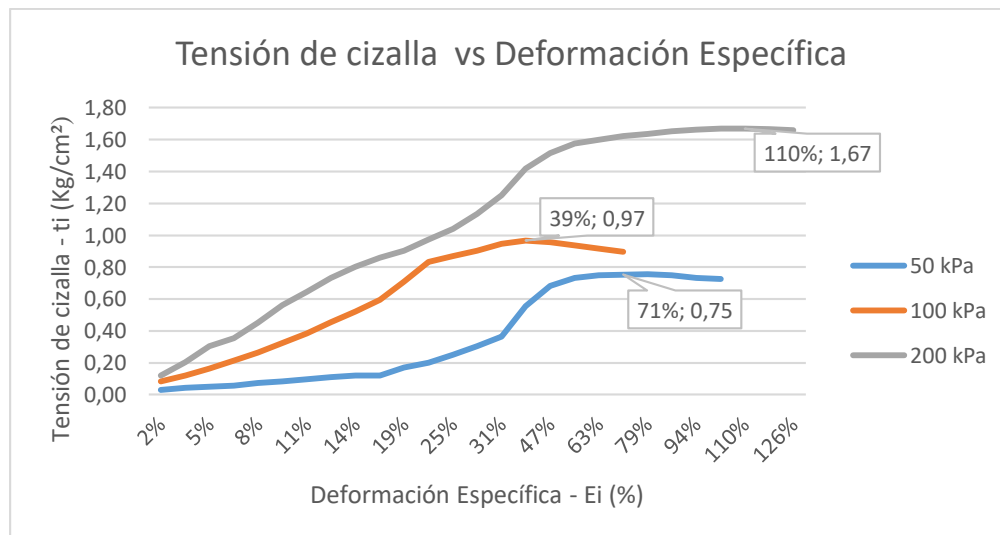


Figura 32. Gráfico de tensión de cizalla vs deformación específica para la muestra OP5.

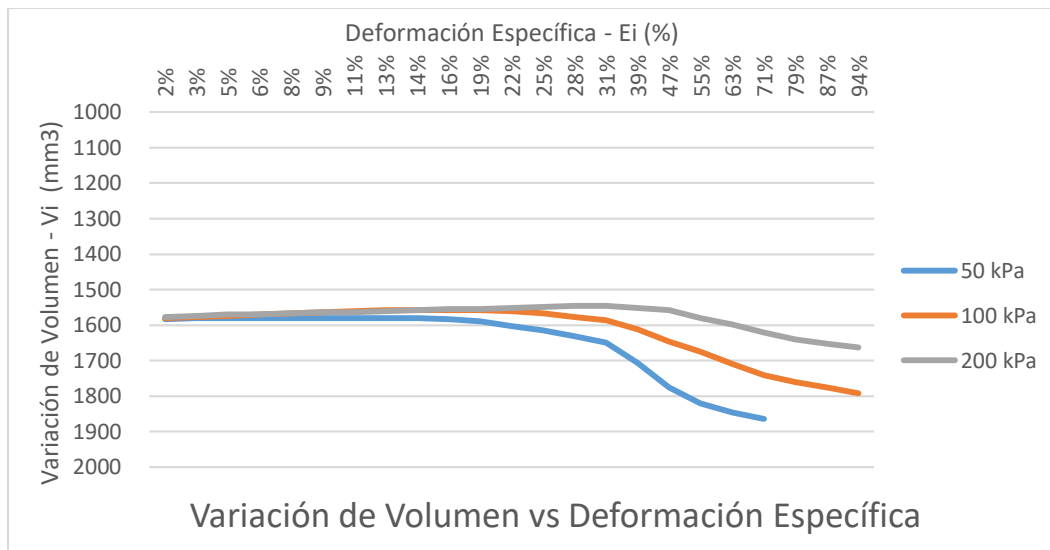


Figura 33. Gráfico de variación vertical del volumen vs deformación específica de la muestra OP5.

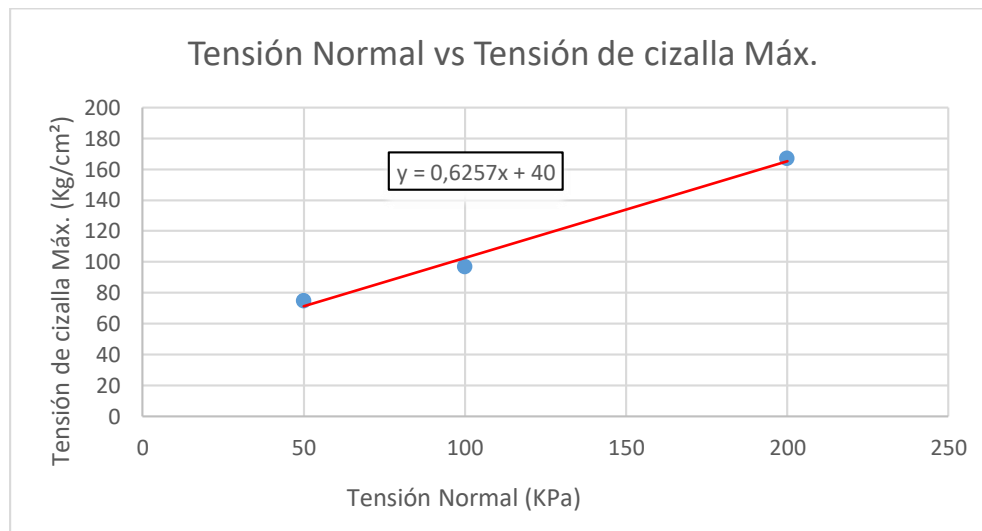


Figura 34. Gráfico de Tensión Normal vs Tensión de cizalla máxima de la muestra OP5.

Tabla 13. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna de la muestra OP5.

Tensión normal	Tensión de cizalla máx.	Cohesión	Ángulo de fricción interna
50	75	40 Kpa	32.41°
100	97		
200	167		

- **Muestra OP6**

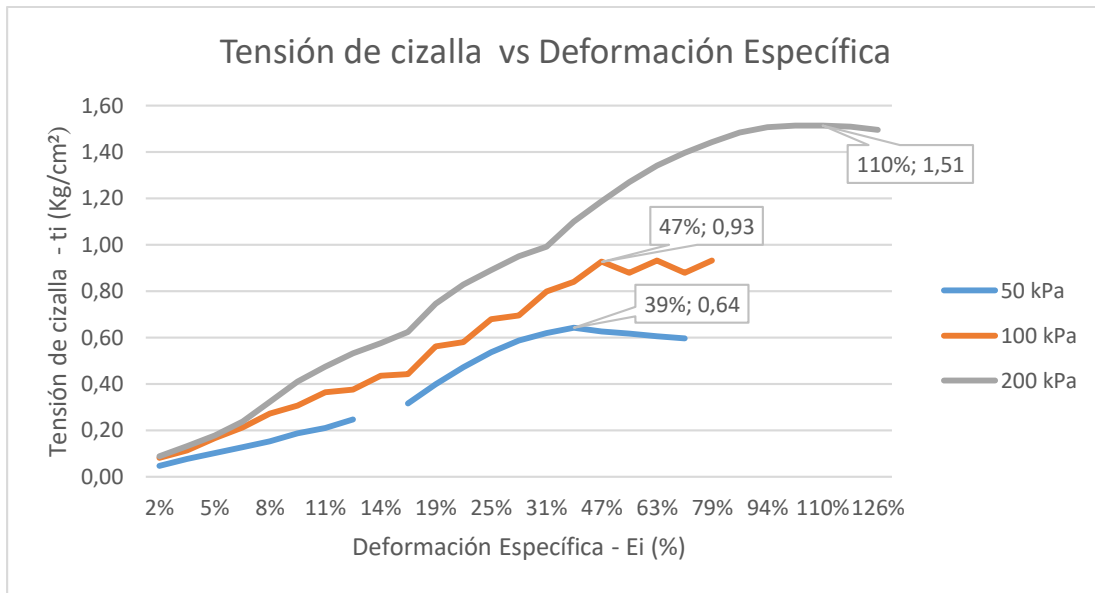


Figura 35. Gráfico de tensión de cizalla vs deformación específica para la muestra OP6.

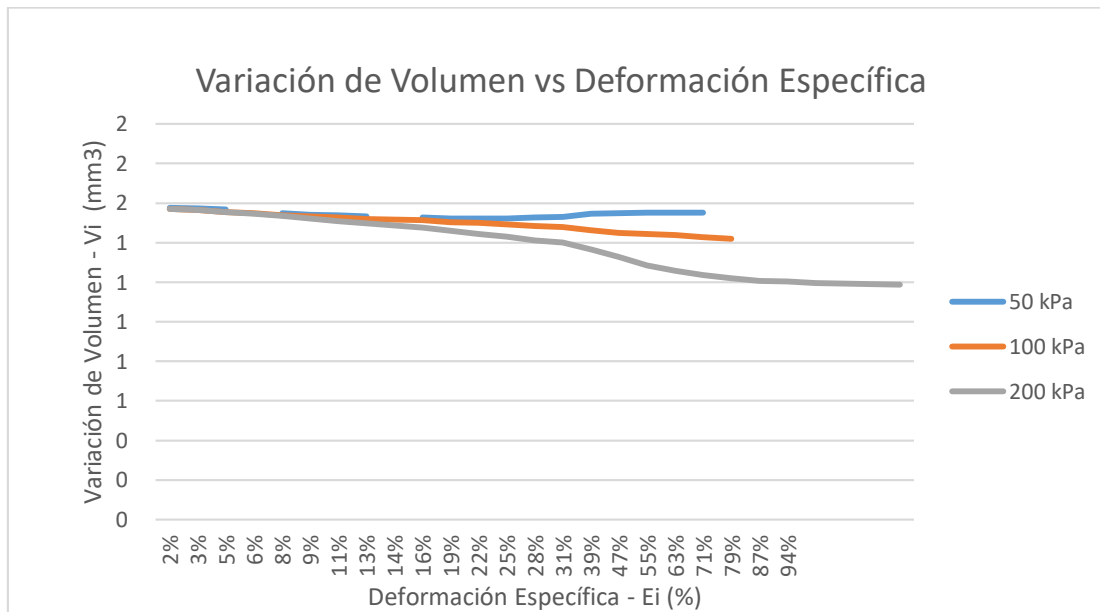


Figura 36. Gráfico de variación vertical del volumen vs deformación específica de la muestra OP6.

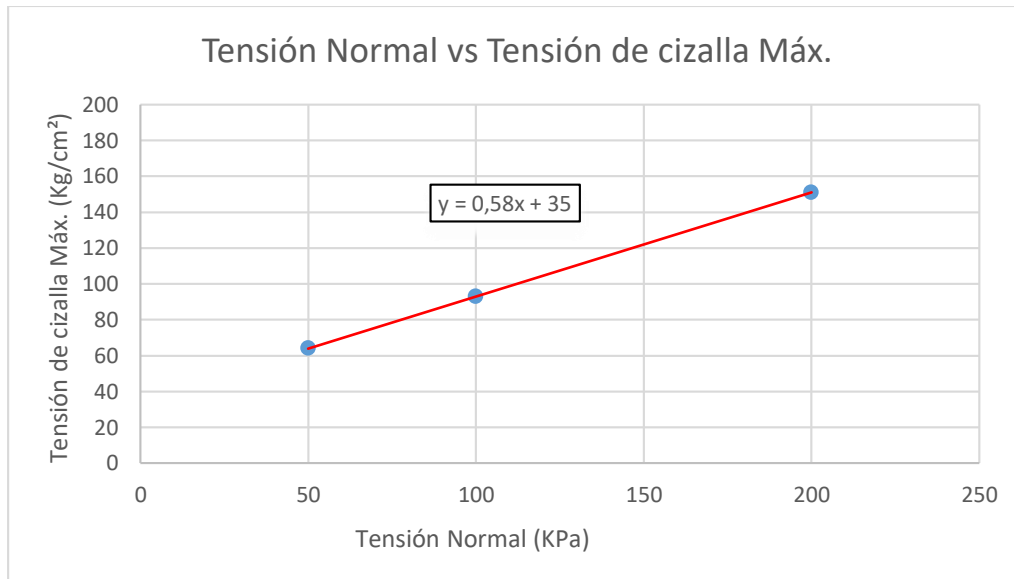


Figura 37. Gráfico de Tensión Normal vs Tensión de cizalla máxima de la muestra OP6.

Tabla 14. Valores de cohesión y ángulo de fricción interna de la muestra OP6.

Tensión normal	Tensión de cizalla máx.	Cohesión	Ángulo de fricción interna
50	64	35 Kpa	30.11°
100	93		
200	151		

7.3. Mapa de materiales no consolidados

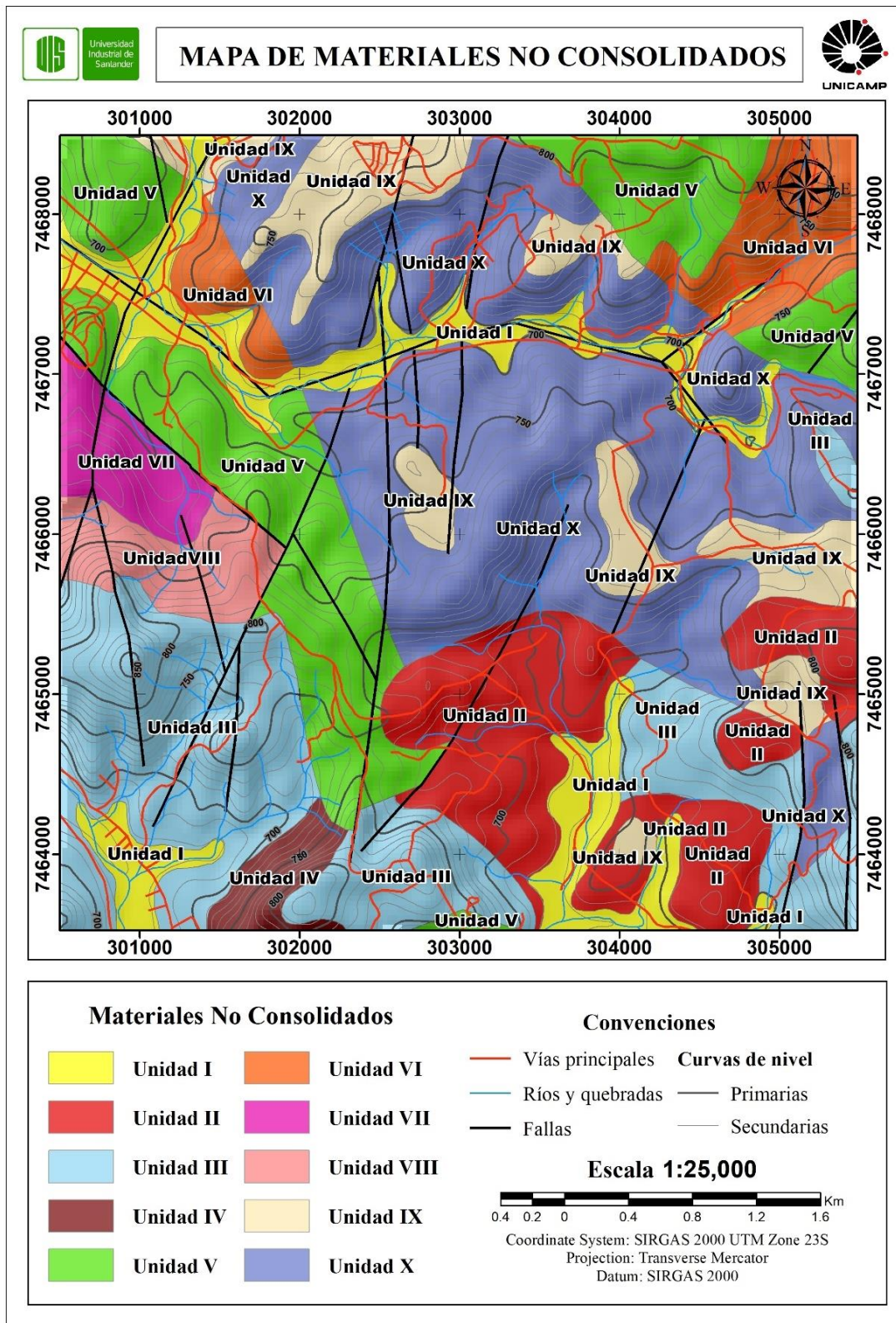


Figura 38. Mapa de unidades de materiales no consolidados presentes en el área de estudio.

8. Análisis de resultados

8.1. Caracterización de los materiales no consolidados

8.1.1. Definición de unidades. La definición de las unidades de materiales no consolidados se logra en base al árbol lógico modificado de Zuquette (1987), determinando los materiales que presenten mínima heterogeneidad en función de informaciones cuantitativas y cualitativas.

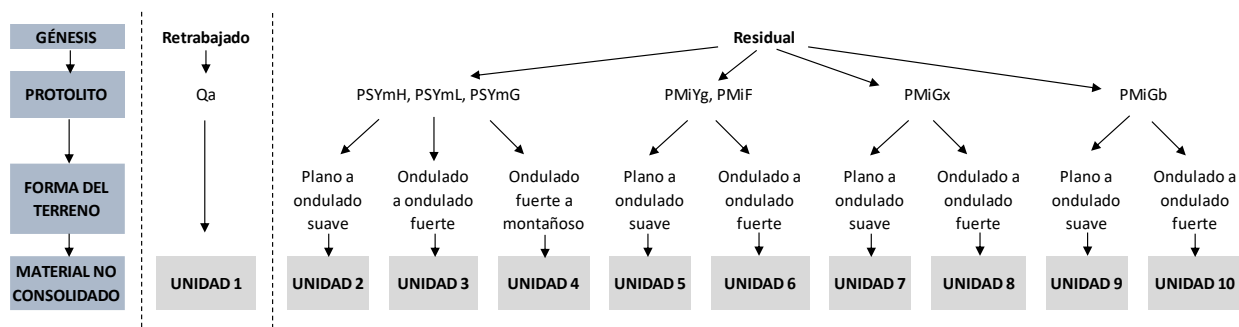


Figura 39. Aplicación del árbol lógico para la definición de las unidades de MNC.

Como se observa en la figura 42, el primer nivel del árbol lógico divide los materiales según su génesis en retrabajados o residuales. Entre los materiales retrabajados fue identificado un material no consolidado de carácter aluvial, siendo definida como la Unidad 1.

Cabe resaltar que se encontraron materiales no consolidados de carácter coluvial a lo largo de la zona, sin embargo, estos recubrían, en pequeña proporción, laderas de suelos residuales, por lo

cual se consideró que no debían ser cartografiados, pues no se presentaban perfiles de suelo de materiales coluviales propiamente, sino que solo se veían en pequeñas capas asociados a otros tipos de perfiles de suelo no retrabajados.

En la segunda etapa del árbol lógico se diferencian los protolitos asociados a los materiales residuales, siendo separados principalmente por su litología y estructura. En algunos casos se encontraban cartografiadas separadamente litologías debido a su diferenciación mineralógica, sin embargo, al considerarse que la presencia o no de un mineral en una misma unidad litológica no es una característica que brinde la heterogeneidad suficiente para diferenciar un material no consolidado, se agruparon las litologías con características texturales y estructurales similares, sin importar sus pequeñas variaciones mineralógicas.

Posteriormente, se diferencian las unidades teniendo en cuenta las formas del terreno, considerando necesario para su separación que haya una clara heterogeneidad en la morfometría dentro de una misma litología, debido a las implicaciones que esto conlleva a la hora de evaluar la ocupación de un territorio. Las formas del terreno se agruparon en tres clases diferentes: Plano a ondulado suave, ondulado a ondulado fuerte y ondulado fuerte a montañoso.

Los terrenos planos se veían asociados principalmente a los valles, planicies fluviales y en algunos topes de colinas y montañas, mientras que los terrenos montañosos se presentaban en pequeñas porciones del terreno que no se consideran cartografiables a la escala empleada en el trabajo. La forma de terreno dominante era el ondulado, característico de las geoformas representadas en el mapa geomorfológico (colinas disectadas, montañas y lomas).

Por último, se intentó diferenciar las unidades caracterizadas hasta el momento con base a los parámetros geotécnicos obtenidos en los ensayos de laboratorio. Sin embargo, los materiales no consolidados presentes en los perfiles expuestos en superficie no presentan una diferenciación lo

suficientemente clara, pues los diferentes tipos de roca madre presentes en la zona presentan una composición semejante. Puesto que están sujetas a los procesos de intemperismo y erosión en la superficie, tendiendo a perder parte de sus características durante los procesos de alteración, formando materiales no consolidados con características geotécnicas similares. Por lo tanto, para este caso se despreció dicho criterio de clasificación.

Finalmente, se determinaron 10 unidades de materiales no consolidados y se diferenciaron gráficamente mediante la superposición de mapas con los criterios previamente mencionados. Para el trazado de los límites de las unidades se utilizaron los procesos de adición, selección y generalización en la confección del mapa de materiales no consolidados (Figura 38).

8.1.2. Descripción de unidades de materiales no consolidados. A continuación, se describen las 10 unidades de materiales no consolidados identificadas en el área de estudio basándose en las informaciones obtenidas en el trabajo de campo, los ensayos de laboratorio y la bibliografía consultada.

8.1.2.1. Unidad I: Material Retrabajado Aluvial. La Unidad I corresponde a un material de origen aluvial, la cual se identificó a través de la integración de informaciones contenidas en los mapas temáticos y se definió su límite por medio de fotointerpretación. Está correlacionado a los depósitos aluviales, estos son texturalmente arenosos intercalados con pequeños cuerpos finos y su procedencia está relacionada con las rocas sedimentarias de la Cuenca Paraná y las litologías aflorantes del Complejo Cristalino. Geomorfológicamente está caracterizado por Planicies Fluviales con rangos de pendientes de 0-2%, siendo susceptibles a la inundación. Pedológicamente

se clasifica como un Complejo de Gleissolo, neossolo y cambissolo, el cual presenta un horizonte tipo A y tiene como característica principal que se encuentra saturado de agua y posee una textura diferencial donde aparecen precipitaciones de hierro.

8.1.2.2. Unidad II: Material Residual de Granitos Biotíticos planos a suavemente ondulados. Esta unidad corresponde a un suelo de origen residual asociado litológicamente a un protolito de Granitos Biotíticos Equigranulares de la Suite Granítica Morungaba. Su morfometría es plana a suavemente ondulada, con intervalos de pendientes de 0-8%, y pedológicamente se presenta en forma de Argissolos y asociaciones de Cambissolos con Argissolos.

En cuanto a la clasificación textural, los suelos son catalogados como arenas limosas y arenas arcillosas, presentando variaciones de mediana a alta plasticidad en sus horizontes. Se observa distribuida espacialmente en la porción sureste del área de estudio.

Tabla 15. Atributos geotécnicos de la Unidad II de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
II	2,762 - 2,819	Arena limosa a arcillosa	Mediano a alto	Pve4 y CXbd4

8.1.2.3. Unidad III: Material Residual de Granitos Biotíticos ondulados a fuertemente ondulados. Al igual que la unidad II, esta unidad corresponde a un suelo de origen residual asociado litológicamente a un protolito de Granitos Biotíticos Equigranulares de la Suite Granítica Morungaba. Sin embargo, su morfometría varía de ondulada a fuertemente ondulada, con

intervalos de pendientes del 8 al 45%. Su distribución se ve representada en varios lugares de la porción sur, intercalado con la unidad II y la IV.

En cuanto a la clasificación textural, los suelos son catalogados como arenas limosas y arenas arcillosas, presentando variaciones de mediana a alta plasticidad en sus horizontes. Pedológicamente hablando, solo se presentan suelos correspondientes a Asociaciones de Cambissoles con Argissoles.

Tabla 16. Atributos geotécnicos de la Unidad III de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
III	2,639 - 2,729	Limo arenoso a arcilloso	Mediano a alto	CXbd4

8.1.2.4. Unidad IV: Material Residual de Granitos Biotíticos fuertemente ondulados a montañosos. La unidad IV se encuentra localizada al sureste de la zona, exhibiendo las mismas características litológicas del protolito y pedogenéticas de la unidad III. Su diferenciación se debe al alta rango de pendiente que presentan sus terrenos, presentando inclinaciones mayores al 45%, lo que implica grandes diferencias a la hora de analizar la posible ocupación y aprovechamiento del uso del suelo. En cuanto a su clasificación textural, los suelos son catalogados como arenas limosas y arenas arcillosas.

Tabla 17. Atributos geotécnicos de la Unidad IV de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
IV	2,639 - 2,729	Limo arenoso a arcilloso	Mediano a alto	CXbd4

8.1.2.5. Unidad V: Material Residual de Gneises Graníticos planos a suavemente ondulados. La unidad V está asociada a un suelo residual que corresponde a un protolito de Gneises graníticos del Complejo Itapira. Su morfometría es plana a suavemente ondulada, con intervalos de pendientes de 0-8%, y pedológicamente presenta en su extensión todas las formas de suelo encontradas bajo este parámetro. Esta unidad está controlada fuertemente por la presencia de un conjunto de fallas transcurrentes que definen su límite en la porción oeste del área de estudio.

Esta unidad está clasificada texturalmente como suelos de tipo arenas limosas y arenas arcillosas, presentando variaciones de mediana a alta plasticidad en sus horizontes y en ocasiones puntuales mostrando plasticidad nula.

Tabla 18. Atributos geotécnicos de la Unidad V de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
V	2,732 - 2,782	Arena limosa a limo arenoso	Mediano a no plástico	Pve4, CXbd4 y LVd4

8.1.2.6. Unidad VI: Material Residual de Gneises Graníticos ondulados a fuertemente ondulados. Al igual que la unidad V, este material no consolidado de carácter residual se encuentra asociado a un protolito de Gneises graníticos del Complejo Itapira. Su morfometría varía de ondulada a fuertemente ondulada, con intervalos de pendientes del 8 al 45%, y pedológicamente presenta en su extensión Asociaciones de Cambissolos con Argissolos y una pequeña porción de Latossolo al este de la zona de estudio.

Esta unidad está clasificada texturalmente como suelos de tipo arenas limosas y arenas arcillosas, presentando variaciones de mediana a alta plasticidad en sus horizontes y en ocasiones puntuales mostrando plasticidad nula, especialmente en los horizontes que se encuentran llegando al límite con la roca sana, en otras palabras, el saprolito que ya presenta características de la roca madre.

Tabla 19. Atributos geotécnicos de la Unidad VI de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
VI	2,732 - 2,782	Arena limosa a limo arenoso	Mediano a no plástico	Pve4 y LVd4

8.1.2.7. Unidad VII: Material Residual de Gneises Esquistosos planos a suavemente ondulados. Esta unidad se encuentra localizada al noroeste del área de estudio y pertenece a un suelo residual que se encuentra asociado a los Gneises Esquistosos del Complejo Itapira. Su morfometría se caracteriza por presentar terrenos planos a suavemente ondulados, exhibiendo rangos de pendiente del 0 al 8%.

Esta unidad está clasificada texturalmente como suelos de tipo limo arcilloso, presentando variaciones de mediana a alta plasticidad en sus horizontes, y pedológicamente está asociado a Argissolos de coloración rojiza a amarillenta.

Tabla 20. Atributos geotécnicos de la Unidad VII de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
VII	2,781 - 2,801	Limo arcilloso	Mediano a alto	Pve4

8.1.2.8. Unidad VIII: Material Residual de Gneises Esquistosos ondulados a fuertemente ondulados. Al igual que la unidad VII, este material está asociado a un protolito de Gneises Esquistoso del Complejo Itapira. Sin embargo, su morfometría pasa a ser más accidentada, presentando rangos de pendiente del 8 al 45. Pedológicamente presenta en su extensión Asociaciones de Cambissolos con Argissolos y una pequeña porción de Argissolo y se clasificó granulométricamente como un limo arcilloso de plasticidad mediana a alta.

Tabla 21. Atributos geotécnicos de la Unidad VIII de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
VIII	2,781 - 2,801	Limo arcilloso	Mediano a alto	Pve4 y CXbd4

8.1.2.9. Unidad IX: Material Residual de Gneises Bandeados planos a suavemente ondulados. La unidad IX corresponde a las partes planas y suavemente onduladas de los suelos residuales asociados a Gneises Bandeados, su característica principal es que el suelo aún exhibe las en sus horizontes las características de la roca madre. Su morfometría está limitada a rangos de pendiente entre el 0 y el 8% y está clasificado texturalmente como arenas limosas no plásticas.

Pedológicamente corresponde a Asociaciones de Cambissolos y Argissolos, y cabe resaltar que todos los perfiles correspondían al saprolito, exhibiendo las características de la roca original.

Tabla 22. Atributos geotécnicos de la Unidad IX de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
IX	2,668	Arena limosa	No plástico	Pve4 y CXbd4

8.1.2.10. Unidad X: Material Residual de Gneises Bandeados ondulados a fuertemente ondulados. Por último, la unidad X presenta las mismas características que la unidad IX a excepción de su expresión morfométrica, pues corresponde a terrenos más inclinados con rangos entre el 8 y el 45% de pendiente. Esta unidad es la que presenta mayor extensión en el área de estudio.

Tabla 23. Atributos geotécnicos de la Unidad X de materiales no consolidados.

Unidad	Peso específico	Clasificación granulométrica	Grado de plasticidad	Clasificación pedológica
X	2,668	Arena limosa	No plástico	Pve4 y LVd4

8.2. Estabilidad de los materiales no consolidados en taludes antrópicos

8.2.1. Modelos de estabilidad. Se generaron los siguientes modelos de taludes para el análisis de estabilidad. En ellos, se exhiben las dimensiones del talud, la pendiente y el ancho de vía. Además, se define el material no consolidado que lo compone y se le añaden las propiedades intrínsecas del material a partir de los datos determinados en la muestra analizada en el laboratorio de mecánica de suelos.

Cabe resaltar que estos modelos son aproximados, ya que el material que compone el talud es definido como un material residual continuo y homogéneo, y solo son tomadas en cuenta sus características analizadas en la superficie. Además, las dimensiones del talud son estimadas por mediciones en campo y mediante modelos de elevación digital, lo que genera una incertidumbre considerable, pues no se contaba con un modelo topográfico detallado del lugar.

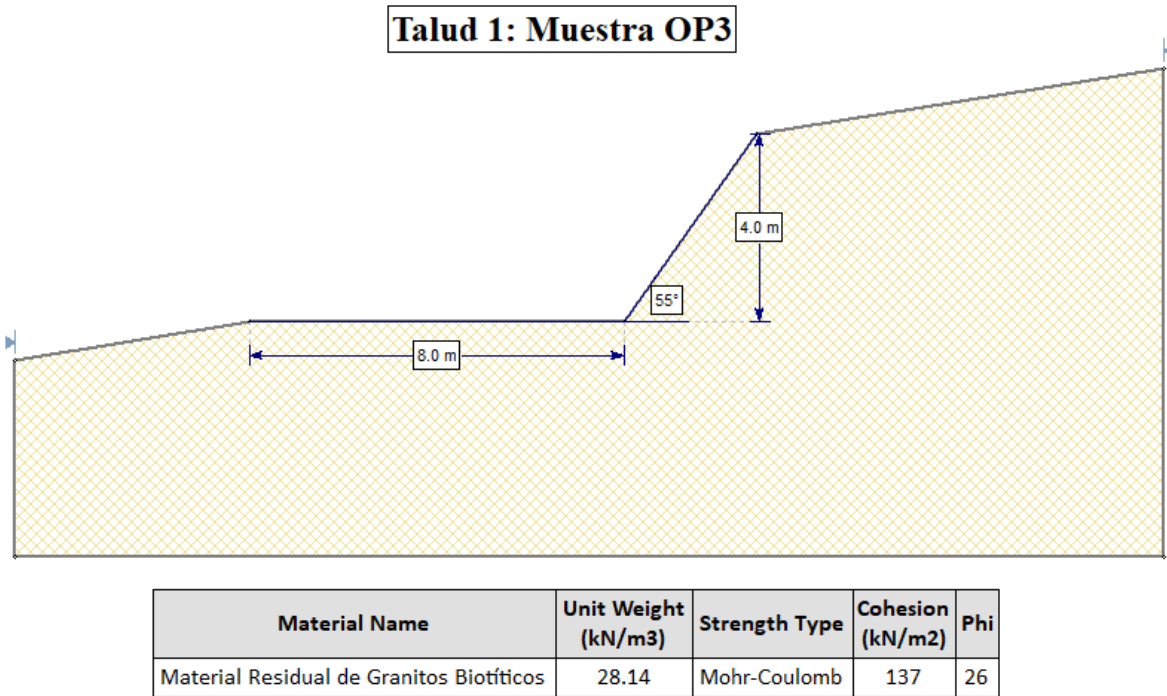


Figura 40. Modelo de estabilidad para el Talud 1 y sus características.

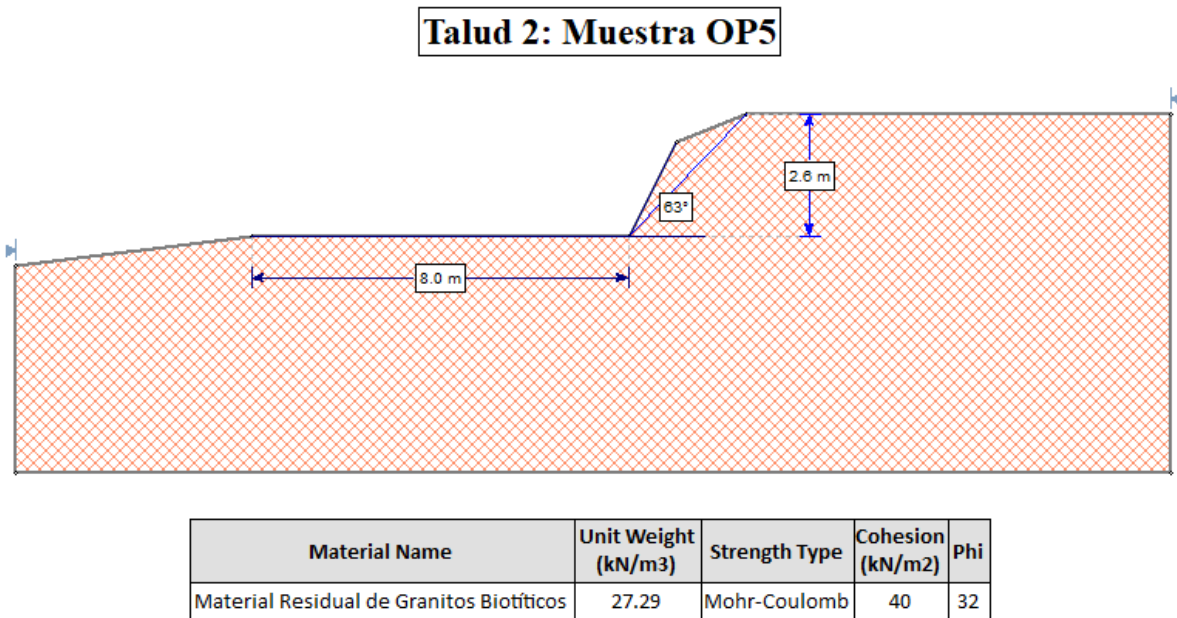


Figura 41. Modelo de estabilidad para el Talud 2 y sus características.

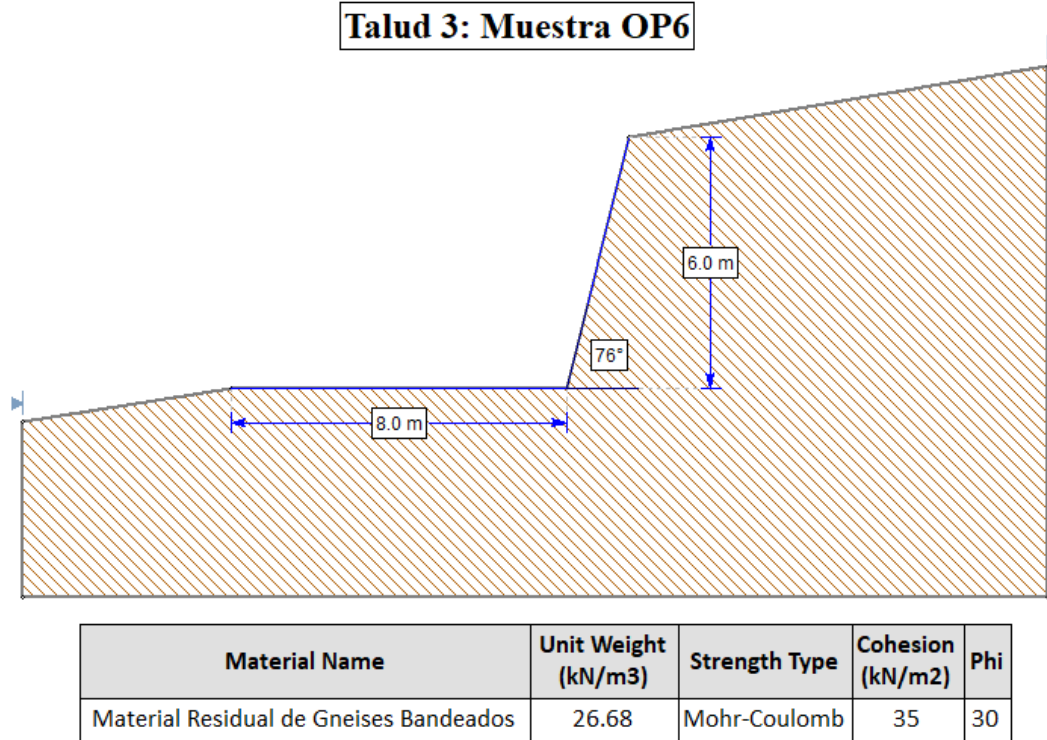


Figura 42. Modelo de estabilidad para el Talud 3 y sus características.

8.2.2. Análisis de estabilidad. Posterior al modelamiento de los taludes y la asignación de sus características físicas y mecánicas, se realizó la computación e interpretación de cada modelo a través de tres métodos para la determinación de la superficie de falla crítica en base a los factores de seguridad de cada talud. Debido a las marcadas diferencias entre las características físicas y mecánicas, cada uno de los taludes presenta un escenario de estabilidad totalmente distinto, el cual será analizado a continuación, describiendo y comparando los resultados obtenidos en cada método de análisis empleado en cada uno de los taludes modelados:

8.2.2.1. Talud 1: Muestra OP3. En este talud se pueden observar dos particularidades principales: El alto valor de la magnitud del factor de seguridad de la superficie crítica de falla y la variación de la superficie mínima global en los tres métodos de análisis.

El alto factor de seguridad exhibido en este modelo se debe principalmente a la cohesión que presenta el material analizado en el laboratorio, pues, a pesar de que su naturaleza corresponde a un suelo residual asociado a un protolito granítico y su ángulo de fricción interna es relativamente bajo, debido a su granulometría y plasticidad presenta un valor de cohesión muy alto. Se creía que dicho valor se presentaba por un error en el ensayo de laboratorio debido a su carácter anómalo, sin embargo, al observar la bibliografía se verificó que hay suelos residuales de alta cohesividad con valores hasta de 190KPa, lo cual indica que este suelo se mantiene dentro de estos rangos (137KPa) y los valores hallados son aceptables.

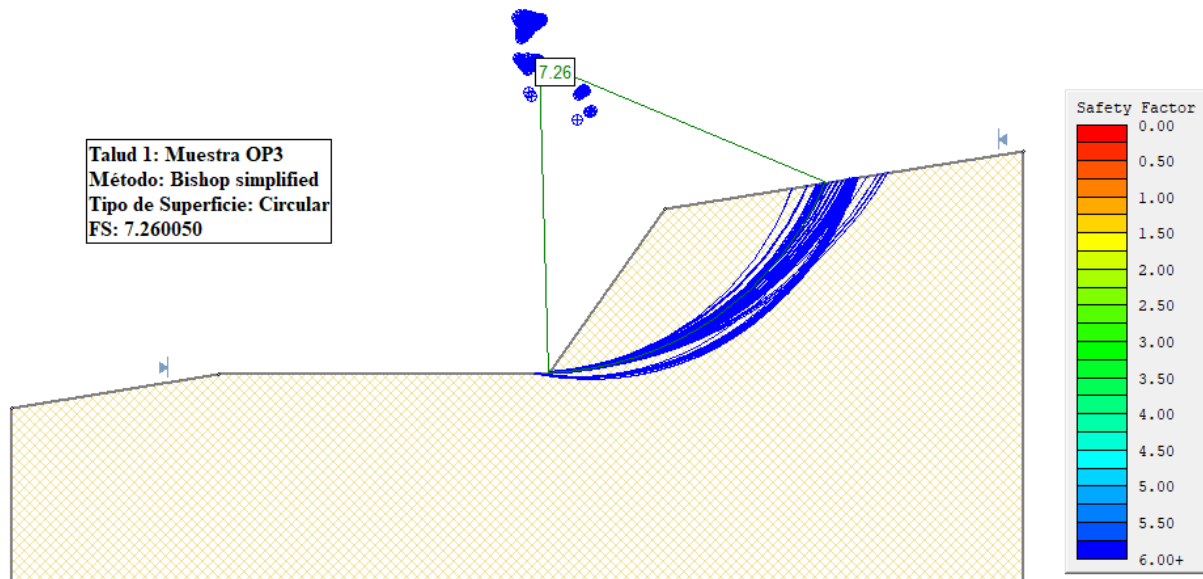


Figura 43. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Bishop Simplified para el Talud 1.

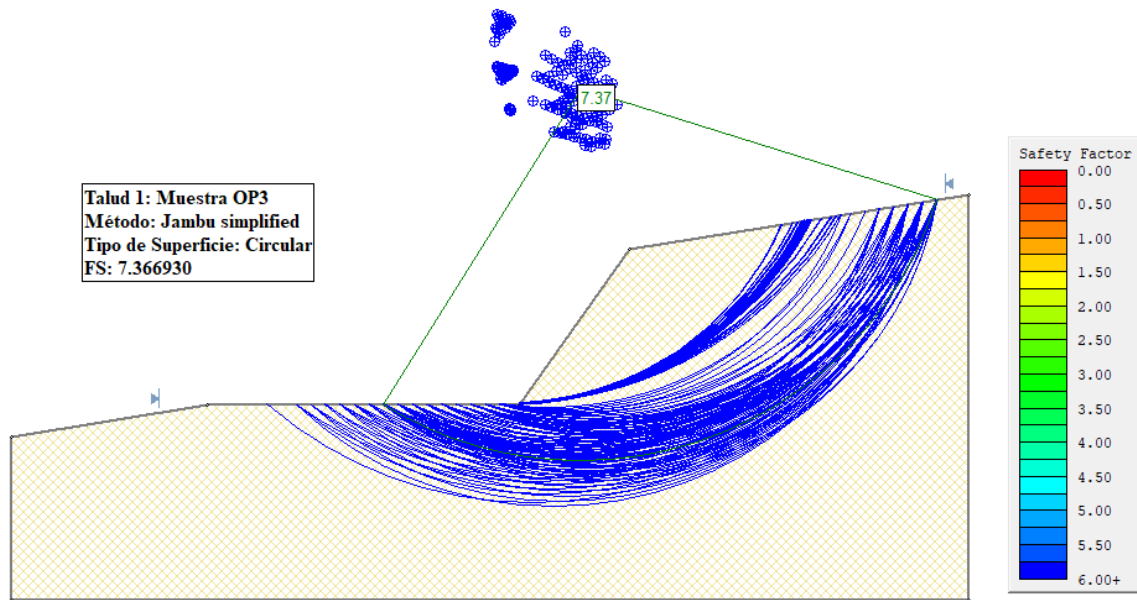


Figura 44. Superficie critica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Jambu Simplified para el Talud 1.

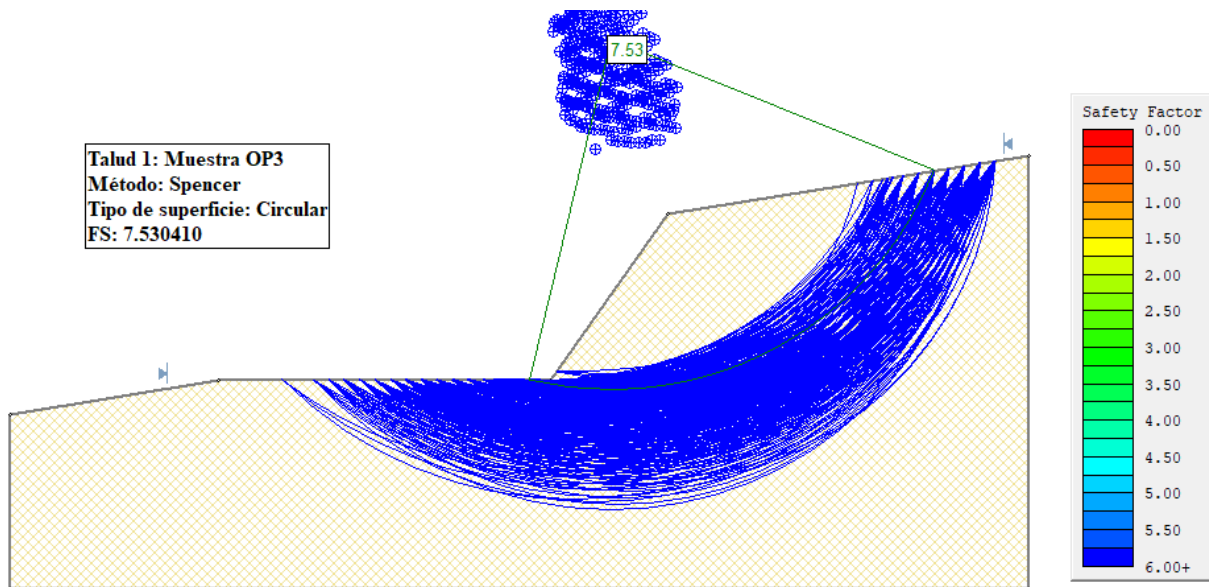


Figura 45. Superficie critica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método de Spencer para el Talud 1.

En este caso particular, todos los métodos arrojan superficies críticas en diferentes ubicaciones, sin embargo, se observa que en todos los modelos se respeta la misma geometría. También, todas las superficies tienen un factor de seguridad con magnitud muy similar, su diferencia es en el orden de milésimas, lo cual explica que la variación de la superficie crítica se debe a las diferencias en los cálculos matemáticos empleados para cada método.

8.2.2.2. Talud 2: Muestra OP5. Para el segundo talud se observan resultados muy similares tanto en la geometría de las superficies de falla encontradas, como en el valor de la magnitud del factor de seguridad para cada uno de los métodos de análisis utilizados.

En este talud el factor de seguridad oscila entre valores de 4,1 a 4,4, siendo considerado un talud aún muy estable. Esto se debe principalmente a las características geométricas del mismo, pues a pesar de que presenta valores de cohesión y ángulo de fricción interna relativamente bajos, la altura del talud es muy baja, siendo esto lo que determina la alta magnitud del factor de seguridad.

Cabe resaltar que los taludes 1 y 2 corresponden al mismo tipo de material no consolidado, pero al variar sus características geométricas, y especialmente las granulométricas y mecánicas, los resultados que arroja el análisis varían considerablemente. Aun así, en ambos casos se considera que el material tiene una alta estabilidad y no es propenso a presentar rupturas.

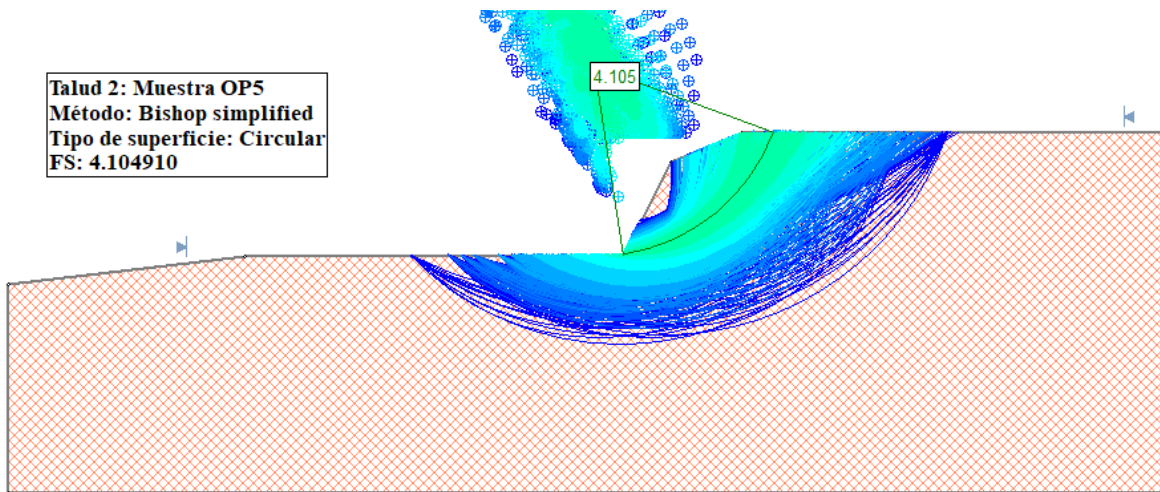


Figura 46. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Bishop Simplified para el Talud 2.

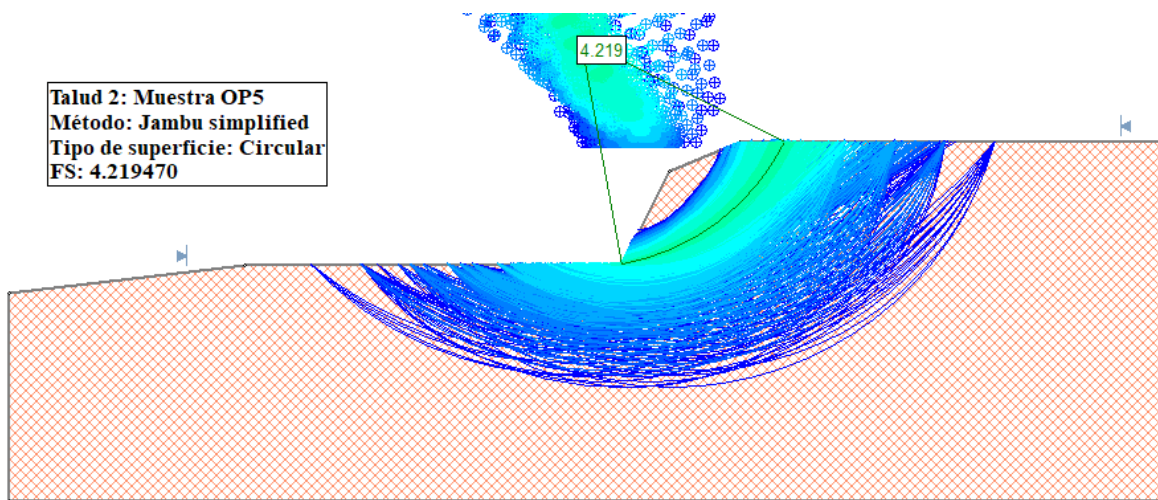


Figura 47. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Jambu Simplified para el Talud 2.

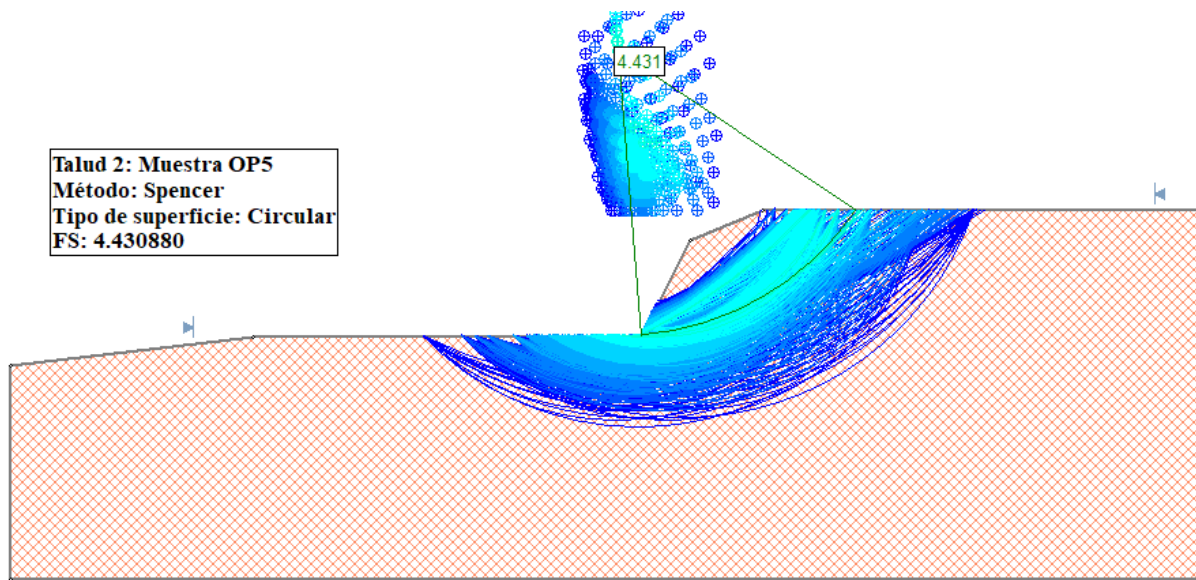


Figura 48. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método de Spencer para el Talud 2.

8.2.2.3. Talud 3: Muestra OP6. El último talud sometido bajo análisis presenta características totalmente diferentes a los anteriores, pues sus propiedades físicas son más desfavorables y los valores de resistencia mecánica de la roca son más bajos. En los resultados se observan factores de seguridad oscilan entre valores de 1,46 y 1,56, siendo un talud aun considerablemente estable. Esto se debe principalmente a las características geométricas y mecánicas del mismo, pues presenta una mayor altura e inclinación, y también su valor de cohesión es el menor.

El material que compone este talud es diferente al de los anteriores, pues corresponde a un suelo residual asociado a un gneis bandeado, por ende, los resultados que arroja el análisis varían considerablemente. Aun así, en ambos se considera que el material tiene una estabilidad aceptable y su probabilidad de presentar ruptura es baja.

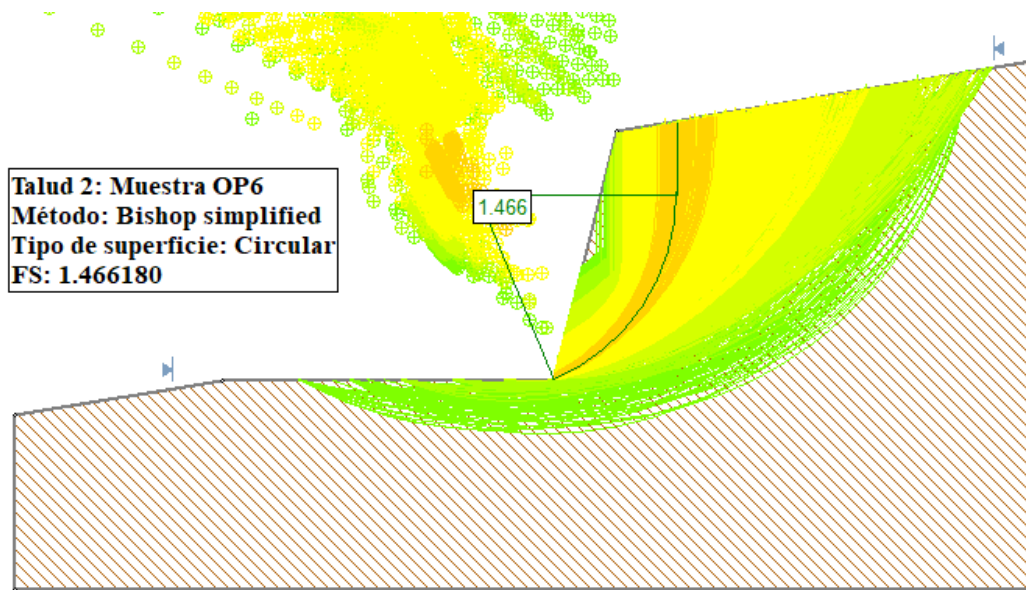


Figura 49. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Bishop Simplified para el Talud.

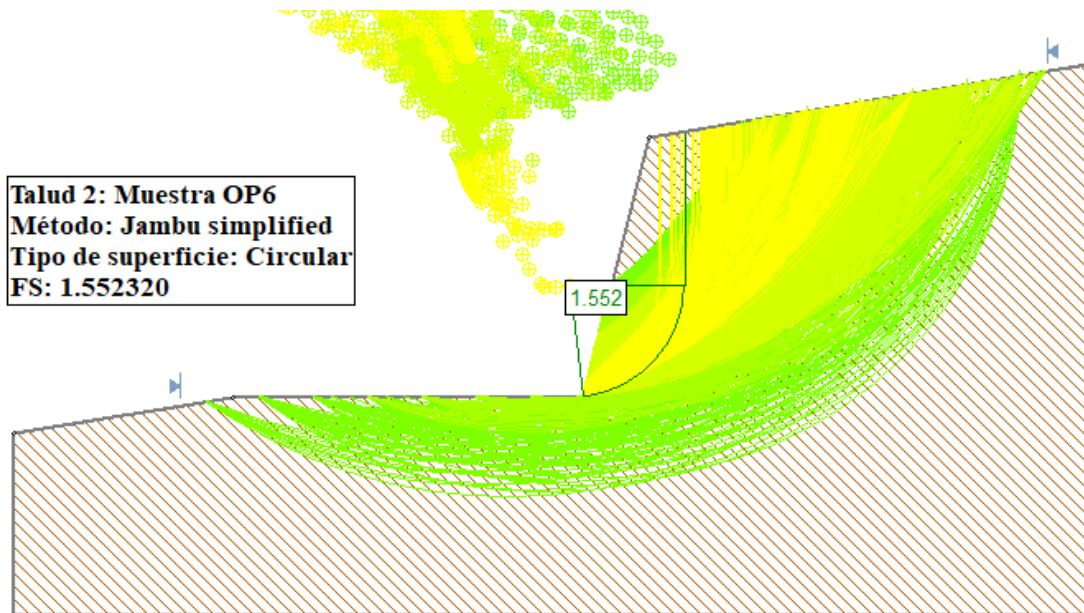


Figura 50. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método Jambu Simplified para el Talud 3.

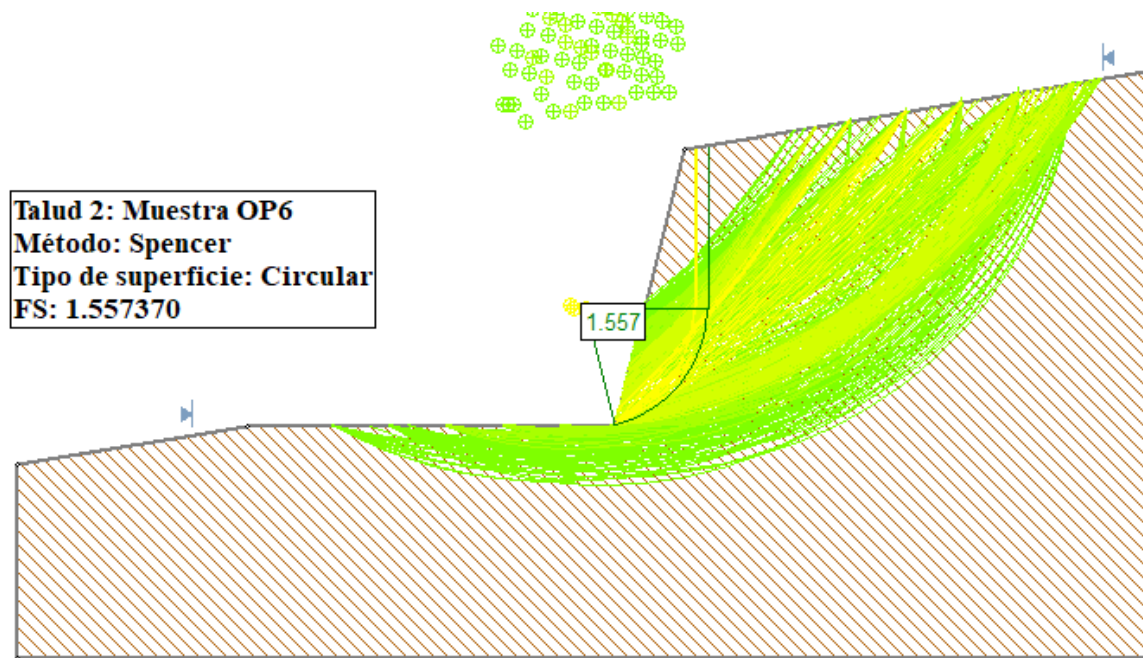


Figura 51. Superficie crítica de falla y su factor de seguridad encontrado por el método de Spencer para el Talud 3.

En este caso, los tres métodos arrojan la superficie crítica principal en el mismo lugar, sin embargo, se observa variaciones geométricas en las otras superficies consideradas a pesar de que todas las superficies tienen un factor de seguridad con magnitud muy similar.

Teniendo en cuenta que la sismicidad de la región en la que se encuentra el área de estudio es baja a nula y que la mayoría de las normas internacionales para análisis de estabilidad estáticas especifica que las condiciones de un talud son favorables a partir de un factor de seguridad de 1,5, los taludes 1 y 2 presentan condiciones de estabilidad muy favorables y no se considera necesaria la aplicación de medidas geotécnicas para su mantenimiento o prevención frente a posibles daños, ya que los modelos sugieren que no presentará rupturas de carácter circular bajo las condiciones normales.

Sin embargo, el talud 3 presenta valores de factor de seguridad entre los 1,46 y 1,56, ubicando su condición de estabilidad al límite del valor establecido por las diferentes normas. Por ende, se recomienda realizar una obra geotécnica de baja complejidad para mejorar lo suficiente su condición de estabilidad y prever la posible ruptura del terreno como, por ejemplo, la revegetalización o disminución del ángulo de pendiente del corte del talud.

9. Discusión

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos son consistentes y corresponden a los valores esperados tomando como base la literatura consultada de Zuquette (1993) y Nicoletti & Picanço (2017), presentando suelos residuales de alto peso específico (2,639 – 2,819) con un comportamiento arenoso (cohesiones entre los 30 y 40 Kpa) a arcilloso (cohesiones mayores a 130Kpa) de mediana a alta plasticidad, lo cual evidencia que las rocas han estado expuestas al intemperismo de forma constante durante un periodo de tiempo prolongado, generando regolitos muy desarrollados con una alta presencia de óxido de hierro y espesores que pueden llegar a superar los 20m. Las características geomecánicas determinadas exhiben ángulos de fricción interna entre los 26° y 32°, los cuales se ajustan a los valores esperados para suelos residuales derivados de granitos y gneises.

Sin embargo, en este caso de aplicación la información geotécnica obtenida los ensayos de laboratorio solo fue útil para la descripción, mas no para la identificación y delimitación de las

diferentes unidades de materiales no consolidados, puesto que los diferentes tipos de roca madre presentes en la zona presentan una composición semejante, y al estar sujetas a la erosión y los procesos de intemperismo en la superficie, tienden a perder parte de las características heredadas de la roca madre durante los procesos de alteración, formando materiales no consolidados con características geotécnicas variables a pesar de pertenecer a protolitos similares. Por ejemplo, las medidas de peso específico determinadas para todos los materiales oscilaban en rangos similares, a su vez, con los porcentajes de los límites de Atterberg y el grado de plasticidad de suelos no se conseguía diferenciar cuales eran asociados a gneises y cuales eran asociados a granitos, lo que muestra que solo por medio de estas propiedades no era posible diferenciar los tipos de materiales no consolidados.

Por lo tanto, la identificación y definición de los materiales no consolidados no solo debía tener en cuenta la composición y las propiedades fisicomecánicas de los materiales, sino también sus características genéticas y morfométricas, lo cual valida la metodología empleada en este trabajo a través del árbol lógico adaptado de Zuquette, pues al agrupar los diferentes materiales en base a la génesis, el comportamiento físico mecánico y la morfometría de su terreno, se puede identificar y delimitar los materiales no consolidados que presentan comportamientos diferentes en la zona y cuáles de ellos son más propensos a sufrir erosión y/o eventos de movimientos en masa.

Por otra parte, se discute la clasificación jerárquica del mapa de unidades de materiales no consolidados, ya que en las diferentes clasificaciones empleadas en la cartografía geotécnica es catalogado como un mapa básico fundamental, pero en el proceso metodológico de este caso de aplicación se sintetizan datos geológicos, geomorfológicos, geotécnicos y pedológicos del medio físico. Lo que lleva a considerar que el mapa generado en este trabajo sea catalogado como un

mapa síntesis donde se muestra la zonificación geotécnica de los materiales no consolidados, puesto que se tienen en cuenta los diferentes atributos del medio sintetizándolos para su identificación y agrupación.

Sin embargo, esto depende de la metodología empleada por cada investigador, ya que autores como Fernandes de Andrade (2005) afirman que los materiales no consolidados se pueden identificar y definir solo mediante trabajo de campo, limitando sus variaciones en el espacio, sin tener en cuenta las características mecánicas y las formas de relieve para su delimitación, en otras palabras, basa su metodología solo en la génesis del material y las propiedades físicas del suelo observables en campo.

Respecto a los análisis de estabilidad de taludes, se observa que los modelos empleados en este trabajo son generados a partir de mediciones geométricas aproximadas y presentan condiciones desfavorables teniendo en cuenta que los datos empleados corresponden solo a la superficie del talud, presentando alta incertidumbre, puesto que se idealizan los materiales que componen los taludes al considerar el suelo residual como un material homogéneo.

Además, los modelos no tienen en cuenta las variables hidrogeológicas que se presentan en el interior del talud, mostrando solo la estabilidad de dichos taludes bajo condiciones de clima seco, donde no se presenta la saturación del suelo ni como aumenta la altura de la columna de agua como sería en el caso de un escenario lluvioso, lo cual afectaría considerablemente casos como el del Talud OP6 que se encuentra localizado cerca de un cauce fluvial.

Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, estos modelos nos brindan una idea aproximada de la susceptibilidad de los materiales no consolidados de la región a presentar movimientos en masa, cumpliendo su objetivo principal, el cual es mostrar la aplicación de los ensayos de mecánica de

suelos para la caracterización del comportamiento geotécnico del medio físico e incentivar a la caracterización de otros parámetros para la elaboración de otros productos relacionados al mapeamiento geotécnico.

Teniendo en cuenta los resultados, la región presenta taludes compuestos por materiales residuales en su mayoría estables con baja probabilidad de presentar movimientos en masa, puesto que presentan altas cohesiones y ángulos de fricción interna aceptables. A pesar de esto, se presentan materiales propensos a sufrir una rotura, como lo son aquellos que presentan texturas arenosas con baja cohesión en taludes de gran altura con características morfométricas de alta pendiente (como lo es el caso del Talud OP6).

A partir de los parámetros físicos obtenidos en laboratorio, las formas del relieve encontradas en el área de estudio y el análisis de estabilidad de taludes, se deduce que la zona de estudio presenta una baja susceptibilidad a movimientos en masa, puesto que las características morfométricas de la región no registran pendientes muy altas y los materiales no consolidados estudiados son considerados estables, teniendo en cuenta las propiedades geomecánicas de los materiales y los altos valores de factores de seguridad ($>1,5$), por lo que se espera que se presenten fenómenos de erosión natural progresiva de tipo fluvial, como se evidencia en los suelos transportados asociados a los afluentes hídricos de la cuenca Atibaia, y de tipo gravitacional como se evidencia en la pequeña capa coluvial (50cm) que cubre los suelos residuales en gran parte de la extensión de la región.

10. Conclusiones

A partir de bases cartográficas preexistentes, fotointerpretación y levantamiento de datos en campo de propiedades concernientes a la geología y morfometría del terreno se identificaron y caracterizaron las propiedades geológico-geotécnicas de 10 unidades de materiales no consolidados en la parte este del área de expansión urbana del municipio de Campinas, SP.

Para lograr identificar correctamente las unidades de materiales no consolidados fue necesario emplear una metodología basada en la superposición de mapas que evidenciaran las características genéticas, geológicas y morfométricas de los suelos, ya que a pesar que los materiales del protolito presentaban gran similitud en su composición, dieron lugar a materiales no consolidados con características geotécnicas variables, imposibilitando su diferenciación únicamente por medio de los atributos geotécnicos.

Basándose ensayos de laboratorio se logró describir a detalle las características geotécnicas de las unidades de materiales no consolidados identificadas y se mostró una de las aplicaciones posibles de esta metodología a través del análisis de estabilidad de tres taludes compuestos por suelos residuales.

En la confección del mapa de materiales no consolidados, los procesos de adición, selección y generalización de atributos fueron de suma importancia, debido a la heterogeneidad que presentaban los datos en algunas zonas.

Este trabajo permitió recolectar importantes informaciones geotécnicas de la zona, permitiendo conocer a mayor detalle las características físicas del medio, dando lugar a una futura mejor

evaluación de las características físicas del terreno en conjunto con características bióticas y sociales, en lo referente a la expansión urbana de la región.

11. Recomendaciones

Se recomienda realizar un mayor despliegue en la recolección de muestras con el fin de obtener una mayor densidad de datos y generar productos con menor incertidumbre. Además, se sugiere emplear otros tipos de ensayos que no solo consideren las características superficiales, sino también las propiedades en profundidad del suelo, por ejemplo, diferentes tipos de sondeos o métodos indirectos a través de la geofísica que brinden características detalladas del subsuelo, con el fin de conocer parámetros como la variación del material en profundidad, el espesor total del material no consolidado y características hidrogeológicas como el nivel freático del agua, entre otros. Esto ayudaría a mejorar considerablemente la caracterización de los suelos y se tendría una base de datos más sólida a la hora de generar cartas derivadas en las que se tomen en cuenta estos materiales.

Respecto a la metodología empleada a través de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos, a pesar de que estos permitieron la obtención de parámetros físicos y mecánicos que posibilitaron la descripción geotécnica de los materiales no consolidados, se considera que su caracterización debe ser más detallada y que se deben emplear otros métodos para una mejor diferenciación. En el caso de las muestras alteradas, emplear métodos que complementen la información superficial

de los suelos como la caracterización de los índices físicos naturales, y en el caso de las muestras inalteradas, utilizar otros métodos que brinden información con mayor exactitud de las características mecánicas referentes a la resistencia del suelo, puesto que el ensayo de corte directo, a pesar de que presenta resultados aceptables, maneja un grado de incertidumbre considerable.

Para una mejor caracterización de los taludes, se recomienda modelos detallados de la topografía del terreno y obtener una mayor densidad de muestras donde se evidencien cambios en el perfil del suelo, tanto en superficie como en profundidad.

Para obtener los parámetros de resistencia al corte, se recomienda usar métodos más exactos como la compresión triaxial y otros tipos de ensayos que no solo caractericen lo encontrado en la superficie, sino como se mencionaba anteriormente, que también permitan plasmar en el modelo lo que se encuentra en el subsuelo.

Para futuras investigaciones, se podría realizar el análisis de estabilidad con mayor densidad de puntos de muestreo en el área de trabajo para lograr determinar por medio de modelos matemáticos los factores de seguridad para toda el área de estudio y así lograr elaborar una carta interpretativa referente a la estabilidad de los terrenos.

A partir de los datos obtenidos en este trabajo de investigación, se sugiere realizar la interpretación en conjunto con otras informaciones en donde se tomen en cuenta factores exógenos que afectan el medio como el uso del suelo, la cobertura vegetal, entre otros, y los componentes del medio biótico y social para generar cartas derivadas como la carta de vocación a la ocupación urbana (aptidão à urbanização en portugués).

Referencias bibliográficas

- ABNT. (1984a). *NBR 6508: Grãos de solos que passam a peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.
- ABNT. (1984b). *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- ABNT. (1984c). *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- ABNT. (1984d). *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT. (1986a). *NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (1986b). *NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Abreu, A. E., Augusto Filho, O., & Hirai, J. N. (2006). *Mapeamento geotécnico combinando três abordagens distintas: da EESC/USP, do IPT e do Detalhamento Progressivo - Aplicação ao Município de Analândia*. Nova Friburgo.
- Almeida, F., Hasui, Y., Brito-Neves, B., & Fuck, R. (1981). Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth-Sci*, 1-29.

- Almeida, F., Hasui, Y., & Brito Neves, B. (1976). The upper Precambian of South America. *Boletín Instituto Geociencias*, 45-80.
- ASTM . (1972). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conchohocken, PA.
- Barreto Franco, G., Gomes Marques, E. A., Calijuri, M. L., & Lima Gomes, R. (2010). CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA: ESTÁGIO ATUAL DO CONHECIMENTO. *Caminhos de Geografia*, 11(35), 158-172.
- Campos Neto, M., Basei, M., Alves, F., & Vasconcellos, A. (1984). A nappe de cavalgamento Socorro (SP-MG). *Congresso Brasileiro de Geologia 33*, 1809-1822.
- Caputo, H. P. (1967). *Mecânica dos solos e suas aplicaciones: Fundamentos*. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros técnicos e científicos Editora S.A.
- Castañeda, E., & Del Toro, W. (1993). *Mecánica de suelos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Cerri, L. (1990). *Carta Geotécnica: contribuições para uma concepção voltada as necessidades brasileiras*. Salvador: ABGE.
- Collaço, D. L. (2002). *Caracterização geológico-geotecnica do município de São Leopoldo-RS para fins de planejamento como subsídio ao plano diretor*. São Carlos.
- Cottas, L. R. (1983). *Estudos geológico-geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro-SP*. São Paulo,SP: Universidade de São Paulo.

- Diniz, N. C. (2012). Cartografía geotécnica por clasificación de unidades de terreno e avaliação de sustentabilidade e aptidão. *Revista brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 29-77.
- EMBRAPA. (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*.
- EMBRAPA. (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, DF.
- EMBRAPA. (2008). *Mapa Pedológico Semidetalhado do Município de Campinas, SP*. São Paulo.
- Fernandes de Andrade, R. (2005). *Mapeamento geotécnico preliminar em escala de semi-detalle (1:25.000) da área de expansão urbana de Uberlândia*. Uberlândia.
- Fernandes de Andrade, R. (2005). *Mapeamento geotécnico preliminar em escala de semi-detalle (1:25.000) da área de expansão urbana de Uberlândia-MG*. Uberlândia.
- Fernandes, A., Azevedo Sobrinho, J. M., & Teixeira, A. L. (1993). Mapa geológico do município de Campinas. Em Instituto Geológico, *Subsídios do meio físico geológico ao planejamento do município de Campinas* (p. Anexo 2.1). São Paulo: Relatório técnico do Instituto Geológico.
- Fiori, A. P., & Carmignani, L. (2009). *Fundamentos de mecânica dos solos e rochas*. São Paulo: Editora UFPR.
- Gomes Pinto, C. H. (2016). *Mapeamento e caracterização de materiais inconsolidados em perfis de regolito no distrito de sousas (Campinas, SP)*. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas.

González de Vallejo, L. L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.

IBGE. (1973). *Campinas - Golha topográfica (SF-23-Y-A-VI-A-4)*. Rio de Janeiro: Escala: 1:50.000.

Instituto Geológico. (1993). *Subsídios do Meio Físico-Geológico ao Planejamento do Município de Campinas (SP)*. São Paulo: Secretaria do meio ambiente do estado de São Paulo.

Instituto Geológico. (1993). *Subsídios do Meio Físico-Geológico ao Planejamento do Município de Campinas (SP)*. São Paulo: Secretaria do meio ambiente do estado de São Paulo.

International Association of Engineering Geology (IAEG). (1976). *Engineering geological map: a guide to their preparation*. Paris: UNESCO Press.

Lokin, P. (1986). Engineering geology in regional an urban planning of Iugoslávia. *Congress of the IAEG*, (pp. 1815-1819). Buenos Aires.

Morais, S. M. (1999). *Programa Levantamentos Geológicos Básico do Brasil: Integração Geológica da Folha Campinas*. São Paulo: CPRM.

Nicoletti Simplicio, M., & Picanço, J. (2017). Caracterização de coberturas inconsolidadas na região norte de Campinas-SP. *Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento* (pp. 4269-4274). Campinas-SP: Instituto de Geociências - Unicamp.

Pinto, C. d. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas*. São Paulo: Oficina de Textos.

- Rodrigues, V. P., & Augusto Filho, A. (2007). Mapeamento geotécnico do preímetro urbano e sua área de expansão no município de Jaú;SP> base para o planejamento urbano e ambiental. *Simpósio brasileiro de cartografia geotécnica e geoambiental* (pp. 725-740). Uberlandia: ABGE.
- Senna, J., & Kazuo, C. (24 de Noviembre de 2010). *Mapa geológico simplificado do município de Campinas*. Fonte: Geociências virtual: <https://www2.ib.unicamp.br/lte/gv/visualizarMaterial.php?idMaterial=1187>
- SEPLAMA. (1996). *Plano de gestão da área de proteção ambiental da região de Sosas e Joaquim Egidio APA municipal*. Campinas-SP.
- SEPLAMA. (2006). *Plano diretor*. Campinas, SP.
- Souza Valladares, G., Marques Coelho, R., & Koiti Chiba, M. (2008). *Mapa Pedológico do Município de Campinas, SP: Legenda Expandida (Comunicado Técnico, 24)*. Campinas, SP.
- Souza Valladares, G., Masques Coelho, R., & Koiti Chiba, M. (2008). *Mapa Pedológico do Município de Campinas, SP: Legenda Expandida (Comunicado Técnico, 24)*. Campinas, SP.
- Tassinari, C., & Campos Neto, M. (1988). Precambrian continental crust evolution of southeastern São Paulo State-Brazil: based on isotopic evidences. *Geochimica Brasiliensis*, 175-183.
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1948). *Soil Mechanics in Engineerig Practice*. New York.
- Valiente Sanza, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2015). Estabilidad de taludes: Conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *Civilizate No. 7*, 50-54.

- Varnes, D. J. (1974). *The Logic of Geological Maps, with reference to their interpretation and use for engineering purposes. U.S. Geological Survey Prof. Paper* , iv+48 pp.
- Vlach, S. R. (1993). *Geologia e petrologia dos granitóides de Morungaba, SP*. São Paulo.
- Yoshinaga, S., & Silva, A. (1997). Condições de ocorrência das águas subterrâneas e do potencial produtivo dos sistemas aquíferos na região metropolitana de Campinas. *Revista IG*, 23-40.
- Yoshinaga, S., Fernandes, A. J., Nogueira, S., Hassuda, S., & Pires Neto, A. G. (1995). Subsídios ao planejamento territorial de campinas: A aplicação da abordagem de tipos de terreno. *Revista IG*, 71-75.
- Zaine, J. E. (2000). *Mapeamento geológico-geotécnico por medio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP)*. Rio Claro (SP).
- Zuquette, L. V. (1987). *Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para condições brasileiras*. São Carlos.
- Zuquette, L. V. (1993). *Importância do mapeamento geotécnico no uso de ocupação do meio físico: Fundamentos e guia para elaboração*. São Carlos-SP: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Zuquette, L. V., & Gandolfi, N. (2004). *Cartografia geotécnica*. São Paulo: Oficina de Textos.

Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la
Biblioteca UIS)

Apéndice A. Resultados ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.

Apéndice B. Tablas de parámetros geotécnicos de los materiales no consolidados.

Apéndice C. Productos cartográficos del mapeamiento geotécnico.