UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA
"JOSÉ SIMEÓN CAÑAS"

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR Y APLICACIÓN A LA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREPARADO PARA LA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PARA OPTAR AL GRADO DE
INGENIERO CIVIL

POR:
HUGO ERNESTO ESCOBAR CORLETO
MARÍA RENÉE ESCOBAR MORALES
JOSÉ RODRIGO RENDÓN RODRÍGUEZ

OCTUBRE DE 2003
SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA

RECTOR
JOSÉ MARÍA TOJEIRA, S.J.

SECRETARIO GENERAL
RENÉ ALBERTO ZELAYA

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
CELINA PÉREZ RIVERA

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
JOSÉ MAURICIO CEPEDA

DIRECTOR DEL TRABAJO
MANUEL ROBERTO DÍAZ FLORES

LECTOR
ERICK ANTONIO BURGOS GANUZA

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios Padre Todopoderoso y a mi Señor Jesucristo por haberme dado toda la fortaleza necesaria para lograr llegar al final de mi carrera y por haber alimentado mi sed espiritual cuando más lo necesité, porque sé que no lo hubiera logrado sin Él.

A mi familia... lo más importante en mi vida, a mi papá por todas sus palabras de aliento y apoyo incondicional, por el ejemplo y testimonio de su vida en mi, y sobre todo por su gran amor; a mi mamita linda, por ser la más abnegada, tierna y cariñosa de las madres, la que siempre se preocupó por esos aparentemente pequeños detalles en mi y siempre los llenó con su amor; a mis hermanos, principalmente a Quique por aconsejarme y apoyarme con su arduo trabajo y su sacrificio por la familia.

A mis familiares y amigos... Tía Chita y Tía Ruth, quienes estuvieron pendientes del progreso en mi carrera y mi tesis. A Luis, por haber extendido su valiosa ayuda y por haberme mostrado su amistad desde siempre.

A mis compañeros de tesis... Nenee y Rodrigo, quienes no sólo son mis compañeros sino también los considero mis amigos.

A mis profesores de la U, principalmente a la Ing. Alfaro cuyas enseñanzas fueron invaluables.

Hugo Ernesto Escobar Corleto

AGRADECIMIENTOS

Tengo tanto y a tantos que agradecer:

- En primer lugar a Dios todopoderoso por haberme llevado a culminar mi carrera.
- A mi familia, a mi mami linda y a la Ale, muchas gracias por darme su apoyo, su amor y su cariño, gracias por estar siempre conmigo y por ser mi fuerza de cada día.
- A mi Luispi, por ser mi novio, mi amigo y mi apoyo incondicional.
- A mi viejis, por quererme tanto cada día.
- A mi primis (Doris) porque aunque sea de lejos su apoyo nunca me faltó.
- A mis amigas: Marcela (la Gorda), Clelia, Hazel, Marcela (Zacapa) y Ninoska, porque aunque no nos vemos o nos hablemos todos los días, sé que siempre podré contar con ustedes.
- A mis compañeros de tesis, Hugo y Rodrigo, por ser también mis amigos no solo durante este trabajo sino para siempre.
- Y a todos los que creyeron que yo podía.

María Renée Escobar Morales

Agradezco de todo corazón:

- A DIOS TODOPODEROSO Y A MARIA AUXILIADORA: Por darme amor incondicional, apoyo y esperanza para salir siempre adelante.

- A MI MADRE Y ABUELA: Gladys y Rosaura Rodríguez, por su amor, paciencia y apoyo durante toda mi vida.

- A MI FAMILIA: Por tenerme siempre presente en sus intenciones.

- A MIS AMIGOS: Por acompañarme en las buenas y las malas, por brindarme su amistad y comprensión.

- A MIS COMPAÑEROS: Hugo y María Renée, por la amistad, las muestras de compañerismo y apoyo en todas las dificultades.

JOSE RODRIGO RENDON RODRIGUEZ

SUMARIO.

En este trabajo se hace una recopilación de información de estudios de suelos de toda el AMSS que incluye resultados de pruebas triaxiales, SPT y de clasificación de suelos, para caracterizar geotécnicamente las siete unidades geológicas que cubren el área utilizando herramientas de SIG, el resultado de esta caracterización es un mapa que se muestra en el capítulo 4, en el cual se presentan las siete unidades geológicas con valores representativos de ángulo de fricción, cohesión y peso específico según los datos recopilados analizados estadísticamente. En el capítulo 5 se aplica el método Mora-Vahrson-Mora para elaborar un mapa de amenaza por deslizamiento, que utiliza factores morfodinámicos (litología, humedad y relieve) y factores de disparo (sismo y lluvia) para evaluar la amenaza.

INDICE GENERAL

Índice de Tablas

Índice de Figuras

Siglas 1

Simbología 2

Abreviaturas 4

1. Antecedentes.

1.1 Introducción. 7

1.2 Reseña histórica. Deslizamientos ocurridos en el país. 8

1.2.1 Antecedentes de estudios geotécnicos realizados en El Salvador. 13

1.2.2 Antecedentes de estudios de amenaza por deslizamiento realizados en El Salvador. 16

1.3 Objetivos 17

1.3.1 Objetivos generales. 17

1.3.2 Objetivos específicos. 18

1.4 Limitaciones y alcances 18

1.4.1 Limitaciones. 18

1.4.2 Alcances. 18

2 Marco teórico.

2.1 Geología. 23

2.1.1 Geología regional Centroamericana. 23

2.1.2 Rocas que componen el territorio salvadoreño. 24

2.1.3 Geología y aspectos geotécnicos del AMSS. 26

2.1.4 Estratigrafía del AMSS 31

2.2 Propiedades geotécnicas. 33

2.2.1. Ángulo de fricción. 33

2.2.2. Cohesión. 33

2.2.3. Peso específico. 34

2.2.4. Porosidad. 34

2.2.5. Consistencia. 35

2.2.6. Permeabilidad. 35
2.3 Resistencia al corte. 35
2.3.1. Criterio de rotura. 35
2.3.2. Pruebas comúnmente usadas para determinar la resistencia al corte de los suelos. 37
2.4 Definición de caracterización geotécnica 40
2.5 Movimientos de masa 41
2.5.1. Factores que influyen en el movimiento de masa. 41
2.5.2. Mecanismos de desencadenamiento. 42
2.5.3. Tipos de movimientos de masa. 44
2.5.4. Deslizamientos 47
2.5.5. Definición y clasificación de taludes. 50
2.5.6. Estabilidad de taludes 52
2.6 Peligrosidad, Vulnerabilidad y Riesgo. 53
2.6.1 Amenaza por deslizamientos de tierra. 56
2.7 Sistemas de Información Geográfica. 57
2.7.1 Introducción. 57
2.7.2 Conceptos básicos 58
2.7.3 Estructura de base de datos para un SIG 61
2.7.4 Herramientas de software idóneas para una caracterización geotécnica. 62

3 Metodología.
3.1 Recopilación de los valores de las propiedades geotécnicas de las unidades geológicas para el AMSS. 69
3.2 Complementación de la base datos. 70
3.3 Generación del mapa de caracterización geotécnica de las unidades geológicas. 72
3.4 Generación de mapa de susceptibilidad de amenaza al deslizamiento utilizando el método Mora-Vahrson-Mora. 80
3.4.1 Descripción del método de Mora-Vahrson-Mora. 80
3.4.2 Descripción de los factores de susceptibilidad del método de Mora-Vahrson-Mora para el área de estudio. 82

4 Caracterización geotécnica de los estratos geológicos para el área de estudio.
4.1 Introducción. 89
4.2 Mapa Geológico del AMSS. 89

4.3 Obtención, complementación y análisis de la información recopilada. 91
4.3.1 Recopilación de los valores de las propiedades geotécnicas de las unidades geológicas para el AMSS. 92
4.3.2 Complementación de la base de datos. 92
4.3.3 Análisis de las propiedades geotécnicas de los registros por unidad geológica. 93
4.4 Elaboración del mapa con la caracterización geotécnica del área de estudio. 109
4.4.1 Caracterización geotécnica con el valor de ϕ. 109
4.4.2 Caracterización geotécnica con el valor de cohesión. 113
4.4.3 Caracterización geotécnica con del peso específico. 116
4.5 Discusión de los mapas. 119
4.5.1 Deslizamientos ocurridos dentro de las unidades geológicas del área de estudio. 119
4.5.2 Relación entre los deslizamientos ocurridos y la caracterización geotécnica del área de estudio. 120

5 Elaboración de mapa de amenaza por deslizamiento para el área de estudio.
5.1 Generación del mapa de susceptibilidad de amenaza por deslizamientos aplicando el método Mora-Vahrson-Mora. 127
5.2 Datos de entrada. 128
5.2.1 Factores de susceptibilidad. 128
5.2.2 Factor de disparo. 129
5.3 Mapa de amenaza por deslizamiento. Obtención de los valores de susceptibilidad al deslizamiento. 130
5.4 Comparación con trabajos existentes. 135
5.5 Análisis de deslizamientos ocurridos para el área de estudio. 136

6 Conclusiones y recomendaciones.
6.1 Conclusiones. 143
6.2 Recomendaciones. 144

Bibliografía 149

Glosario 155

Anexo A A-1

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Secuencia estratigráfica bajo San Salvador y alrededores. 32

Tabla 2.2. Factores influyentes en la inestabilidad de los taludes. 53

Tabla 3.1. Instituciones o laboratorios consultados para la recopilación de la información. 70

Tabla 3.2. Formato de presentación de base de datos. 70

Tabla 3.3. Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento. 82

Tabla 3.4. Clases de pendientes, condiciones del terreno y valoración del parámetro S_p. 83

Tabla 3.5. Valoración del parámetro susceptibilidad litológica. 84

Tabla 3.6. Valores asignados a los promedios mensuales de lluvias. 84

Tabla 3.7. Factor de humedad Sh, resultado de la clasificación de valores acumulados de los promedios de precipitación de cada mes. 85

Tabla 3.8. Valoración del parámetro de disparo por D_s. 85

Tabla 3.9. Valoración del parámetro de disparo por lluvias D_{ll}. 85

Tabla 4.1. Unidades geológicas correspondientes al área de estudio. 91

Tabla 4.2. Valores mínimos, medios, máximos y seleccionados para el ángulo de fricción de cada unidad geológica. 108

Tabla 4.3. Valores mínimos, medios, máximos y seleccionados para la cohesión de cada unidad geológica. 108

Tabla 4.4. Valores mínimos, medios, máximos y seleccionados para el peso específico de cada unidad geológica. 109

Tabla 4.5. Deslizamientos para el área de estudio debido a sismo y lluvia recopilados por Rymer (1987), MARN y FAES. 119

Tabla 5.1. Información utilizada para la obtención de los parámetros pasivos y de disparo. 128

Tabla 5.2. Área en km^2 para las regiones clasificadas por susceptibilidad al deslizamiento por sismo. 131

Tabla 5.3. Área en km^2 para las regiones clasificadas por susceptibilidad al deslizamiento por lluvia. 132

Tabla 5.4. Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento de acuerdo al intervalo. 133

Tabla 5.5. Área en km^2 para las regiones clasificadas por susceptibilidad al deslizamiento por sismo y lluvia. 133

Tabla 5.6. Deslizamientos para el área de estudio recopilados por Rymer (1987), MARN y FAES, de acuerdo a la clasificación de susceptibilidad al deslizamiento debido a sismo y lluvia del área de estudio. 138

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de El Salvador mostrando su morfología. 8

Figura 1.2. Lugar donde se originaron los deslizamientos en el volcán de San Vicente en 1995. 10

Figura 1.3. Deslizamiento en Las Colinas. 11

Figura 1.4. Deslizamiento en la Carretera Panamericana cerca de San Vicente, en el lugar conocido como La Leona. 12

Figura 1.5. Mapa de ubicación de los deslizamientos más importantes provocados por el sismo del 13 de Febrero de 2001. 12

Figura 1.6. Deslizamiento ocurrido al este del lago de Ilopango provocado por el sismo del 13 de Febrero. 13

Figura 2.1. Panorama Tectónico Regional 23

Figura 2.2. Espesores de tierra blanca en el Área de San Salvador. 27

Figura 2.3. El círculo de Mohr. 33

Figura 2.4. Criterio de rotura en suelos. 36

Figura 2.5. Penetrómetro estándar o "toma muestras". 38

Figura 2.6. Equipo para el ensayo de penetración estándar. 38

Figura 2.7. Clasificación general de los movimientos de ladera. 45

Figura 2.8. Esquema de un deslizamiento rotacional y partes del mismo. 48

Figura 2.9. Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos. 52

Figura 2.10. Elementos que componen los arcos. 59

Figura 2.11. Representación de modelos de datos raster y vectorial. 61

Figura 3.1. Correlación entre el ángulo de fricción y el valor N según Peck, Hanson y Thornburn, 1953. 71

Figura 3.2. Correlación entre el valor de peso específico, la clasificación del tipo de suelo de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el ángulo de fricción y el valor N. 72

Figura 3.3. Selección de archivo con formato DBF. 73

Figura 3.4. Visualización de Tabla en Arc View. 74

Figura 3.5. Ventana Add Event Theme (Agregar un tema de eventos). 75

Figura 3.6. Visualización de dispersión de datos. 75

Figura 3.7. Visualización de tema en formato .shp. 76

Figura 3.8. Entrada de un registro con coordenadas desconocidas. 77

Figura 3.9. Visualización de tabla de atributos del tema Base de datos_Completa.shp. 77

Figura 3.10. Edición de registros. 78

Figura 3.11. Mapa Geológico de la Región Metropolitana de San Salvador. Escala 1:15000. 79
Figura 4.1. Mapa de San Salvador y sus alrededores, mostrando el área que comprende el mapa geológico mostrado en la figura 4.2. 90
Figura 4.2. Mapa geológico para el área de estudio con las 7 unidades geológicas. 90
Figura 4.3. Ubicación de los registros recopilados sobre el mapa geológico. 92
Figura 4.4. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad b2. 93
Figura 4.5. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad c3. 94
Figura 4.6. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad s1. 95
Figura 4.7. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad s3'a. 95
Figura 4.8. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad s4. 96
Figura 4.9. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad s5'a. 97
Figura 4.10. Distribución Frecuencia-Ángulo de fricción para la unidad S5'b. 98
Figura 4.11. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad b2. 99
Figura 4.12. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad c3. 99
Figura 4.13. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad s1. 100
Figura 4.14. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad s3'a. 101
Figura 4.15. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad s4. 101
Figura 4.16. Distribución Frecuencia-Cohesión para la unidad s5'a. 102
Figura 4.17. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad b2. 103
Figura 4.18. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad c3. 104
Figura 4.19. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad s1. 105
Figura 4.20. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad s3'a. 105
Figura 4.21. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad s4. 106
Figura 4.22. Distribución Frecuencia-Peso Específico para la unidad S5'a. 107
Figura 4.23. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ mínimo de cada unidad geológica para el Área de estudio. 110
Figura 4.24. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ medio de cada unidad geológica para el Área de estudio. 110
Figura 4.25. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ máximo de cada unidad geológica para el Área de estudio. 111
Figura 4.26. Caracterización geotécnica con el valor de ϕ de cada unidad geológica para el Área de estudio. 112
Figura 4.27. Caracterización geotécnica con el valor de Cohesión mínima de cada unidad geológica para el área de estudio. 113
Figura 4.28. Caracterización geotécnica con el valor de Cohesión media de cada unidad geológica para el Área de estudio. 114

Figura 4.29. Caracterización geotécnica con el valor de Cohesión máxima de cada unidad geológica para el Área de estudio. 114
Figura 4.30. Caracterización geotécnica con el valor de Cohesión de cada unidad geológica para el Área de estudio. 115
Figura 4.31. Caracterización geotécnica con el valor de Peso específico mínimo de cada unidad geológica para el Área de estudio. 116
Figura 4.32. Caracterización geotécnica con el valor de Peso específico medio de cada unidad geológica para el Área de estudio. 117
Figura 4.33. Caracterización geotécnica con el valor de Peso específico máximo de cada unidad geológica para el Área de estudio. 117
Figura 4.34. Caracterización geotécnica con el valor de Peso específico de cada unidad geológica para el Área de estudio. 118
Figura 4.35. Porcentajes de deslizamientos ocurridos hasta el 2001 para cada unidad geológica del área de estudio. 120
Figura 4.36. Ubicación de los deslizamientos dentro de cada unidad geológica caracterizada con el valor de cohesión seleccionado para el Área de estudio. 120
Figura 4.37. Comparación relativa de deslizamientos y cohesión vrs unidad geológica. 121
Figura 4.38. Ubicación de los deslizamientos dentro de cada unidad geológica caracterizada con el valor de ϕ para el Área de estudio. 122
Figura 4.39. Comparación relativa de deslizamientos y ϕ vrs unidad geológica. 122
Figura 4.40. Ubicación de los deslizamientos dentro de cada unidad geológica caracterizada con el valor del peso específico para el Área de estudio. 123
Figura 4.41. Comparación relativa de deslizamientos y peso específico vrs unidad geológica. 123
Figura 5.1. Susceptibilidad al deslizamiento por sismo para el área de estudio. 130
Figura 5.2. Susceptibilidad al deslizamiento por lluvia para el área de estudio. 132
Figura 5.3. Susceptibilidad al deslizamiento por sismo y lluvia para el área de estudio, utilizando el método Mora Vahrson Mora. 134
Figura 5.4. Áreas porcentuales de acuerdo a la clasificación de susceptibilidad al deslizamiento por sismo y lluvia. 135
Figura 5.5. Susceptibilidad al deslizamiento por sismo y lluvia. Escala 1:50,000. 136
Figura 5.6. Susceptibilidad al deslizamiento por sismo y lluvia para el área de estudio, utilizando el método Mora Vahrson. 136
Figura 5.7. Deslizamientos ocurridos al 2001 en las regiones clasificadas de acuerdo a la susceptibilidad al deslizamiento por sismo y lluvia para el área de estudio utilizando el método Mora Vahrson Mora. 137

Figura 5.8. Porcentajes de deslizamientos ocurridos hasta el 2001 para región clasificada de acuerdo a la susceptibilidad al deslizamiento. 138

Figura 5.9. Relación porcentual entre los deslizamientos ocurridos al 2001 y el área de cada región clasificada por susceptibilidad al deslizamiento por sismo y lluvia. 139

SIGLAS

AMSS	Área Metropolitana de San Salvador
ASIA	Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos
ASTM	American Standard for Testing and Materials.
CAD	Diseño Asistido por Computadora
CASALCO	Cámara Salvadoreña de la Construcción
DBMS	Sistemas de Manejo de Bases de Datos
FAES	Fuerza Armada de El Salvador
ICIA	Ingenieros Civiles Asociados S.A. de C.V.
IGN	Instituto Geográfico Nacional
MARN	Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PRISMA	Programa Salvadoreño de Investigación sobre desarrollo y Medio Ambiente
SIG	Sistemas de Información Geográfico
SNET	Servicio Nacional de Estudios Territoriales
SPT	Prueba de Penetración Estándar (Standard Penetration Test)
UCA	Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas"
USGS	United States Geological Survey

SIMBOLOGÍA

ϕ	ángulo de fricción interna del suelo
γ	peso específico del suelo
σ'	esfuerzo normal efectivo en el plano de corte
σ_n	esfuerzos totales normales
°C	grados centígrados
b1	aglomerados volcánicos, intercalados con tobas y corrientes de lavas andesíticas y basálticas.
b2	andesitas, tobas consolidadas
b3	andesitas y basaltos (con ligera meteorización)
c	cohesión del suelo
CD	consolidado Drenado
CU	consolidado no drenado
c1	tobas consolidadas y cenizas volcánicas
c2	riolitas, dacitas y andesitas
c3	andesitas, basaltos medianamente meteorizados
D	factores de disparo
Dll	disparo por lluvia
Ds	disparo por sismicidad
e	índice de Poros
EP	elementos pasivos
H	grado de susceptibilidad al deslizamiento
Hll	Susceptibilidad al deslizamiento por lluvias
Hs	Susceptibilidad al deslizamiento por sismicidad
N	numero de golpes de la prueba SPT
n	porosidad
ML	limo arenoso
Q'f	depósitos sedimentarios intercalados de rocas piroclásticas.
s	resistencia al corte del suelo
SC	arena arcillosa
SM	arena limosa
SP	arena limpia
s1	tobas consolidada, tobas aglomeráticas, tobas fundidas y andesitas.
s2	andesitas y basaltos, tobas consolidadas, no meteorizadas.
s3'a	tobas color café, tobas de cenizas volcánicas
s3'b	riolitas y dacitas sin meteorización

s4	tierra blanca de San Salvador, arena limosa y limo arenoso
s5'a	andesitas, basaltos sin meteorización
s5'b	escoria volcánica, tobas consolidadas
s5'c	tobas medianamente consolidadas
u	presión intersticial
S_h	parámetro de humedad del terreno
S_l	parámetro de susceptibilidad litológica
S_p	parámetros de disparo por sismicidad
UU	no consolidado no drenado

ABREVIATURAS

C	Costo
cm	Centímetro
FS	Factor de seguridad
g	Gravedad
kg	Kilogramos
km	kilómetros
km^2	Kilómetro cuadrado
kN/m^3	Kilo newtons por metro cúbico
kPa	Kilopascales
lb/pie^3	Libras por pie cúbico
m	Metro
m^3	Metro cúbico
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NE	Noreste
R	Riesgo
SE	Sureste
SO	Suroeste
t/m^3	Toneladas por metro cúbico
V	Vulnerabilidad

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.

1.1. Introducción.

La historia de nuestro país ha demostrado una alta susceptibilidad a sufrir deslizamientos y derrumbes inducidos por precipitaciones. Como suele acontecer siempre que hay lluvias fuertes y prolongadas, gran cantidad de deslizamientos de suelo ocurren en los taludes a orillas de las quebradas, presentando una amenaza para las comunidades marginales que se ubican cerca de las mismas. Básicamente El Salvador tiene dos estaciones y entre ellas una transición de cuatro semanas; la estación lluviosa es de Mayo a Octubre y la estación seca es de Noviembre a Abril aunque no es raro tener lluvias fuertes durante el año.

Pero no sólo las precipitaciones han sido una de las principales causas de derrumbes, sino que, de igual forma, los sismos han sido causas del cambio del relieve nacional. El Salvador está situado sobre una región de alta sismicidad y está afectado principalmente por cuatro diferentes procesos tectónicos que ocurren en el área [Hrafn & Ledru, 1996]:

- La zona de subducción, ubicada aproximadamente a 30 km al sur de la costa salvadoreña en el Océano Pacífico donde la placa de cocos se introduce bajo la placa del caribe.
- Las fallas regionales, originadas por la interacción entre las placas del caribe y de Norteamérica.
- La actividad volcánica.
- Las fallas locales.

El Salvador tiene 28 volcanes que son parte de la cadena volcánica centroamericana, la cual se extiende desde Costa Rica hasta Guatemala, de estos volcanes algunos están extintos y otros se consideran inactivos. Entre los activos se pueden mencionar por ejemplo el volcán de San Miguel, Santa Ana, Izalco y San Salvador; este último tuvo su última erupción en 1917, pero hoy en día no muestra ninguna evidencia de actividad. [Hrafn & Ledru, 1996].

Geológicamente hablando, El Salvador es un país joven. Una cuarta parte del territorio nacional es de la era cuaternaria, y tres cuartas partes están cubiertas por rocas de edad terciaria. Las más antiguas son las Rocas Sedimentarias marinas, que cubren aproximadamente el 5% del territorio salvadoreño y se formaron a finales de la era Secundaria (periodo Cretácico del Mesozoico). La topografía del país es quebrada e irregular debido a la actividad volcánica y tectónica que modeló la superficie del país durante la era Terciaria.

El Salvador puede dividirse en cinco provincias fisiográficas de norte a sur: la planicie costera, las montañas norteñas, el valle interior, las montañas costeras y la cadena volcánica. Ver figura 1.1.

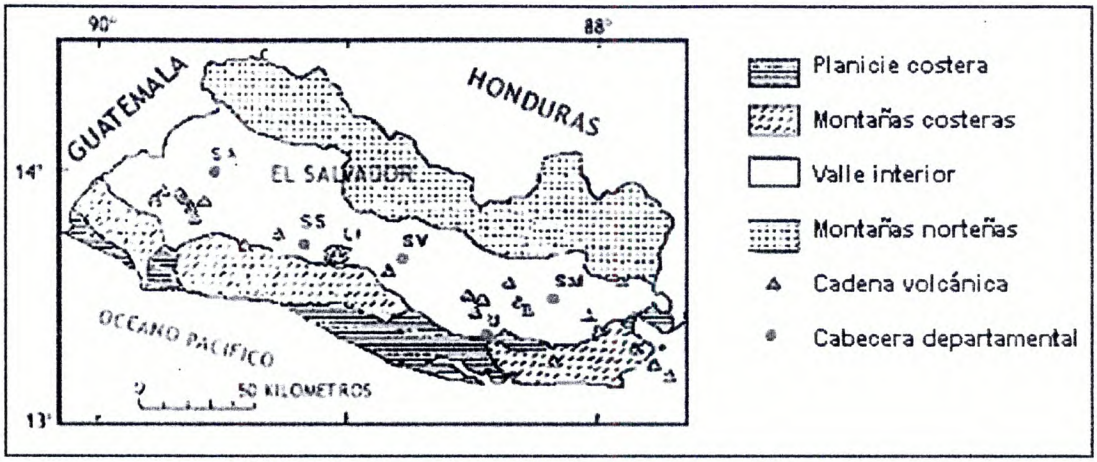

Figura 1.1. Mapa de El Salvador mostrando su morfología. SS = San Salvador, LI = Lago de Ilopango, SA = Santa Ana, SV = San Vicente, SM = San Miguel, U = Usulután. [Adaptado de Bäcklin y Finnson, 1996]

1.2. Reseña histórica. Deslizamientos ocurridos en el país.

Los deslizamientos acompañan casi siempre a los eventos sísmicos y lluvias prolongadas. El número de deslizamientos que se origina durante los sismos o fuertes precipitaciones en Centroamérica es muy alto. Según varios autores entre los deslizamientos de gran magnitud ocurridos en el país se encuentran, entre otros, los siguientes:

- El 6 de septiembre de 1915 ocurrió un terremoto que causó una gran cantidad de deslizamientos en el oeste de San Salvador, la carretera hacia Juayúa fue destruida por hundimientos y deslizamientos y el norte de Santa Catarina, Nahuizalco y Armenia fueron afectados. [Arévalo Saade, et. al, 2001].

- El 28 de abril de 1919 muchos deslizamientos se produjeron en el cerro de San Jacinto debido a un fuerte sismo. [Arévalo Saade, et. al, 2001].

- En 1934, después de 7 días de intenso temporal, se presentaron severos deslizamientos en varios puntos del país. Todo el relieve salvadoreño cambió debido a las enormes cantidades de deslizamientos; el principal de éstos ocurrió en el Volcán de San Salvador. [Hrafn & Ledru, 1996].

- El 19 de diciembre de 1936 aconteció un sismo que desencadenó deslizamientos en las faldas del volcán de San Vicente, afectando las vías férreas y carreteras dentro de la región epicentral. Estos deslizamientos ocurrieron en zonas con pendientes pronunciadas formadas por cenizas volcánicas. [Arévalo Saade, et. al, 2001].

- El 6 de mayo de 1951 se registró un sismo que provocó fenómenos de inestabilidad en taludes cercanos a Santiago de María. [Arévalo Saade, et. al, 2001].

- El 3 de mayo de 1965 la acción de un fuerte movimiento del terreno generó un gran número de deslizamientos en San Salvador y en las regiones cercanas al lago de Ilopango. Estos ocurrieron en pendientes pronunciadas compuestas por pómez. [Arévalo Saade, et. al, 2001].

- En 1982, como producto de un intenso temporal, ocurrió, uno de los mayores deslizamientos de tierra en la historia de El Salvador, conocido como "Montebello". El desprendimiento se localizó en la zona conocida como El Picacho en el volcán de San Salvador, donde un deslizamiento de suelo con un volumen aproximado de 500,000 m^3 se desplazó a gran velocidad hacia la zona urbana de San Salvador. Esta masa de suelo se encausó por una quebrada hasta sepultar la colonia Montebello junto con otras colonias y estaba constituida por fragmentos de roca, suelos granulares y limos con un alto contenido de agua. [Hrafn & Ledru, 1996].

- El sismo del 10 de octubre de 1986 ocurrido en San Salvador generó centenares de deslizamientos, entre los cuales sobresale el de la colina Santa Marta que provocó la muerte de 200 personas. Este terremoto también se destaca por la gran cantidad de deslizamientos inducidos por sismo ya que se registraron cientos de ellos en taludes a lo largo de quebradas y carreteras cubriendo un área aproximada de 200 km^2. [Bommer, 1998].

- En 1995, desde la cumbre del Volcán de San Vicente, por causas similares a las de 1982, una masa fluida de suelo y rocas se desprendió de la ladera sur de dicho volcán, arrastrando árboles y movilizándose por más de 8 kilómetros, interceptando y dañando en dos puentes en su camino. Ver figura 1.2. [Hrafn & Ledru, 1996].

Figura 1.2. Lugar donde se originaron los deslizamientos en el volcán de San Vicente en 1995. [Cortesía del SNET]

- El terremoto del 13 de enero del 2001 provocó que en una ladera sobre la Colonia "Las Colinas", municipio de Santa Tecla, Nueva San Salvador, ocurriera un deslizamiento de suelo (Ver figuras 1.3). El deslizamiento se originó a una elevación de 1,070 msnm y viajó entre 700-800 m en dirección hacia la colonia. La ladera está formada por un estrato de tobas sobre el que se apoya un estrato de cenizas volcánicas constituidas por limos arenosos y lapilli. Estos materiales presentan una densidad aparente entre 1.1 y 1.2 t/m^3 y ángulo de fricción de 34°. Las aceleraciones máximas estimadas en la zona fueron del orden de 0.5 g, lo que provocó el deslizamiento, dando lugar a un flujo muy rápido que sepultó parte de la urbanización. La cabecera del deslizamiento presentó una superficie de rotura circular, con profundidad entre 25 y 30 m, mientras que en el resto el mecanismo fue traslacional. El volumen de la masa deslizada fue de unos 150,000 m^3. [González, 2002].

Figura 1.3. Deslizamiento en Las Colinas. [E.L. Harp, USGS, 2001]

- El mismo sismo del 13 de enero del 2001, causó que un deslizamiento masivo ocurriera en el corte de un talud en la carretera panamericana en el lugar conocido como "La Leona", cerca de San Vicente, que se utilizaba como un banco de préstamo de material. El deslizamiento fue de aproximadamente 250 m de ancho en su base, 120 m de altura y 25 m de espesor, y su volumen ha sido estimado en 750,000 m^3 (Ver figura 1.4). El deslizamiento tuvo lugar en las cercanías de una falla normal, por lo que los suelos y rocas de la zona fueron afectados por dicha falla, originando una zona de material débil que facilitó la falla del talud durante el movimiento del terreno. [González, 2002]

- El terremoto del 13 de febrero del 2003 en El Salvador causó también deslizamientos en varios lugares de la zona paracentral del país. En la figura 1.5 se observa un mapa donde se muestran en triángulos rojos numerados, los lugares donde se produjeron muchos deslizamientos, estos lugares son los siguientes:

  1. Río el Desagüe
  2. Río Jiboa
  3. Quebrada del Muerto
  4. Quebrada El Blanco
  5. San Agustín - Quebrada El Chagüite

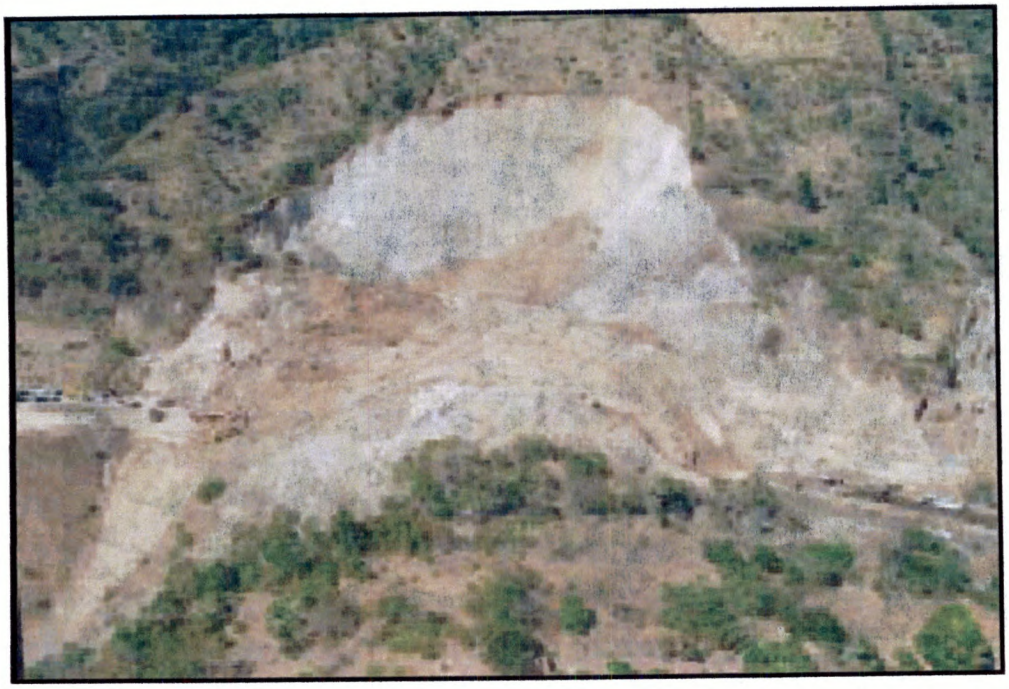

Figura 1.4. Deslizamiento en la Carretera Panamericana cerca de San Vicente, en el lugar conocido como La Leona. [E.L. Harp, USGS, 2001]

Figura 1.5. Mapa de ubicación de los deslizamientos más importantes provocados por el sismo del 13 de Febrero de 2001. [E.L. Harp, USGS, 2001]

La figura 1.6 muestra una foto aérea de un deslizamiento ocurrido en el lado este del lago de Ilopango causado por este mismo terremoto.

Figura 1.6. Deslizamiento ocurrido al este del lago de Ilopango provocado por el sismo del 13 de Febrero. [E.L. Harp, USGS, 2001]

1.2.1. Antecedentes de estudios geotécnicos realizados en El Salvador.

A continuación se presentan algunos estudios geotécnicos realizados en el AMSS y sus alrededores, en los cuales se toman en cuenta los efectos de la saturación de los suelos por precipitación y la influencia de los sismos como una causa de inestabilidad de los suelos.

1. La comisión de Geotecnia y Suelos de CASALCO presentó luego del terremoto del 10 de Octubre de 1986 sus "Consideraciones Sísmicas-Geológicas y Geotécnicas sobre el comportamiento del subsuelo del área Metropolitana por acción del sismo del 10 de Octubre", en donde luego de comentar el comportamiento dinámico de los suelos del AMSS, se justifica la necesidad de un código sísmico acorde a la necesidad del territorio.

2. Según Bommer [1998], los autores Rymer y White han hecho una evaluación preliminar del riesgo de deslizamientos inducidos por sismo en El Salvador, considerando los siguientes factores: topografía, litología, precipitación e intensidad sísmica. También se presentan las áreas donde se han producido deslizamientos durante los sismos históricos del país. Los autores identifican que las zonas de más alto peligro son la cadena volcánica, la parte noreste de la cordillera costera y la parte sur oeste del valle interior. Todas estas zonas están cubiertas por cenizas volcánicas y principalmente tierra blanca. Según ellos no es claro el mecanismo mediante el cual los sismos inducen la inestabilidad en un suelo parcialmente

saturado, ya que, la sacudida no podría causar un aumento en la presión de poros, mientras que en un suelo saturado, la inestabilidad puede ocurrir debido a la licuefacción. Finalmente concluyen que probablemente, el gran número de deslizamientos y derrumbes desencadenados en cada sismo en El Salvador se debe simplemente a la geometría de los taludes.

3. Otro estudio de importancia acerca del origen y las características generales de los depósitos geológicos en San Salvador fue presentado por Schmith Tome [1975]. Según este estudio, los depósitos más recientes son las tobas color café y la tierra blanca. La mayoría de los derrumbes y deslizamientos que se desatan durante los terremotos y periodos de lluvia prolongados ocurren en estos depósitos jóvenes, especialmente de tierra blanca. Este estudio da recomendaciones sobre el planeamiento y desarrollo de la ciudad y presenta los siguientes mapas del AMSS:
   - Flujo de lava del pleistoceno.
   - Espesores de tierra blanca.
   - Distribución de rocas duras bajo la superficie.
   - Rellenos y nivelaciones de terreno importantes.

4. Un trabajo sobre las propiedades ingenieriles de la tierra blanca fue presentado por Guzmán Urbina y Melara [1996]. Según los autores, el espesor de este material aumenta de occidente a oriente en San Salvador, teniendo un espesor de más de 25 metros en el oriente de la ciudad. La tierra blanca es muy propensa a la erosión causada por la escorrentía superficial, originando barrancas profundas con taludes casi verticales. La tierra blanca de San Salvador, es un suelo altamente heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica ya que depende de la distancia entre el lugar de depósito y la estructura geológica de origen (en este caso el volcán de Ilopango) y está compuesto por limos arenosos o arenas limosas, de muy baja plasticidad. Además, los autores enfatizan lo mucho que hace falta por estudiar para poder modelar fiablemente el riesgo de deslizamientos en El Salvador y para diseñar medidas efectivas de mitigación, para lo cual es esencial tomar en cuenta la naturaleza no saturada de los suelos. Según estos autores, sería de utilidad medir la succión in situ utilizando tensiometros desarrollados para ese propósito y monitorear la variación en la succión en función del tiempo y la profundidad. Además, concluyen que es importante que la mecánica de suelos parcialmente saturados se introduzca a la geotecnia en El Salvador y en Centroamérica. Los autores hacen una observación muy importante con referencia a los taludes casi verticales, aparentemente estables que se pueden observar en varios lugares en San Salvador, afirman que estos taludes se sostienen debido a la cementación que posee la tierra blanca "producida por un amarre que existe entre las partículas, y la tensión capilar".

5. Según Bommer et al [1998], en su artículo "Propiedades Mecánicas de la Tierra Blanca y la Inestabilidad de Taludes", la evaluación de estabilidad de taludes en Centroamérica y la estimación del riesgo de deslizamientos no debe separar los factores disparadores (sismos y precipitación). Según los autores, una mitigación efectiva del riesgo ha de considerar ambos efectos en conjunto porque inevitablemente hay una interacción entre ellos. Citan como ejemplo que durante el sismo de 1986 el área de deslizamientos fue hasta cuatro veces mayor que el área de deslizamientos asociados con el sismo de 1965, a pesar de que este último fue de mayor magnitud y afectó la misma zona, es posible que en el sismo de 1986 los taludes fueron más vulnerables debido a que el terremoto ocurrió en octubre, al final de la época de lluvias, mientras el sismo de 1965 tuvo lugar en mayo, al principio de la época de invierno. La explicación de esto según los autores es que, la infiltración de las lluvias causa un aumento en la presión de poros de un suelo saturado y por lo tanto ocasiona una reducción en el esfuerzo efectivo. En un talud este efecto produce la disminución de la fuerza de resistencia al corte y puede desencadenar la inestabilidad. En el caso de un suelo parcialmente saturado, como los del AMSS, la infiltración de la precipitación resulta en la pérdida de la succión, que es la fuerza que da un factor de seguridad mayor a la unidad en los taludes.

6. En abril de 1998 una muestra inalterada de tierra blanca fue extraída de una trinchera a 1 m de profundidad dentro de las instalaciones de la UCA y fue llevada al Imperial College de la Universidad de Londres, donde se realizaron varias pruebas de laboratorio. La curva granulométrica confirmó que el suelo es principalmente arena, con un contenido de finos del 12%. Los límites de Atterberg revelaron que el material es no plástico, lo que permite concluir que el contenido de finos esta compuesto básicamente por limos. El peso volumétrico seco medido fue de 1.37 t/m3 con una relación de vacíos de 0.97; ambos valores concuerdan con los resultados presentados por Guzmán Urbina y Melara [1996] para suelos inalterados en el AMSS. El contenido de humedad y grado de saturación fueron también medidos, arrojando valores de 7-8% y 22% respectivamente. Estos valores son menores que el rango presentado por Guzmán Urbina y Melara [1996] quienes encontraron contenidos de humedad entre el 17% y 28% y grados de saturación entre el 43% y 83%. La diferencia se podría explicar por el hecho de haber extraído la muestra a poca profundidad al final de la época seca. Además es casi seguro, que cierta humedad se perdiera durante el transporte de la muestra. Sin embargo, ambos estudios confirman las características básicas de la tierra blanca y que el mismo es un suelo parcialmente saturado. [Bommer, 1998]

1.2.2. Antecedentes de estudios de amenaza por deslizamiento y otros realizados en El Salvador.

Entre los estudios de amenaza realizados en el país pueden mencionarse trabajos de graduación, trabajos realizados con colaboración internacional y documentos que se pueden encontrar en instituciones tales como el SNET. A continuación se describe brevemente algunos de estos trabajos:

1. El primer trabajo de zonificación sísmica para el AMSS fue elaborado por Schmidt-Thomé (1975). En él se identifican las formaciones geológicas y las fallas, el espesor de tierra blanca, la distribución de las corrientes de lava y roca en dicha región. También presenta las zonas de relleno posterior al año de 1955. Adicionalmente este trabajo estudia el aspecto hidrogeológico como una base para el planeamiento urbano.

2. En 1995, Ledru y Kiernan realizaron en San Salvador un trabajo que propone medidas remediales o de mitigación contra la amenaza a los deslizamientos en el volcán de San Salvador. Los autores recomiendan las siguientes medidas: tratamientos vegetativos en la parte alta del Picacho (Volcán de San Salvador), la construcción de una presa de retención en la parte baja y el establecimiento de un mapa de riesgo sobre la zona este del Picacho.

3. Calderón et al [1997] en su trabajo de graduación denominado "Evaluación de Riesgo en términos de Estabilidad de Taludes para el Área Metropolitana de San Salvador" muestran un mapa de zonificación de amenaza en términos de estabilidad de taludes para el AMSS aplicando el método de Mora y Vahrson, en este trabajo se hace un análisis de la estabilidad en varios taludes ubicados en San Salvador y se realizan pruebas triaxiales para muestras inalteradas obtenidas de cinco taludes en el área.

4. Alvarado Hernández et al [1999] realizaron un trabajo de graduación denominado "Evaluación del Peligro Sísmico Secundario para Planeamiento Urbano en El Salvador", en donde los autores muestran un mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de tierra a una escala 1:750,000 de El Salvador, utilizando el método Mora Vahrson; elaborado en el Centro de Investigaciones Geotécnicas con la colaboración de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador.

5. Brizuela y Menjívar [2002] realizaron un trabajo de graduación denominado "Sistemas de información geográfica en el manejo de peligros naturales", en donde se aborda la aplicación de los SIG como herramienta para evaluar el grado de amenaza ante los peligros naturales, en particular los deslizamientos de tierra. Al final de este documento se presenta un modelo

cartográfico diseñado para evaluar la amenaza por deslizamientos del AMSS utilizando el método Mora Vahrson.

6. Blanco et al [2002] realizaron un mapa de amenaza por lahar para el volcán de San Salvador y para el volcán de Usulután basados en un modelo de elevación digital elaborado por el Servicio Geológico de Estados Unidos. Este trabajo estudia la amenaza por lahar en El Salvador generando dos mapas de amenaza, y hace una revisión de casos con un catálogo regional de lahares históricos además de calibrar herramientas para la evaluación de amenaza por lahar.

7. El Servicio Nacional de Estudios Territoriales muestra un mapa en su sitio de internet (www.snet.gob.sv) denominado "Estimación cartográfica preliminar de las zonas de susceptibilidad a deslizamientos de suelo en El Salvador". El mapa fue creado con el objeto de brindar una referencia territorial ante las necesidades de conocer la ubicación del peligro de deslizamientos de tierra que demanda la formulación de todo proyecto de inversión y constituye una síntesis de fuentes cartográficas a escala 1:50,000 y de un inventario de deslizamientos activados por el Huracán Mitch y los terremotos del 2001. Este mapa se refiere al peligro que ocasiona la combinación de ciertos factores tales como:
   - Inclinación del terreno.
   - Grados de humedad del suelo.
   - Formación geológica superficial predominante.
   - Sismicidad recurrente en la región.
   - Intensidad de lluvias

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos generales.

- Elaborar un mapa de caracterización geotécnica de los suelos del AMSS que contenga un valor representativo de cohesión, ángulo de fricción interna y peso específico para cada unidad geológica de las formaciones de San Salvador, del Bálsamo y de Cuscatlán.

- Elaborar un mapa de amenaza por deslizamientos para el AMSS utilizando el mapa resultante de la caracterización geotécnica con herramientas de SIG.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Recopilar información en trabajos de graduación, publicaciones y ensayos de laboratorios de suelos, acerca de las propiedades mecánicas de las unidades geológicas del AMSS, tales como cohesión (c), ángulo de fricción interna (ϕ), número de golpes (N) de pruebas de SPT, peso específico (γ) y el tipo de suelo, para elaborar un mapa litológico necesario para aplicar el método Mora Vahrson Mora.

- Realizar una evaluación de la susceptibilidad por deslizamientos para el AMSS utilizando el método Mora Vahrson Mora.

- Analizar estadísticamente los datos recopilados para asignar el valor más representativo de ϕ, cohesión y peso específico a cada unidad.

- Con el mapa de susceptibilidad generado en el capítulo 5, hacer un análisis comparativo entre los deslizamientos ocurridos históricamente hasta el año 2001 y el grado de susceptibilidad de las regiones del mapa.

- Comparar el mapa de amenaza por deslizamiento elaborado en el capítulo 5 con el mapa de susceptibilidad al deslizamiento elaborado por el SNET y con el trabajo de graduación "Sistemas de información geográfica en el manejo de peligros naturales", [Brizuela, B y Menjívar, L. 2002].

1.4. LIMITACIONES Y ALCANCES

1.4.1. Limitaciones.

- La caracterización geotécnica de las formaciones geológicas del AMSS se realizó utilizando el valor de la cohesión, ángulo de fricción interna y peso específico que se lograron documentar y valores de N que se pudieron correlacionar.

1.4.2. Alcances.

- La recopilación de información (parámetros geotécnicos) que se realizó para la caracterización geotécnica incluyó documentos provenientes de una investigación bibliográfica en trabajos de graduación, publicaciones, estudios y ensayos de pruebas de laboratorios de suelos.

- No se realizaron ensayos de pruebas de laboratorio exclusivamente para éste trabajo, ya que, al compararlos con la cantidad de registros necesarios para lograr caracterizar efectivamente una extensión como el área de estudio, resultaban insignificantes.

- Para la generación del mapa de amenaza por deslizamiento del AMSS se utilizó el método Mora-Vahrson Mora, el cual requiere de los mapas de lluvia, intensidad sísmica, de pendiente y humedad, los cuales fueron tomados del trabajo de graduación "Sistemas de información geográfica en el manejo de peligros naturales", [Brizuela, B y Menjívar, L. 2002].

- El mapa producto de la caracterización geotécnica que se obtuvo tiene escala 1:15,000 y cubre el área delimitada por las siguientes coordenadas geográficas: Longitud 472,698, Latitud 281,975 y Longitud 487,610, Latitud 291,691. Esta fue el área de estudio de los capítulos 3 y 4. El área que comprende este mapa es igual a la del mapa geológico de San Salvador presentado en el apartado 4.2.

- El mapa de susceptibilidad por deslizamiento de tierra que se obtuvo tiene escala 1:15,000 y cubrirá el área delimitada por las siguientes coordenadas geográficas: Longitud 472,967, Latitud 282,909 y Longitud 486,478, Latitud 291,691. Esta fue el área de estudio en el capítulo 5. El área que cubre comprende la intersección de los cinco mapas descritos en la tabla 5.1 del capítulo 5.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Geología.

2.1.1 Geología Regional Centroamericana.

La región de América Central y el caribe se encuentra en una de las zonas más activas sísmicamente de la Tierra. Esta actividad sísmica y tectónica es ocasionada por la interacción de tres cuerpos rígidos o placas conocidas como: "Placa del Caribe", "Placa Americana" y "Placa de Cocos".

El Salvador se encuentra localizado sobre la Placa del Caribe, la cual, está limitada al Oeste por la Fosa Mesoamericana; al Norte por la Fosa del Cayman; al Este por el arco de las Indias Occidentales y al Sur por una región sísmica de América del Sur. De estos elementos tectónicos el más importante para el área de América Central es la Fosa Mesoamericana, la cual corre paralela a las costas del Pacífico. Ver la figura 2.1:

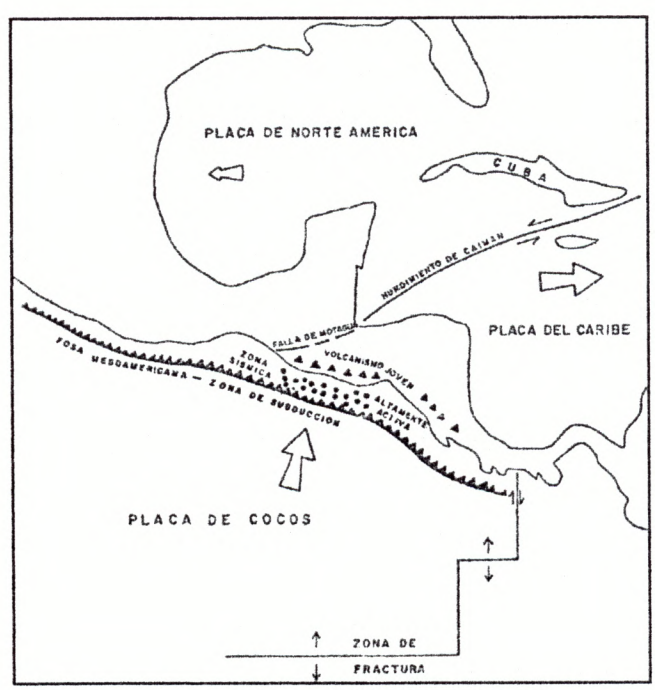

Figura 2.1.Panorama Tectónico Regional [Aguilar Colato et al, 1984]

2.1.2 Rocas que componen el territorio Salvadoreño.

Debido a que nuestro país esta ubicado en una región con un alto índice de actividad volcánica, es natural que en la mayor parte del territorio nacional predominen las rocas originadas por dicha actividad, a excepción del extremo noroeste de El Salvador, donde pueden encontrarse rocas de origen Sedimentario y Metamórfico.

Según Alvarado [1999] el territorio salvadoreño esta formado por las siguientes clases de rocas:

- Rocas Ígneas.

Las rocas ígneas o magmáticas son las que se forman a partir del enfriamiento y posterior consolidación del magma proveniente del interior de la tierra. Las rocas ígneas o magmáticas se clasifican en Extrusivas o Volcánicas e Intrusivas o Plutónicas.

a) Rocas Extrusivas. Estas cubren más de un 90% del país; por su composición química y mineralógica comprenden principalmente rocas efusivas (lavas) andesíticas y basálticas, materiales piroclásticos, y en una escala mucho menor rocas efusivas riolíticas y dacíticas. Las andesitas son rocas extremadamente abundantes en el país; muchas de las lavas expulsadas por nuestros volcanes pertenecen a esta categoría. Al igual que la andesita, el basalto es una roca ígnea sumamente común, su composición básica le proporciona una coloración que varía de negra a gris oscura, y fue arrojada por los volcanes: Izalco, San Miguel, Santa Ana, San Vicente, etc. Además, se incluyen los conos volcánicos situados entre Nueva Concepción, Santa Ana y Masahuat, compuestos de lavas basálticas y andesíticas del Cuaternario, asociadas en menor proporción con aglomerados volcánicos.

   Las rocas de composición riolítica, se encuentran en distintas regiones de la zona norte del país, en tanto que la dacita, es la roca que forma las cúpulas de lava situadas dentro del Lago de Ilopango y sus alrededores inmediatos.

   Dos áreas extensas del país cubiertas por materiales piroclásticos (del Cuaternario), están localizadas, la primera al norte y noroeste de San Salvador; y la segunda, desde San Miguel, hasta el Río Lempa, cerca del puente Cuscatlán. Los piroclástos de la primera área, están compuestos de una serie de tobas pumíticas. La segunda área esta compuesta en su mayoría de interestratificaciones de tobas escoriáceas y pumíticas, expulsadas probablemente por el volcán de San Miguel y por el complejo volcánico de Tecapa. También se encuentra el volcán Cacahuatique al oeste de San Francisco Gotera, en la actualidad completamente erosionado, formado por materiales piroclásticos intercalados con lavas

andesíticas más jóvenes. Desde Metapán hasta Concepción de Oriente se encuentra una serie de piroclásticos ácidos (del Terciario), formados de tobas líticas y pumíticas, ignimbritas e intercalaciones de lavas riolíticas a dacíticas.

b) Rocas Intrusivas o Plutónicas. Pertenecientes todas al período Terciario, clasificadas por su composición mineralógica como granitos, granodioritas, monzonitas (ácidas) y dioritas (intermedias). Los afloramientos de rocas intrusivas o plutónicas se localizan en ciertas partes de la zona norte del país principalmente al oeste de Citalá y en Metapán.

- Rocas Sedimentarias.

Las más importantes son las de origen marino, localizadas al norte del departamento de Santa Ana, y en parte de Chalatenango, ocupan un área equivalente a un 5% del territorio nacional. Estas comprenden en su mayoría calizas, conglomerados de cuarzo y areniscas (de color rojo, amarillo, verde, violeta, etc.). Fuera de estas series marinas se reconocen en El Salvador solamente rocas sedimentarias lacustres y fluviales, tratándose sobre todo de productos piroclásticos redepositados. De mucha menor importancia están las rocas de origen orgánico, localizadas en diferentes partes de la República, formando generalmente pequeños depósitos de Diatomita y Lignitos. Existen variedades de diatomitas de agua dulce y salada, uno de los más grandes depósitos es el situado en la barranca del Sisimico, jurisdicción de Apastepeque en el departamento de San Vicente. Aluviones se encuentran a lo largo de los ríos más importantes, dentro de depresiones locales sobre todo en planicies costeras de la parte SO y SE de la República, donde cubren un área total de 3500 km^2.

- Rocas Metamórficas.

Las rocas Metamórficas son muy raras en nuestro país y solo se presentan en aquellos lugares de contacto térmico entre cuerpos intrusivos y rocas sedimentarias en las que se ha producido metamorfismo. El contacto térmico entre éstas ha dado lugar a la formación de yacimientos minerales de Cobre, Plomo, Zinc y Hierro. Se tiene conocimiento también de la existencia de mármol, originado en Metapán de la metamorfización de la caliza, Hornfels derivados de roca de grano fino, Cuarcitas derivadas de arenisca y Conglomerados de Cuarzo y calcita recristalizado. Todas estas rocas se encuentran en áreas muy limitadas. [Misión Geológica Alemana en El Salvador (1967-1971)].

Todas las rocas mencionadas anteriormente hacen de El Salvador un país de edad geológica relativamente joven. Una cuarta parte del territorio nacional es de la era cuaternaria (1.5 millones

de años), y tres cuartas partes están cubiertas por rocas de edad terciaria (65 millones de años). Las más antiguas son las Rocas Sedimentarias marinas, que cubren aproximadamente el 5% del territorio salvadoreño y se formaron a finales de la era Secundaria (periodo Cretácico del Mesozoico, hace 136 millones de años).

2.1.3 Geología y aspectos geotécnicos del AMSS.

A continuación se explicará la geología local en la que se encuentra ubicado el AMSS y se dará una breve explicación acerca de su ubicación geográfica.

La altura del área capitalina oscila entre 650 y 760 msnm, sus límites geográficos son los siguientes:

- Al Norte, con los cerros de Mariona (798 msnm).
- Al Sur, con la Cordillera del Bálsamo (100 msnm) y el Cerro San Jacinto (1154 msnm).
- Al Oeste, con el Volcán de San Salvador (1967 msnm).
- Al Este, con un escarpado cuya altura alcanza los 438 msnm, que se inclina hacia el Lago de Ilopango.

El área capitalina se encuentra sobre las formaciones del Bálsamo, Cuscatlán y de San Salvador, esta última se encuentra casi en su totalidad sobre el AMSS y su límite inferior está constituido por una serie de corrientes de lava, las cuales son consideradas como el estrato rocoso de la región. Este estrato rocoso esta formado por rocas efusivas andesíticas y basálticas con espesor mayor de 10.0 m, muy duras y relativamente resistentes a la intemperie; sobre este estrato se encuentran rocas piroclásticas (tobas color café) ácidas café y amarillentas más o menos consolidadas de grano mediano a pequeño, que presentan un espesor cerca del Volcán de San Salvador, de unos 2 m; intercalados dentro de este estrato se encuentran capas de escoria negra. Además, en los alrededores del volcán se encuentran suelos con características arcillosas, los cuales se han formado debido al arrastre de los materiales intemperizados de las zonas altas del Volcán de San Salvador, donde la meteorización es mayor debido a las condiciones climáticas.

Los espesores de las tobas color café varían considerablemente cerca del Volcán de San Salvador y disminuyen rápidamente a medida que se alejan del mismo. Las más consolidadas se encuentran únicamente en afloramientos de gran espesor y su compacidad difiere mucho, dependiendo principalmente del grado de consolidación natural; tienen como características de alta erosionabilidad al exponerlas a intensas lluvias y originan surcos erosivos en áreas de poca vegetación. Las tobas color café se produjeron casi simultáneamente al desarrollo del cráter de La

Laguna (ubicada en el municipio de Antiguo Cuscatlán) que produjo escoria negra depositándose en su mayoría al Oeste, por esta razón se puede encontrar material escoreáceo sobre ellas.
El AMSS esta constituido básicamente por cenizas volcánicas que es el estrato más reciente de la formación de San Salvador, está compuesto por productos piroclásticos ácidos (tierra blanca) producidas por la depresión volcano tectónica de Ilopango. Los espesores de estos estratos varían entre 0.0 – 0.3 m en las faldas del Volcán de San Salvador hasta mas de 25 m en los alrededores del Lago de Ilopango. Los espesores de tierra blanca se muestran en la Figura 2.2.

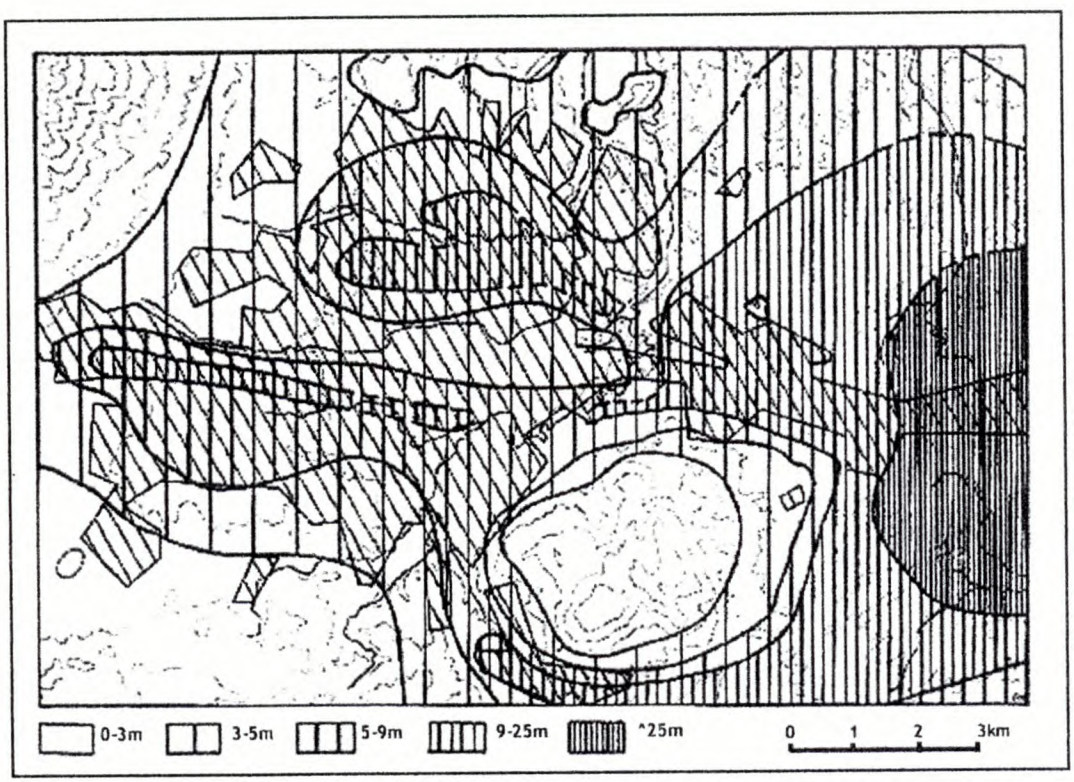

Figura 2.2. Espesores de tierra blanca en el área de San Salvador, [Schmidt - Thomé, 1975]

La tierra blanca o ceniza volcánica, es un producto piroclástico con características friccionantes, en el que predomina la pómez que es un silicato de aluminio y hierro generalmente ácido de reducida densidad como espuma solidificada, en ocasiones tiene efectos puzolánicos. Presenta diferentes colores como blanco, gris acero, gris verdoso, rosado, gris intenso según la composición química.

Sus granos tienen forma equidimensional y su textura es rugosa, la distribución granulométrica varia, pero básicamente se puede clasificar como limo arenoso (ML) o arena limosa (SM) de muy baja plasticidad, los porcentajes de arena de pómez varia del 10 % al 80 % y en ocasiones se presenta como arena limpia (SP). Debido a la presencia de compuestos de hierro puede intemperizarse y en ocasiones se encuentran cascajos volcánicos en forma de arena arcillosa (SC)

de mediana plasticidad formando estratos de pequeños espesores subyaciendo a las cenizas volcánicas.

Las cenizas volcánicas debido a su origen geológico poseen un grado de cementación muy variable, situación que define su comportamiento granular y puede comprobarse al observar taludes verticales naturales de considerable altura completamente estables en varios puntos de la ciudad.

Características de las Unidades Geológicas de San Salvador

En este apartado se describen las unidades litoestratigráficas que componen las 3 formaciones que cubren el área de estudio, su simbología, características y principales productos secundarios (rocas formadas como consecuencia de la alteración de los minerales preexistentes derivado de la erosión o desintegración de otras rocas).

Las descripciones que se presentan a continuación han sido tomadas de la leyenda del mapa Geológico de El Salvador, donde se presentan los diferentes tipos de rocas (unidades o miembros) que conforman cada una de las formaciones geológicas, agrupamiento por edades y afloramientos de acuerdo al nombre de dicha formación.

- Formación Bálsamo

Unidad b1

Es una sección constituida por epiclastitas volcánicas, piroclastitas e ignimbritas; localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas, "Facies Claro" (con lapilli de pómez) y limo rojo; alteración hidrotermal, escorias, cinder y facies de cuencas. Es en parte contemporáneo con el miembro b2 y los afloramientos están principalmente al suroeste del Río Lempa. En la parte central de esta unidad, se encuentran tobas aglomeráticas y andesitas. Las primeras son poco estratificadas y constituidas por grandes bloques de 20 a 50 cm o mayores, generalmente redondeados de tipo andesítico, entremezclado con material piroclástico gris claro de grano medio. La parte superior se encuentra intercalada por corrientes de lava y algunas tobas ácidas; y el espesor de la sección es de 300 a 500 m. Se asume también que parte de la sección central fue constituida por corrientes de lodos, lahares y productos volcánicos, fueron resultado de una serie de erupciones cuya intensidad fue disminuyendo mientras que aumentó la producción de lavas.

Unidad b2

Es una secuencia de rocas volcánicas de tipo efusivas básicas intermedias, piroclastitas, epiclastitas volcánicas subordinadas, en parte contemporánea con los miembros b1 y b3, localmente con alteración hidrotermal, limos rojos, escorias y cinder.

Unidad b3

Forma el miembro superior de la Formación Bálsamo, en parte contemporáneo con el miembro b2, y constituido por efusivas básicas-intermedias. Localmente con alteración hidrotermal, silificación y limos rojos.

- Formación Cuscatlán

Unidad c1

Es el miembro inferior de la formación Cuscatlán y está constituido por rocas, tanto sedimentarias como volcánicas. Las primeras son fluvio-lacustres y se ubican en cuencas intermontanas alineadas con rumbo noroeste. Estas son: la cuenca de Metapán, cuenca de Lempa, Cuenca del Río Titihuapa y la Cuenca de Olomega. Otros sedimentos han sido encontrados en el nororiente del país a lo largo del Valle del Río Torola. Las unidades volcánicas sobreyacen, tanto en el centro como en el oriente del país, a rocas de la formación Bálsamo, localmente a la formación Morazán y Chalatenango presentando también limo rojo, epiclastitas volcánicas, ignimbritas y silificación.

Unidad c2

Sección de rocas volcánicas efusivas de tipo ácido-intermedio, de ocurrencia aislada, en parte contemporánea con el miembro c1 y en menor grado con el miembro c3. En el área del Valle Central Interior al oriente del país y en el Campo Volcánico de Apastepeque se encuentran rocas volcánicas ácidas jóvenes.

Unidad c3

Esta constituida por rocas volcánicas de tipo andesítica y basáltica, en parte contemporánea con el miembro c2. Se observa localmente limos rojos y alteración hidrotermal.

Las coladas de lava constituyen la parte principal de esta unidad, sin embargo, conos de cinder y escorias han sido reportadas. Diques son escasamente mencionados, se encuentran algunos en el sector oriental del país; en los estratos de Guazapa se encuentran suelos fósiles rojos con profundidad hasta de 4 m.

- Formación San Salvador

Unidad s1

La unidad esta formada con una secuencia de piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas; localmente efusivas básicas-intermedias; en parte contemporánea con el miembro s2 y ubicado en la faja central al occidente del país.

Unidad s2

Secuencia de rocas volcánicas – intermedias, piroclastitas subordinadas; contemporáneas en parte con los miembros más jóvenes s3'a, s3'b, s4, y afloran en la parte central a lo largo del país. En el sector occidental, el Cerro de Apaneca está constituido por basaltos; el Cerrito de Apaneca, por lapilli y arena; el Volcán de La Lagunita al Norte de Apaneca y el Volcán de La Laguna Verde al NE del anterior por andesitas. El Volcán Chingo es contemporáneo, con el Volcán de Santa Ana, y está en parte constituido por productos piroclásticos intercalados con depósitos lacustres.

Unidad s3'a:

Secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas (tobas color café), en parte contemporáneas con los miembros s2 y s3'b.

Al Norte y NE del Lago de Ilopango la base está compuesta por bancos que exceden los 15 m de espesor constituidos por fragmentos de pómez y líticos, sobreyace una secuencia de cenizas dacíticas de un espesor superior a los 30 m.

Unidad s3'b:

Esta constituido por efusivas ácidas, en parte contemporáneo con los miembros s2, s3'a, s4 y s5'a. Los afloramientos están ubicados en dos sectores, en el Lago de Coatepeque y el Lago de Ilopango.

Unidad s4:

Se define como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, localmente efusivas ácidas (s3'b). Es en parte contemporáneo con los miembros s2, s3'b, s5'a, s5'c, nombrado informalmente Tierra Blanca y no incluye tobas ácidas subyacentes (c1).

El espesor es superior a los 50 m en las cercanías del Lago de Ilopango y se reduce a 4 m en la ciudad de San Salvador, los fragmentos de pómez alcanzan tamaños de 25 a 30 cm.

Unidad s5'a:

Le definen como una secuencia de efusivas básicas-intermedias, contemporáneas en parte con los miembros s3'b, s4, s5'b, s5'c; aflora principalmente en el sector occidental y oriental a lo largo de la faja central del país, en donde la colada de lava al NE del Volcán de San Salvador es de tipo basáltica.

Unidad s5'b:

El miembro se describe como una acumulación de escorias, tobas lapilli y cinder. Es en parte contemporáneo a los miembros s5'a y s5'c.

En los alrededores del volcán de San Salvador se encuentra un grupo de escorias. La composición de las rocas del Picacho, es andesítica, porfídica con fenocristales de plagioclasa. El cono de escorias en el Boquerón son andesitas con fenocristales de labradorita, olivino, y augita. En las cercanías de Quezaltepeque se encuentra un cono de escorias y lapilli basáltico.

Unidad s5'c:
Es una secuencia volcánica constituida principalmente por cenizas y tobas de lapilli, en parte contemporánea con los miembros s3'b, s4, s5'a, s5'b.

Aflora en el sector occidental del país, consisten en gran medida de cristales menores de 0.5 mm de diámetro y el contenido de vidrio basáltico bajo.

Unidad Q'f:
Son depósitos sedimentarios del cuaternario constituidos principalmente por secciones con intercalaciones de rocas piroclásticas, depósitos de estuario con o sin manglares, barras costeras y depósitos coluviales. Están ubicados a lo largo de la línea de costa en sectores emergidos como la zona de la Bahía de Jiquilisco y el Golfo de Fonseca; a lo largo del Río Lempa y en depresiones como el sector de la Laguna de Olomega y la Laguna ciega de Zapotitán.

2.1.4 Estratigrafía del AMSS

En lo que a geología local se refiere, todas las rocas expuestas en el área de estudio son de origen volcánico y consisten en depósitos entre el Terciario Superior (Mioceno) y el Holoceno Superior.

En la Tabla 2.1, se presenta la secuencia estratigráfica geológica del AMSS que va desde los estratos más superficiales hasta los más profundos.

Es necesario mencionar que el orden de superposición descrito en la Tabla 2.1. no siempre corresponde con la secuencia de los estratos, y los espesores que se presentan son los máximos que puedan esperarse.

Como se ha mencionado anteriormente la formación de San Salvador cubre casi en su totalidad el área metropolitana y, en general, los materiales que la componen son productos piroclásticos de color café a amarillo, de grano medio a fino y que alcanzan un espesor mayor de 25 m del lado este de la ciudad. Este espesor aumenta a medida que se acerca al lago de Ilopango.

ORDEN DECRECIENTE DE SECUENCIA		ESPESOR
FORMACIÓN SAN SALVADOR		
4	Aluvión (Incluyendo material artificialmente retrabajado)	20 m
3	Depósitos piroclásticos ácidos y depósitos volcánicos epiclásticos (Tierra Blanca)	50 m
2	Depósitos piroclásticos ácidos y depósitos volcánicos epiclásticos (tobas color café).	25 m
1	Rocas efusivas andesíticas y basálticas, localmente escoria, parcialmente intercalada en (2)	10 m
FORMACIÓN CUSCATLÁN		
2	Rocas efusivas ácidas intermedias parcialmente de la misma edad o mas antiguas que (1)	25 m
1	Rocas piroclásticas ácidas y volcánicas epiclásticas, localmente ignimbritas y depósitos de tobas soldadas (arriba de 25 m de espesor)	80 m
FORMACIÓN BÁLSAMO		
2	Rocas efusivas andesitico-basálticas, parcialmente de la misma edad que (1)	30 m
1	Rocas volcánicas epiclásticas y rocas piroclásticas básicas con intercalaciones de corrientes de lavas andesíticas (arriba de 10 m. de espesor).	100 m

Tabla 2.1. Secuencia estratigráfica bajo San Salvador y alrededores

Algunas de las características de la formación de San Salvador son las siguientes [Aguilar Colato et al, 1984].

- Cerca del cráter del Boquerón se produce una intercalación de los estratos de escoria negra y rojiza (espesores de 2 m) con los estratos de productos piroclásticos y epiclásticos.

- Los espesores de la toba color café varían considerablemente cerca del volcán (faldas superiores o intermedios), disminuyendo notoriamente a medida que se alejan del volcán.

- Dentro de la secuencia de materiales piroclásticos y epiclásticos se han desarrollado estratos de suelos orgánicos color café con espesores mayores de 1.5 m.

- Existen dos flujos de lava producto de la erupción del volcán de San Salvador, fácilmente identificables en el mapa geológico del área.

- Se puede apreciar que la erosión fluvial, así como la topografía inciden fuertemente en la erosión del terreno.

2.2. Propiedades geotécnicas.

2.2.1. Ángulo de fricción.

Este ángulo es análogo al ángulo de fricción entre dos cuerpos que se deslizan, en cuyo caso este ángulo se conoce como ángulo de fricción dinámica y tanφ es el coeficiente de fricción. Este depende de varios factores como el tamaño de los granos, la forma de los granos, la distribución de tamaños y la densidad. El ángulo del plano de falla se puede hallar gráficamente de la circunferencia de falla de Mohr o analíticamente por la geometría de la circunferencia de Mohr, ver la Figura 2.3.

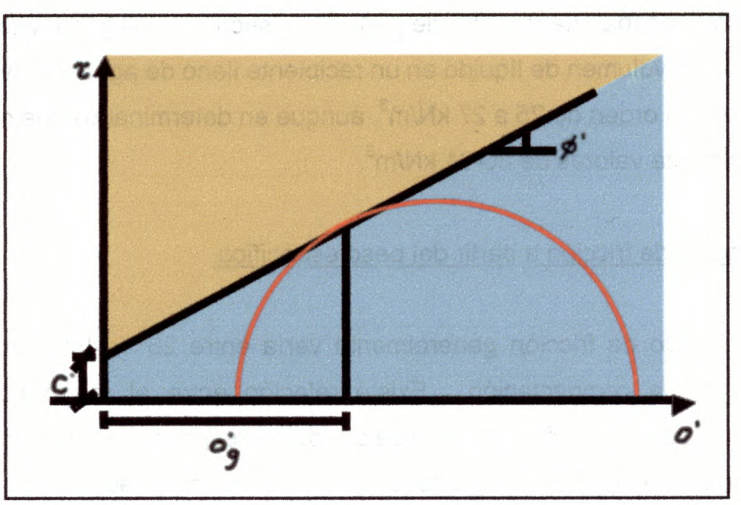

Figura 2.3. El círculo de Mohr. [González de Vallejo, 2001]

2.2.2. Cohesión.

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo y es usada en mecánica de suelos para representar la resistencia al cortante producida por la cementación. En suelos fundamentalmente granulares en los cuales no existe ningún tipo de

cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina "no cohesivos". En los suelos no saturados, el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación.

La cohesión puede ser "aparente" o "verdadera", la cohesión aparente es aquella que se da por capilaridad cuando la muestra se encuentra húmeda, en algunos casos esta cohesión puede ser una componente significativa de la resistencia, aunque en problemas prácticos carece de importancia. La cohesión verdadera se genera por el desarrollo de fuerzas friccionantes cuando las partículas de suelo entran en contacto, y en especial si se producen enlaces en la mayor parte de la superficie de contacto. El tiempo, la meteorización y la desecación contribuyen a crear esta cohesión verdadera.

La resistencia de los suelos no es un valor único, ya que además de los valores de cohesión depende de otras condiciones, como la magnitud de los esfuerzos confinantes, la presencia de agua en los poros o la velocidad de la carga de rotura.

2.2.3. Peso específico.

Se utiliza para estimar la concentración relativa de sólidos y agua. Se determina en laboratorio, midiendo el volumen que ocupa una muestra de partículas (seca y disgregada, y de peso conocido) por desplazamiento de un volumen de líquido en un recipiente lleno de agua y previamente medido. Suele alcanzar valores del orden de 25 a 27 kN/m^3, aunque en determinados suelos volcánicos con minerales de hierro alcanza valores de 30-31 kN/m^3.

Determinación del ángulo de fricción a partir del peso específico.

Para las arenas, el ángulo de fricción generalmente varía entre 26° y 45°, aumentando con la compacidad relativa de la compactación. Existe relación entre el rango aproximado de la compacidad relativa de compactación, tipo de suelo y su correspondiente ángulo de fricción para varios suelos de grano grueso. En el capítulo 3 se muestra la correlación que se utilizará para determinar el ángulo de fricción, a partir del peso específico de las muestras de suelo.

2.2.4. Porosidad.

Es uno de los primeros índices para definir el estado del suelo, se representa por la letra **n** y se define como la relación entre el volumen de huecos y el volumen total del elemento considerado, o

sea un volumen aparente. El índice de poros, **e** que es la relación entre el volumen de huecos y el volumen de sólidos, se relaciona con la porosidad de la siguiente manera:

$$n = e / (1 + e) \qquad \text{(Ec. 2.1.)}$$

En rocas suele usarse **n** y en suelos **e**. El índice de poros varía, normalmente, entre 0.30 y 1.30 (aunque en suelos muy flojos y con materia orgánica llega a alcanzar valores de 3 o más).

2.2.5. Consistencia.

La consistencia en mecánica de suelos se define en función del contenido en agua, a través de la determinación de la humedad: peso del agua del suelo dividido por el peso del suelo seco (el peso del agua se determina por diferencia entre el peso de la muestra de suelo antes y después de secarlo).

La consistencia representa el primer límite definido por Attemberg: el de **consistencia** o **retracción** que separa el estado de sólido seco y el semisólido.

2.2.6. Permeabilidad.

Los poros de los suelos son conductos pequeños e irregulares que están intercomunicados y por los cuales puede fluir el agua de la misma manera que lo hace en otros conductos. El coeficiente de permeabilidad es una constante que tiene dimensiones de velocidad y expresa la facilidad con que el agua atraviesa un suelo. La magnitud del coeficiente de permeabilidad depende de la viscosidad del agua y del tamaño, forma y área de los conductos a través de los cuales fluye el agua. La viscosidad es una función de la temperatura, ya que cuanto más alta es la temperatura menor es la viscosidad y más alta la permeabilidad. La permeabilidad se refiere corrientemente a 20 ºC.

2.3. Resistencia al corte.

2.3.1 Criterio de rotura.

La resistencia al corte del suelo no puede ser considerada como un parámetro único y constante, ya que depende de su naturaleza, estructura, enlaces, nivel de deformaciones, etc., así como, muy especialmente, de su estado tensional y de la presión del fluido que rellena sus poros (agua o aire). [González de Vallejo, 2002].

Al modificar el estado tensional del suelo se producen deformaciones que pueden originar su rotura. Aunque los suelos con cohesión rompen a veces por tracción, como puede ser el caso de las grietas verticales que a veces se observan en la coronación de un talud deslizado, la forma de rotura más habitual en los suelos es por esfuerzo cortante (tensión tangencial).

El criterio de rotura en suelos más difundido deriva del propuesto por Coulomb, que relaciona tensiones efectivas normales y tensiones tangenciales actuando en cualquier plano del suelo. Este criterio establece que, para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por la expresión:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \tan \varphi' \qquad \text{(Ec. 2.3.)}$$

donde:

τ = resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano.

σ_n = tensión total normal actuando sobre el mismo plano.

u = presión intersticial.

c' = cohesión efectiva.

φ' = ángulo de rozamiento interno efectivo.

Para la mayoría de trabajos, los parámetros de resistencia al corte de un suelo (es decir, c y ϕ) son determinados por medio de dos pruebas estándar de laboratorio. Ellas son: a) el ensayo de corte directo y b) la prueba triaxial. [Braja M. Das, 2001].

La ecuación 2.3 representa una recta en el espacio (σ',τ), que a menudo se denomina línea de resistencia intrínseca o envolvente de rotura del suelo. (Ver la Figura 2.4.). Esta línea proporciona, para cada valor de tensión efectiva normal a un plano que atraviesa un elemento del suelo (eje de las abscisas), la máxima tensión tangencial movilizable a favor de dicho plano (eje de las ordenadas).

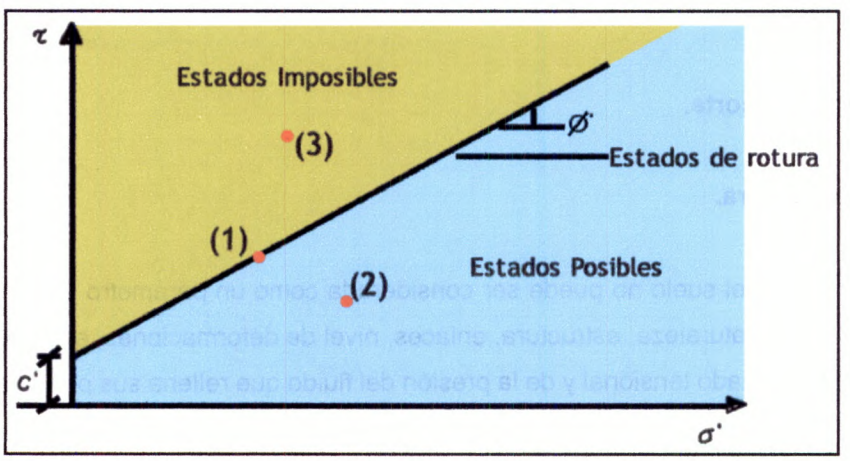

Figura 2.4. Criterio de rotura en suelos. [González de Vallejo, 2002].

De la Figura 2.4. se pueden deducir algunos aspectos interesantes:

- La cohesión efectiva es la ordenada en el origen de la envolvente de rotura. Representa por lo tanto la máxima resistencia tangencial movilizable en un plano cualquiera cuando la tensión efectiva normal en dicho plano es nula.
- La máxima tensión tangencial movilizable en plano es mayor a medida que aumenta la tensión efectiva normal que actúa sobre dicho plano. Es decir, el suelo es más resistente cuanto mayor es su nivel de tensiones efectivas.
- La línea de resistencia definida actúa como una envolvente o superficie de estado, separando los estados posibles de imposibles. Así:
  1) El punto (1) reflejado en la figura 2.4. representa un estado de rotura del suelo.
  2) El punto (2) representa una combinación (σ', τ) que cuenta con un cierto factor de seguridad ya que, para una determinada tensión efectiva normal, la tensión tangencial es inferior a la máxima movilizable.
  3) El punto (3) representa un estado imposible en tanto en cuanto se sitúa por encima de la envolvente de rotura, lo que significa que se ha sobrepasado la combinación máxima (σ', τ) del criterio de rotura, y por lo tanto no es compatible con la resistencia definida del suelo.

De los conceptos básicos del círculo de Mohr, se pueden relacionar las condiciones de rotura en un plano dado con las tensiones actuantes a favor de otros planos.

2.3.2 Pruebas comúnmente usadas para determinar la resistencia al corte de los suelos.

Existen diferentes pruebas para determinar la resistencia al corte de los suelos, podemos mencionar las siguientes [Barahona, M, M., L., 1996]:

a) Pruebas triaxiales
b) Prueba de corte directo
c) Prueba de penetración estándar
d) Prueba de la veleta

En los siguientes párrafos únicamente se describirán la prueba de penetración estándar y las pruebas triaxiales por ser las pruebas más comunes que se pudieron recopilar. La prueba corte directo y la prueba de la veleta muy raramente se realizan en el país, además, se debe tener en cuenta que cualquiera de las cuatro pruebas mencionadas se pueden utilizar para conocer el peso específico y la granulometría de la muestra.

Ensayo de Penetración Estándar

El ensayo de penetración estándar es el método de prueba in situ más ampliamente utilizado, consiste en la penetración del "toma muestras" que aparece en la figura 2.5, dejando caer una masa de 140 libras (63.5 Kg.) desde una altura de 30 pulgadas (76 cm), ver figura 2.6. La resistencia a la penetración se expresa por el número de golpes necesarios para hincar el toma muestras 1 pie (30 cm).

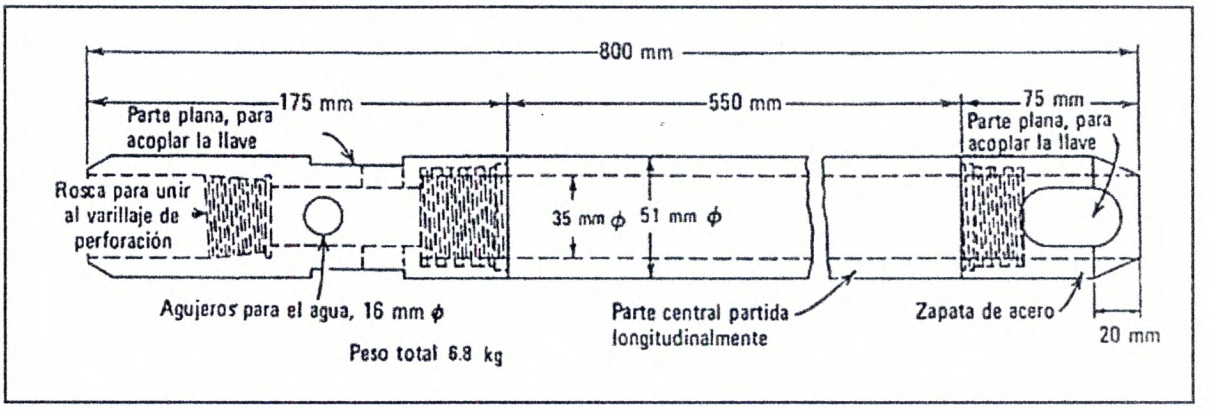

Figura 2.5. Penetrómetro estándar o "toma muestras" según Terzaghi y Peck, 1967. [Lambe y Whitman, 1972]

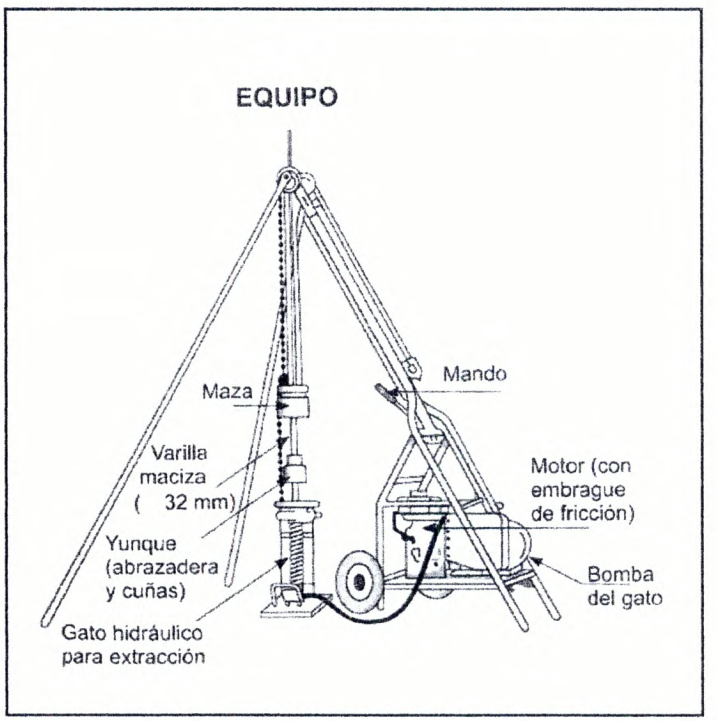

Figura 2.6. Equipo para el ensayo de penetración estándar. [González de Vallejo, 2002]

La prueba de penetración estándar conocida popularmente como prueba SPT (SPT, Standard Penetration Test) constituye un método muy valioso para la exploración del terreno. Sin embargo, solamente debe utilizarse a título indicativo, además, la experiencia ha demostrado que la determinación de la resistencia al corte de una arcilla a partir de la prueba de penetración puede ser muy inexacta. La resistencia a la penetración depende de diversos factores, tal como la compacidad relativa, por lo que es una medida indirecta de la misma.

La prueba de penetración estándar debe utilizarse sólo como indicación o junto con otros métodos de exploración. [Lambe y Whitman, 1972].

Determinación del ángulo de fricción a partir de la prueba de penetración estándar.

Es extremadamente difícil obtener muestras de una arena sin variar su porosidad. Por ello, excepto en problemas de terraplenes o rellenos artificiales, es difícil medir o estimar el ángulo de fricción de una arena únicamente a partir de pruebas de laboratorio. Por estas razones se utilizan ampliamente en la práctica relaciones empíricas entre el ángulo de fricción de una arena y la resistencia del terreno a la penetración. Una correlación empírica es solo aproximada. El ángulo de fricción real puede variar respecto al valor dado por la curva. En el capítulo 3 se muestra la correlación que se utilizará para determinar el ángulo de fricción a partir del número de golpes (N) de la prueba de penetración estándar (SPT).

Prueba Triaxial.

El ensayo de laboratorio más difundido para el estudio de la resistencia al corte de lo suelos es el triaxial. Esta prueba está normada por la norma ASTM D 2850. Aunque con algunas limitaciones, esta prueba resulta muy versátil y permite obtener una buena y variada información sobre la resistencia del suelo con diversas condiciones controlables a voluntad.

En la compresión triaxial se pueden variar las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales, sobre un espécimen de suelo. Dos de los esfuerzos aplicados son de igual magnitud, midiendo prácticamente las características mecánicas del suelo (características de esfuerzo deformación y de resistencia al corte) con la variación del esfuerzo axial.

Aunque la versatilidad del aparato triaxial permite llevar a cabo pruebas muy diversas, existen tres tipos de ensayos característicos. En todos ellos se distinguen dos fases diferenciadas:

- La aplicación de una determinada presión isótropa, permitiendo o no el drenaje.

- La introducción de tensiones tangenciales hasta rotura por medio del movimiento ascendente y el consiguiente aumento de la tensión principal vertical.

En todos los casos, se llevan a rotura tres muestras idénticas de suelo, sometidas en la primera fase del ensayo a tensiones isótropas crecientes. Los tipos de ensayos que se realizan son:

- Ensayo de compresión triaxial con consolidación previa y rotura con drenaje (CD). Conocido como ensayo Consolidado-Drenado.

- Ensayo de compresión triaxial con consolidación previa, rotura sin drenaje y medida de la presión intersticial (CU). Conocido como ensayo Consolidado-No drenado.

- Ensayo de compresión triaxial sin consolidación previa y rotura sin drenaje (UU). Es el ensayo típicamente usado en nuestro país y es conocido como la "Prueba Rápida" o ensayo No consolidado-No drenado.

2.4 Definición de caracterización geotécnica

La caracterización geotécnica se utiliza para determinar los atributos peculiares de un tipo de suelo, de modo que claramente se distinga de los demás. Las caracterizaciones geotécnicas se representan en mapas geotécnicos que aportan datos sobre las características y propiedades del suelo y del subsuelo de una determinada zona para evaluar su comportamiento y prever los problemas geológicos y geotécnicos.

Los mapas geotécnicos deben considerar los siguientes aspectos generales de interés en ingeniería geológica:

- Descripción y clasificación geotécnica de suelos y rocas.
- Propiedades físicas y mecánicas de los materiales.
- Condiciones hidrogeológicas y distribución del agua.
- Condiciones y procesos geomorfológicos.
- Procesos dinámicos.

Los contenidos y el detalle de la información, así como el grado de complejidad en la realización de los mapas, son función de:

- La escala y extensión.
- Los objetivos concretos que se persigan.
- La importancia de los diferentes factores geológicos – geotécnicos y sus relaciones.
- La información disponible, datos y representatividad.

- Las técnicas de representación.

Los mapas geotécnicos incluyen información descriptiva sobre los materiales y procesos geológicos, datos cuantitativos de los diferentes componentes del medio geológico y de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales e información interpretativa para su aplicación geotécnica e ingenieril.

Los mapas de caracterización geotécnica no pueden reemplazar una investigación para una obra concreta, pero son una ayuda insustituible para el diseño racional de las obras, para prever los problemas geológicos-geotécnicos en una zona, planificar las investigaciones in situ e interpretar los resultados de ensayos de campo y laboratorio.

2.5. Movimientos de Masa

2.5.1. Factores que influyen en el movimiento de masa.

La inestabilidad de suelos es un fenómeno que existe debido a la constante evolución de la Tierra, la cual produce cambios en el relieve de la superficie de la corteza terrestre. Actualmente el estudio de estos movimientos de masa ha adquirido una importancia significativa ya que generan movimientos masivos de tierra que afectan de alguna forma el desarrollo humano. Además, a lo largo del tiempo el hombre ha contribuido de manera significativa a que estos fenómenos se manifiesten en mayor cantidad, debido a la excesiva explotación de los recursos naturales. Es debido a esta interacción entre el hombre y la Tierra que la identificación de los mecanismos básicos de inestabilidad en suelos cobra importancia para poder caracterizar las causas que lo generan. Los factores influyentes en el movimiento de masa son:

- Ángulo de pendiente. Este factor está relacionado a la geometría de los suelos y su valor es proporcional a la probabilidad de ocurrencia del movimiento del suelo.

- Intemperismo y clima. Factores tales como la lluvia, la erosión, los cambios de temperatura, etc.; contribuyen a la inestabilidad de los suelos. Se sabe además que, a mayor grado de intemperización de las rocas a mayor profundidad de los materiales intemperizados, la probabilidad de un movimiento de suelo aumenta.

- Contenido de humedad. Este factor esta relacionado a la variación en las propiedades mecánicas de los suelos, por ejemplo, a mayor humedad en los suelos granulares, se induce

inestabilidad por fenómenos como la ruptura del enlace o amarre existente entre las partículas del suelo.

- Vegetación. La vegetación en una ladera de suelo es de gran importancia para la estabilidad, ya que absorbe la humedad del suelo proveniente de precipitaciones intensas y los sistemas de raíces estabilizan y refuerzan la pendiente.

- Sobrecarga. El aumento de la carga sobre un suelo aumenta la probabilidad de que ocurran movimientos de suelo.

- Geomorfología. La forma y orientación en la que se depositaron los materiales en una ladera contribuye a la estabilidad o inestabilidad de la misma. En una ladera donde los planos de separación entre estratos se orientan paralelos a la pendiente, existirá mayor inestabilidad debido a que, en este plano, se genera una discontinuidad de materiales; por otro lado, en laderas en las cuales el plano que separa los estratos esta en dirección transversal a la inclinación de la ladera, la estabilidad es mayor.

2.5.2. Mecanismos de desencadenamiento.

Este mecanismo es un estímulo externo como una precipitación intensa, un movimiento sísmico, una erupción volcánica, factores atrópicos, cambios en el nivel freático, etc., que causa una respuesta casi inmediata del deslizamiento, incrementando rápidamente los esfuerzos o reduciendo la resistencia a cortante de los materiales que componen una pendiente.

Los fenómenos de inestabilidad pueden tener varias causas: geológicas, morfológicas, físicas y humanas; pero solo una causa desencadenante. Sin embargo, en algunos casos los movimientos de masa pueden ocurrir sin un mecanismo desencadenante aparente, debido a la combinación de diversas causas.

A continuación se describen los mecanismos de los fenómenos desencadenantes de un movimiento de masa:

- Lluvia o precipitación.

Se cree que uno de los mecanismos desencadenantes de los movimientos consiste en la rápida infiltración del agua que causa un aumento en la presión de poros y descenso en la resistencia al cortante; esto unido al aumento de peso del agua dentro de la masa saturada lleva a la falla en las

zonas de debilidad como en la interfaz de estratos o discontinuidades en el suelo. [Dominica Public Seismic Network, 2001]

"Se ha observado que las fallas sobrevienen durante las partes mas intensas de una tormenta o combinación de intensidad moderada durante largos periodos de precipitaciones". [Turner, 1996]

Los suelos sueltos o débiles son especialmente susceptibles a movimientos desencadenados por lluvia.

- Cambio en el nivel de agua.

El rápido descenso o elevación del nivel de agua en pendientes de presas de tierra, en la costa y orillas de ríos, lagos, canales y embalses puede provocar fenómenos de inestabilidad. A menos que la pendiente adyacente al cuerpo de agua sea capaz de disipar rápidamente la presión de poros, estará sujeta a esfuerzos altos de cortante y potencialmente a la inestabilidad. Los suelos susceptibles a este fenómeno son los depósitos gruesos de arcilla de baja permeabilidad, limos y sedimentos.

- Erupciones volcánicas.

La depositación de cenizas volcánicas sueltas en las pendientes es seguida comúnmente por una erosión acelerada o un flujo de lodos o detritos provocados por lluvias intensas.

- Movimientos sísmicos.

Los fuertes movimientos sísmicos históricamente han desencadenado muchos fenómenos de inestabilidad en distintas configuraciones topográficas y geológicas. Derrumbes de rocas, deslizamientos de suelo y deslizamientos de rocas en pendientes pronunciadas con capas disgregadas y delgadas de suelos y/o rocas son los tipos de movimientos más comunes durante los terremotos. Arrastre de tierras, deslizamientos de tierra y flujos de tierra en pendientes suaves también son abundantes.

Los movimientos de suelos no cohesivos, sueltos y saturados, en pendientes de suaves a moderadas ocurren frecuentemente como resultado de licuefacción producida por sismos. Los depósitos de pómez en pendientes pronunciadas pierden mucha de su resistencia bajo cargas sísmicas. El movimiento brusco incrementa los esfuerzos de tal manera que se pierde la cohesión en suelos cementicios o rocas frágiles.

- Factores atrópicos.

Además de los fenómenos naturales, las actividades humanas pueden aumentar la susceptibilidad para que ocurra un deslizamiento. Los deslizamientos que resultan de la influencia humana, usualmente se originan por el aumento de humedad en los suelos o el cambio de forma en la pendiente. Las labores tales como cortes o rellenos a lo largo de caminos y la supresión de toda vegetación, pueden alterar enormemente la forma de la pendiente y las condiciones de las aguas subterráneas. Así alteradas, estas pueden aumentar significativamente el peligro de deslizamientos. Por ejemplo, convertir un área de bosques en pastizal, o en terreno de cultivo, puede aumentar tanto la humedad en el suelo como para causar problemas de deslizamiento. Además, construir un camino que corta el pie de un talud con una pendiente pronunciada puede aumentar la susceptibilidad para que ocurran estos fenómenos.

2.5.3. Tipos de movimientos de masa.

Las clasificaciones de los movimientos de masa suelen referirse a los tipos de materiales involucrados, distinguiendo generalmente entre materiales rocosos, derrubios y suelos, y al mecanismo y tipo de rotura, considerando también otros aspectos, como el contenido de agua del terreno y la velocidad y magnitud del movimiento. También han sido establecidas clasificaciones específicas para algunos materiales, como las arcillas, o para algunos tipos de movimientos, como los flujos. La figura 2.7. muestra una clasificación simplificada de los diferentes tipos de movimientos de ladera, en función de los mecanismos de rotura y del tipo de material.

Los tipos de movimientos de masa son los siguientes:

- Derrumbes
- Flujos.
- Avalanchas rocosas.
- Desplazamientos laterales.
- Deslizamientos

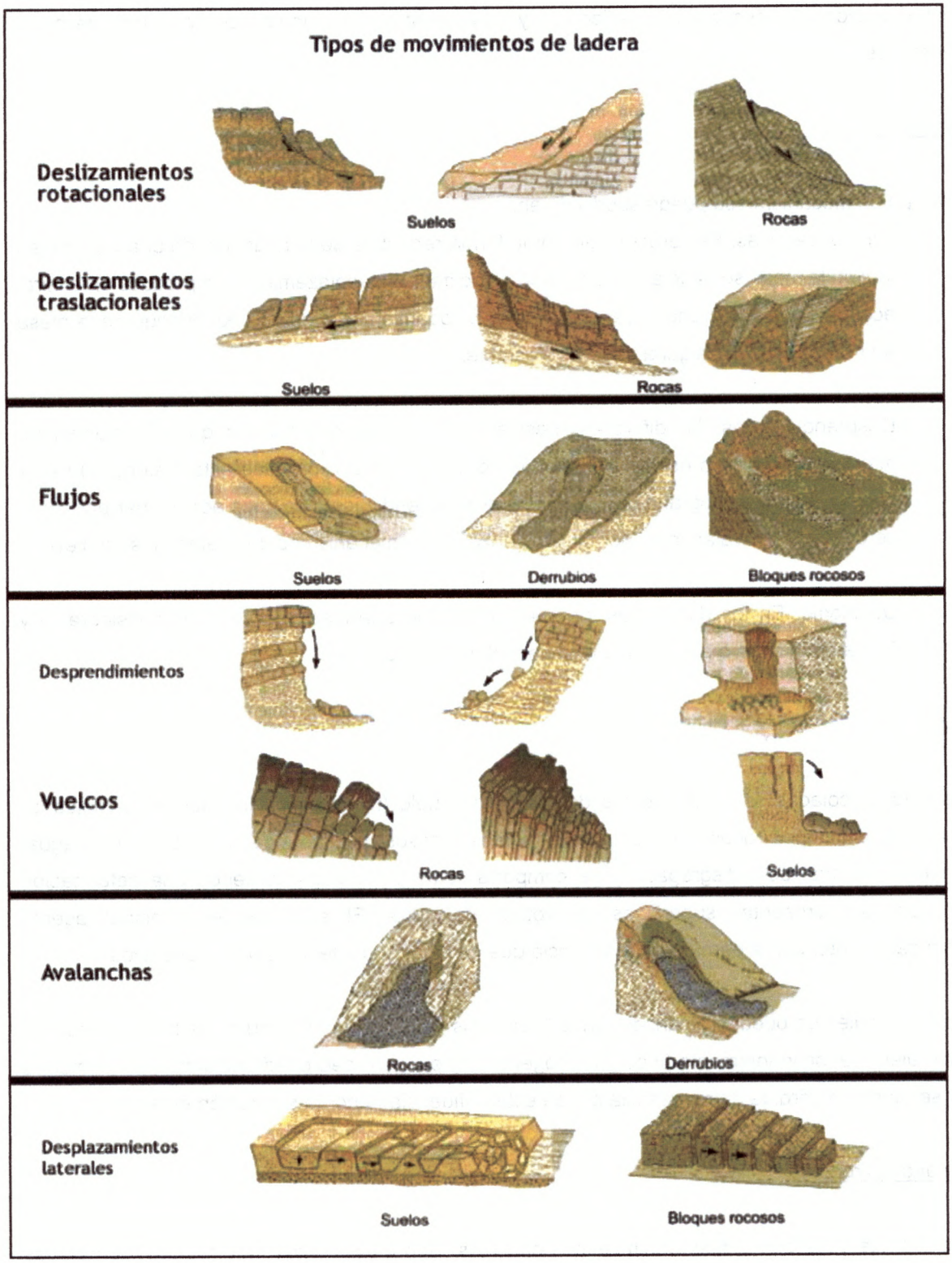

Figura 2.7. Clasificación general de los movimientos de ladera. [González de Vallejo, 2002]

A continuación se describe la clasificación y características principales de cada uno de estos fenómenos:

Derrumbes

Este tipo de mecanismo se puede subdividir en:

a) Caídas de rocas: Se caracterizan por la forma repentina de la aparición de una ruptura, en la cual la masa se desplaza a una gran velocidad. El desplazamiento se produce en el aire, acompañado en algunos casos por saltos y rodamientos producto del choque de la masa en movimiento con alguna superficie estable.

b) Desprendimientos: La diferencia básica con el anterior radica en que el volumen de material desplazado es mayor, además de la erosión que produce este material al hacer contacto con la topografía del terreno. Si el desprendimiento se hace acompañar por agua, se denominan avalanchas, por la semejanza en los mecanismos de avalanchas de nieve.

c) Desplome: En los desplomes, hay un colapso de una masa de volumen considerable y forma en la base o pie, un depósito de material grueso.

Flujos.

Los flujos o coladas son movimientos de masas de suelo (flujos de suelo), derrubios (flujos de derrubios) o bloques rocosos (flujos de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material esta disgregado y se comporta como un "fluido", sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia que da lugar en materiales poco cohesivos.

Estos movimientos pueden alcanzar varios kilómetros de recorrido. Los flujos de barro se dan en materiales predominantemente finos y homogéneos, y su velocidad puede alcanzar varios metros por segundo; la pérdida de resistencia puede estar influenciada por la saturación en agua.

Avalanchas rocosas.

Son consideradas como desprendimientos complejos. Son movimientos muy rápidos, con caídas de masas de rocas o derrubios que se desprenden de laderas escarpadas. Las masas rocosas se rompen y pulverizan durante la caída, dando lugar a depósitos con una distribución caótica de bloques, con tamaños muy diversos, sin estructura, prácticamente sin abrasión y con gran porosidad.

Las avalanchas son generalmente el resultado de deslizamientos o desprendimientos de gran magnitud que, por lo elevado de la pendiente y la falta de estructura y cohesión de los materiales, descienden a gran velocidad ladera abajo en zonas abruptas, pudiendo superar los 100 km/hora, incluso si las masas están completamente secas.

Desplazamientos laterales.

Los desplazamientos laterales hacen referencia a bloques rocosos o masas de suelos muy coherente y cementado sobre material blando y deformable. Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Los movimientos son debidos a la pérdida de resistencia del material subyacente, que fluye o se deforma bajo el peso de los bloques rígidos. Los desplazamientos laterales también pueden ser provocados por procesos de expansión lateral de arcillas blandas y húmedas bajo el peso de las masas superiores. Se dan en laderas suaves, y pueden ser muy extensos. Las capas superiores se fragmentan generándose grietas, desplazamientos diferenciales, vuelcos, etc.

2.5.4. Deslizamientos

Los deslizamientos pueden definirse como un descenso masivo y relativamente rápido, a veces de carácter catastrófico, de materiales, a lo largo de una pendiente. El material se mueve como una masa única, no como varios elementos que se mueven a la vez. El movimiento se efectúa a lo largo de una superficie de deslizamiento, o plano de cizalla que facilita la acción de la gravedad". La velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes volúmenes. En ocasiones, cuando el material deslizado no alcanza el equilibrio al pie de la ladera (por su pérdida de resistencia, contenido de agua o por la pendiente existente), la masa puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lugar a un flujo.

Pueden producirse deslizamientos de derrubios (por ejemplo en laderas rocosas muy alteradas y fracturadas), que generalmente dan lugar a flujos de derrubios, ya que suelen ocurrir en condiciones de saturación del material. El término derrubio se refiere a un material suelto, sin consolidar, con una proporción significativa de material grueso

Tipo de superficie de rotura de los deslizamientos

La superficie de rotura se produce sobre un plano en el cual se vencen los esfuerzos cortantes. Las características de las superficies de rotura para los diferentes tipos de deslizamientos se describen a continuación.

a) Deslizamiento rotacional: Son mas frecuentes en suelos cohesivos homogéneos. La rotura superficial o profunda, se da en forma de superficies curvas o en forma de cuchara. Una vez iniciada la inestabilidad, la masa empieza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre sí y dan lugar a escalones con la superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estiradas. La parte inferior de la masa deslizada se acumula al pie de la ladera formando un depósito con grietas de tracción transversales (Ver Figura 2.8.). Dependiendo del tipo de suelos y del contenido en agua, se pueden generar flujos.

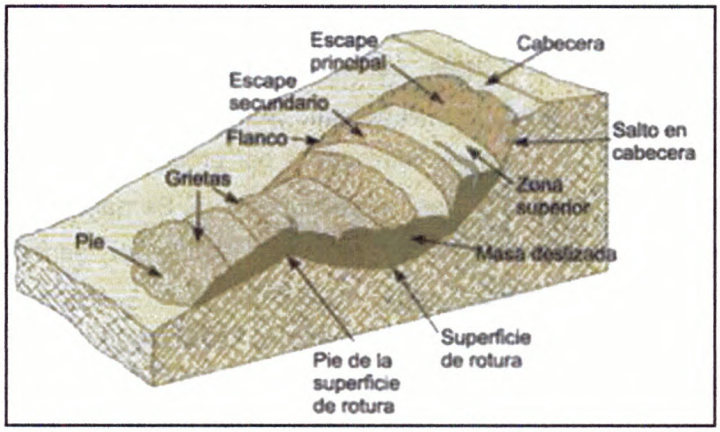

Figura 2.8. Esquema de un deslizamiento rotacional y partes del mismo. [González de Vallejo, 2002]

b) Deslizamiento traslacional: Es aquel donde la superficie de ruptura es plana u ondulada.

c) Deslizamientos complejos: Es la combinación de más de un mecanismo en secuencia temporal. Generalmente los volúmenes en movimiento son muy masivos. Su evolución en el tiempo es muy lenta por lo que se denominan permanentes. Este comportamiento se debe a los esfuerzos residuales posteriores a su rotura. En su mayoría provienen de épocas milenarias.

d) Deslizamientos superficiales: Es un fenómeno que se presenta principalmente en regiones montañosas. En su estado premonitorio puede llegar a desplazarse hasta dos centímetros por año, con profundidades de 1 a 2 metros. Afecta las capas superficiales de los terrenos cubiertos por vegetación o depósitos de suelos producto de la erosión causada por inundaciones de lluvias. Su mecanismo es un conjunto de pequeños desplazamientos en un plano rotacional que se convierte en un deslizamiento de gran velocidad que puede causar mucha erosión debido a flujos y rápidos deslizamientos.

e) Deslizamientos planos: Se producen por cambios abruptos en la superficie de estratos que no son compatibles el uno con el otro. Además favorecen estos deslizamientos los planos de fallas en la misma dirección de la pendiente del terreno. Debido a esto, los bloques propensos a este tipo de deslizamiento están compuestos por suelos estratificados sin soporte en la base y en los laterales. La pérdida de soporte lateral es provocada por alteraciones o intervenciones humanas.

f) Deslizamientos compuestos: Es la manifestación simultánea de por lo menos dos tipos de mecanismos en diferentes lugares de la masa en movimiento. El tipo de superficie de rotura no esta claramente definido debido a la combinación de mecanismos; son desplazamientos de masas de tierra o roças por una pendiente en forma súbita o lenta y su ocurrencia depende de las siguientes variables:

- Clase de rocas y suelos.
- Orientación de las fracturas o grietas en la tierra.
- Cantidad de lluvia en el área.
- Actividad sísmica.
- Actividad humana (cortes en ladera, falta de canalización de aguas, etc.).
- Erosión (por actividad humana y de la naturaleza).

Factores que influyen en la estabilidad de las laderas

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. El que una ladera permanezca estable o sufra un deslizamiento depende de la unión de varios factores, entre los que están:

- Características del terreno.- Los lugares montañosos con pendientes fuertes son los que con más facilidad sufren deslizamientos, aunque en ocasiones pendientes suaves son suficientes para originarlos si la roca está muy suelta o hay mucha agua en el subsuelo.

- Condiciones climáticas.- Durante la época lluviosa suele haber espesores grandes de materiales alterados por la meteorización y el nivel freático suele estar alto, lo que, en conjunto, facilita mucho los deslizamientos.

- Macizos rocosos con fallas y fracturas.- Tienen especial importancia en los desprendimientos. La mayoría de las caídas de rocas y otros materiales tiene lugar en lugares en los que el terreno tiene abundantes fracturas y se ha ido produciendo erosión en

la base de laderas. En estos lugares cuando llueve intensamente con facilidad se pueden producir desprendimientos.

- Erosión.- Los ríos, el mar u otros procesos van erosionando la base de las laderas y provocan gran cantidad de deslizamientos.

- Acciones antrópicas.- Los movimientos de tierras y excavaciones que se hacen para construir carreteras, ferrocarriles, edificaciones, presas, minas al aire libre, etc. rompen los perfiles de equilibrio de las laderas y facilitan desprendimientos y deslizamientos. Además normalmente se quitan los materiales que están en la base de la pendiente que es la zona más vulnerable y la que soporta mayores cargas.

Se conoce la acción de uno de los factores que más afectan en el país: los terremotos, que provocan movimientos del terreno, desestabilizando los taludes por inducir fuerzas de inercia en los mismos entre otras causas. En este trabajo de graduación nos interesaran dos mecanismos de desencadenamiento de deslizamientos: terremotos y lluvias.

2.5.5. Definición y clasificación de taludes.

Según Whitten y Brooks [1980], un talud puede definirse como una "acumulación formada por los fragmentos resultantes de la meteorización mecánica de las rocas. Como resultado del transporte por gravedad a corta distancia, la masa de derrubios se forma in situ." Es una estructura geotécnica formada por el desnivel del terreno cuyo cuerpo posee una inclinación denominada paramento, esta inclinación se mide desde su base o pie hasta su cresta, y puede ser formada de forma natural o artificial por acciones atrópicas.

Según Ambramson [1996] los taludes se pueden clasificar de la siguiente manera:

Taludes naturales

Muchos proyectos interceptan cerros y valles, y esos rasgos del paisaje pueden traer problemas a la estabilidad de los taludes. Taludes naturales que han sido estables por muchos años pueden repentinamente fallar por cambios en la topografía, sismicidad, pérdidas de fuerzas, cambios de esfuerzos, flujos de agua en la tierra y clima. Generalmente estas fallas no son bien comprendidas. En muchas ocasiones, existe una incerteza significativa en relación a la estabilidad de un talud natural.

Conociendo la superficie de deslizamiento de un talud natural, es fácil entender y predecir su comportamiento. Superficies de deslizamientos semejantes frecuentemente son el resultado de deslizamientos previos o actividades tectónicas.

Los esfuerzos cortantes a lo largo de este tipo de superficies frecuentemente son muy bajos porque movimientos previos han causado la resistencia pico y gradualmente se reducen hasta valores residuales. No siempre es fácil reconocer áreas de deslizamientos, sin embargo, una vez que un estrato preesforzado ha sido localizado, la evaluación de la estabilidad puede ser realizada con confianza.

Taludes artificiales

- Terraplenes y rellenos.

Las propiedades ingenieriles de los materiales usados en estas estructuras son controladas por la distribución del tamaño de las partículas del banco de préstamo, los métodos de construcción, y el grado de compactación. En general, los terraplenes son diseñados por parámetros de esfuerzos cortantes, obtenidos de pruebas y ejemplos de materiales propuestos compactados a la densidad de diseño. El análisis de estabilidad de taludes y rellenos no tiene usualmente la misma dificultad e incerteza como un talud natural o cortado, porque los materiales pueden ser preseleccionados y procesados. Debido a que los rellenos son generalmente construidos en capas, el análisis se requiere a lo largo del proyecto o cuando se construya en los siguientes casos:

1. Todas las fases de la construcción
2. Al final de la construcción
3. Por un largo tiempo, debido a alguna condicionante
4. Disturbios naturales, tales como: una inundación o terremotos
5. Cambios rápidos de nivel de agua (para estructuras que retienen agua como presas de tierra).

- Taludes cortados.

Los cortes superficiales y profundos son estructuras comunes en cualquier proyecto de ingeniería civil. El objeto del diseño de un talud es determinar la altura e inclinación que sea más económica y que será estable por un período razonable. El diseño es influenciado por los propósitos del corte, condiciones geológicas, propiedades de los materiales del lugar, métodos constructivos, y la ocurrencia potencial de un fenómeno debido a una precipitación alta, inundación, erosión y terremotos.

El diseño debe considerar medidas que prevengan fallas inmediatas y repentinas. En algunas situaciones, la estabilidad de taludes cortados al final de la construcción puede ser una consideración crítica de diseño. Los taludes cortados, si bien son estables en una temporada corta, pueden fallar muchos años después sin ningún problema.

2.5.6. Estabilidad de taludes

Las obras de infraestructura lineal como carreteras, ferrocarriles, canales, conducciones, explotaciones mineras, y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente, o alcanzar una profundidad determinada por debajo de la superficie, precisan la excavación de taludes. Los taludes de la Figura 2.9. se construyen con la pendiente más elevada que permite la resistencia del terreno, manteniendo unas condiciones aceptables de estabilidad.

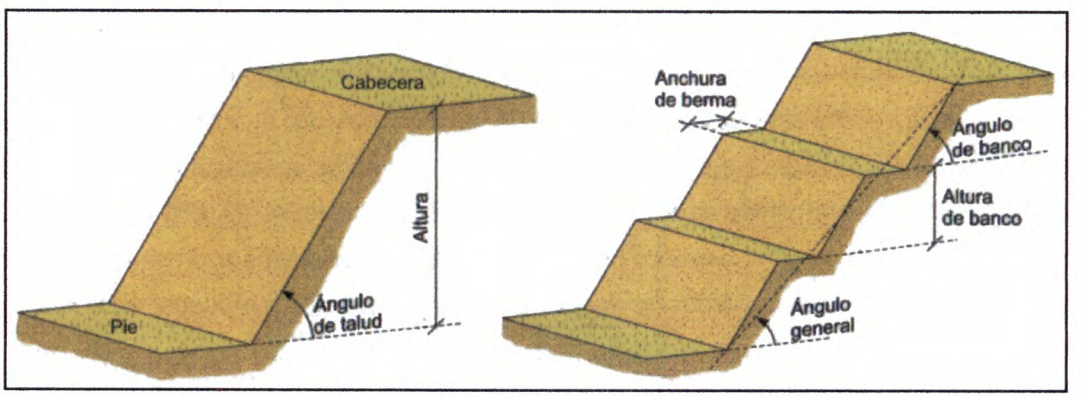

Figura 2.9. Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos. [González de Vallejo, 2002].

El diseño de taludes es unos de los aspectos más importantes de la ingeniería geológica, pues está presente en la mayoría de las actividades constructivas o extractivas.

Factores influyentes en la estabilidad

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 en el talud), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad).

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 cierto volumen de masa

de suelo o roca. La posibilidad de rotura y los mecanismos y modelos de inestabilidad de los taludes están controlados principalmente por factores geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos y geométricos.

Los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos se consideran factores condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales (Ver Tabla 2.2.). En los suelos la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas, determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud.

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
▪ Estratigrafía y litología. ▪ Estructura geológica. ▪ Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales. ▪ Propiedades físicas, resistentes y deformacionales. ▪ Tensiones naturales y estado tenso-deformacional.	▪ Sobrecargas estáticas. ▪ Cargas dinámicas. ▪ Cambios en las condiciones hidrogeológicas. ▪ Factores climáticos. ▪ Variaciones en la geometría. ▪ Reducción de parámetros resistentes.

Tabla 2.2. Factores influyentes en la inestabilidad de los taludes. [González de Vallejo, 2002].

2.6. Peligrosidad, Vulnerabilidad y Riesgo.

Los procesos geodinámicos que afectan a la superficie terrestre dan lugar a movimientos del terreno de diferente magnitud y características, que pueden constituir riesgos geológicos al afectar, de una forma directa o indirecta, a las actividades humanas.

Fenómenos tales como la erosión, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas y las precipitaciones pueden producir deslizamientos y desprendimientos en las laderas, flujos de tierra y derrubios, aterramientos, hundimientos, subsidencias, etc. Estos movimientos del terreno son reflejo del carácter dinámico del medio geológico y de la evolución natural del relieve, pero también pueden ser provocados o desencadenados por el hombre al interferir con la naturaleza y modificar sus condiciones.

Los movimientos del terreno, desde un deslizamiento de cierta magnitud hasta un terremoto de gran intensidad, causan en ocasiones cifras muy elevadas de víctimas y pérdidas económicas.

Los problemas derivados de la doble interacción entre el medio geológico y las actividades humanas hacen necesario el planteamiento de actuaciones adecuadas para conseguir un equilibrio entre las condiciones naturales y la ocupación del territorio, incorporando los métodos de prevención y mitigación de los riesgos geológicos a la planificación.

Los efectos de los movimientos del terreno pueden ser directos o indirectos, a corto, largo plazo o permanentes. La escala de tiempo geológico en que se desarrollan determinados procesos, como los tectónicos o isostáticos, hace que sus efectos no sean considerables a escala humana.

Solo determinados procesos, cuando ocurren a escala geotécnica ingenieril, son controlables mediante actuaciones antrópicas, como los deslizamientos y desprendimientos, los procesos erosivos, las subsidencias y las inundaciones. Los terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas y grandes deslizamientos y avalanchas montañosas quedan fuera del alcance y control humanos.

Para evitar o reducir los riesgos geológicos e incorporar la influencia de éstos a la planificación y ocupación del territorio, es necesaria la evaluación de la peligrosidad y del riesgo; en los estudios de riesgo se utiliza una termología propia para definir la peligrosidad, el riesgo y la vulnerabilidad. Si bien el término riesgo frecuentemente se emplea para referirse a cualquier proceso más o menos violento o catastrófico que puede afectar a las personas o bienes, todos estos conceptos son diferentes. La peligrosidad se refiere al proceso geológico, el riesgo a las pérdidas y la vulnerabilidad a los daños. A continuación se definen estos conceptos según su uso más extendido.

Peligrosidad.

La peligrosidad (P), hace referencia a la frecuencia de ocurrencia de un proceso y al lugar. Se define como la probabilidad de ocurrencia de un proceso de un nivel de intensidad o severidad determinando, dentro de un período de un tiempo dado y dentro de un área específica.

Para su evaluación es necesario conocer:

- Dónde y cuándo ocurrieron los procesos en el pasado.
- La intensidad y magnitud que tuvieron.
- Las zonas en que pueden ocurrir procesos futuros.
- La frecuencia de ocurrencia.

El último punto sólo puede ser estimado si se conocen las pautas temporales del proceso (por ejemplo el período de retorno de los terremotos o inundaciones, a partir de datos y series históricas y/o instrumentales) o de los factores que lo desencadenan (el período de retorno de las precipitaciones que desencadenan deslizamientos en una zona).

La peligrosidad, según se ha definido, puede expresarse como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de determinada intensidad en un lapso de tiempo dado, pero también se puede expresar a partir del período de retorno (años transcurridos entre 2 eventos o procesos de semejantes características).

Vulnerabilidad.

La vulnerabilidad (V), es el grado de daños o pérdidas potenciales en un elemento o conjunto de elementos como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada. Depende de las características del elemento considerado y de la intensidad del fenómeno; suele evaluarse entre 0 (sin daño) y 1 (pérdida o destrucción total del elemento) o entre 0% y 100% de daños.

Con respecto al riesgo sísmico, la vulnerabilidad de una estructura, grupo de estructuras o de una zona urbana, se define como su predisposición intrínseca a sufrir daños ante la ocurrencia de un movimiento sísmico de una serenidad determinada; depende de las características de diseño de la estructura y de la intensidad del terremoto.

Este parámetro suele definirse mediante las funciones de vulnerabilidad, que pueden ser establecidas a partir de los daños o pérdidas que los procesos han ocasionado en el pasado y/o en base a hipótesis de las pérdidas potenciales que ocasionarán los fenómenos si éstos ocurrieran. En ambos casos hay que tener en cuenta la existencia de medidas actuales para la reducción o mitigación de los daños potenciales, que reducen la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Riesgo.

El concepto de riesgo (R) incorpora consideraciones socio-económicas, y se define como las pérdidas potenciales debidas a un fenómeno natural determinado (vidas humanas, pérdidas económicas directas e indirectas, daños a edificios o estructuras, etc.).

En la actualidad, es en el campo de los terremotos donde más se han desarrollado los estudios de riesgo. Se define el riesgo sísmico como las pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica; dicho lapso de tiempo se denomina período de exposición o período de vida útil de las estructuras, como ha sido indicado anteriormente.

La evaluación del riesgo geológico resulta compleja, por ser compleja la evaluación de los términos que lo definen. El riesgo se evalúa a partir de la peligrosidad correspondiente a un determinado

proceso (causa) y de los efectos del mismo sobre los elementos expuestos al peligro (consecuencias). Estos efectos sobre los elementos expuestos (edificios, infraestructuras, personas, bienes, etc.) pueden ser expresados por diferentes parámetros: vulnerabilidad, pérdidas, costes, exposición, etc. El riesgo está referido, como la peligrosidad, a un período de tiempo determinado, y se puede evaluar de forma determinista o probabilista.

El riesgo puede calcularse a partir de la expresión:

$$R = P \times V \times C \qquad \text{(Ec. 2.4.)}$$

Donde: P es la peligrosidad del proceso considerado, V es la vulnerabilidad de los elementos expuestos a la acción del proceso y C es el costo o valor de los mismos.

Si cualquiera de los factores es nulo, el riesgo será nulo; así en una zona de peligrosidad muy elevada, el riesgo será cero si no existen elementos expuestos, o si la vulnerabilidad de los mismos es nula. El hombre puede incrementar el riesgo al ocupar zonas peligrosas al incidir en la intensidad de los procesos o provocarlos y al construir estructuras y edificios vulnerables. El riesgo puede reducirse disminuyendo la peligrosidad o la vulnerabilidad.

2.6.1. Amenaza por deslizamientos de tierra.

En términos generales la amenaza es la probabilidad de ocurrencia de un evento, por lo que la amenaza por deslizamiento de tierra se entenderá como la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento de tierra de un nivel de intensidad dado, en un periodo dado y en un área de terreno específica.

Se puede evaluar la amenaza conociendo eventos históricos que han ocurrido junto con sus características o mediante métodos desarrollados por varios autores, por ejemplo el método Mora Vharson, cuya metodología permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores morfodinámicos, y es sencilla de implementar en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

La importancia de evaluar la amenaza por deslizamiento y su aplicación, es lograr la comprensión de los fenómenos naturales en el área de estudio, lo cual incide en su desarrollo eficiente y duradero.

2.7. Sistemas de Información Geográfica.

2.7.1. Introducción.

Un SIG se puede definir como una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente mediante un software que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con éstos siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (personal).

Son por tanto cuatro los elementos constitutivos de un sistema de estas características:

1. Hardware.
2. Software.
3. Datos geográficos.
4. Equipo humano.

Aunque todos estos elementos han de cumplir con su cometido para que el sistema sea funcional, existen diferencias en cuanto a su importancia. A lo largo del tiempo, el peso de cada uno de los elementos dentro de un proyecto SIG ha ido cambiando mostrando una clara tendencia: los equipos informáticos condicionan cada vez menos los proyectos SIG por el abaratamiento de la tecnología y los datos geográficos se hacen cada vez más necesarios. Además, estos cuatro elementos funcionan para: recopilar; introducir; manejar y analizar espacialmente datos que poseen referencia geográfica y exhibir la información resultante. Estos procesos que se describen a continuación.

- La recopilación de datos comprende las actividades de campo, es decir las que están relacionadas con la obtención de cartografías, generación de información en campo, análisis de laboratorio y recolección de información existente.

- La introducción de datos se realiza mediante la conversión de datos analógicos en datos digitales o la modificación de datos digitales para que formen parte de los SIG. Esto se logra mediante diversos procedimientos que más adelante serán explicados.

- El manejo de datos consiste en la creación de una base de datos en la que se almacena la información.

- El análisis de datos consiste en la aplicación de modelos cartográficos.

- La salida de datos se hace utilizando plotters, impresoras o mediante el despliegue en pantalla; además se puede complementar con reportes que ayuden a la comprensión de los resultados obtenidos.

2.7.2. Conceptos Básicos

Antes de tratar sobre el ambiente del funcionamiento del SIG es necesario familiarizarse con algunos conceptos. A continuación se presentan los conceptos de mayor relevancia en el lenguaje de los SIG.

- Entidades espaciales

Las entidades espaciales son objetos geográficos que pueden tener cualquier forma y gráficamente son representadas por tres símbolos: puntos, arcos y polígonos.

Los puntos son posiciones geométricas singulares que se definen por medio de sus coordenadas, se utilizan para representar elementos muy pequeños y difíciles de dibujar con escala exacta por ejemplo accidentes culturales como casas, pozos, minas, puentes o monumentos.

Los arcos son entidades que poseen localización y longitud, se definen a partir de una cadena de pares de coordenadas; cada par constituye un vértice y los pares de los extremos al igual que las intersecciones de arcos se denominan nodos, en la Figura 2.10. se ejemplifica la nomenclatura usada para definir este tipo de entidad espacial. Estas entidades se utilizan para representar calles, ríos, fallas geológicas, flujo vehicular o redes de tubería.

Los polígonos representan gráficamente objetos con área (entidades que cubren una superficie en dos dimensiones) y perímetro, están definidos por las zonas interiores delimitadas por el espacio continuo que existe entre tres o más arcos que formen un lazo cerrado. Se utilizan para definir límites municipales, tipos de tierra, ciudades o bases de edificios.

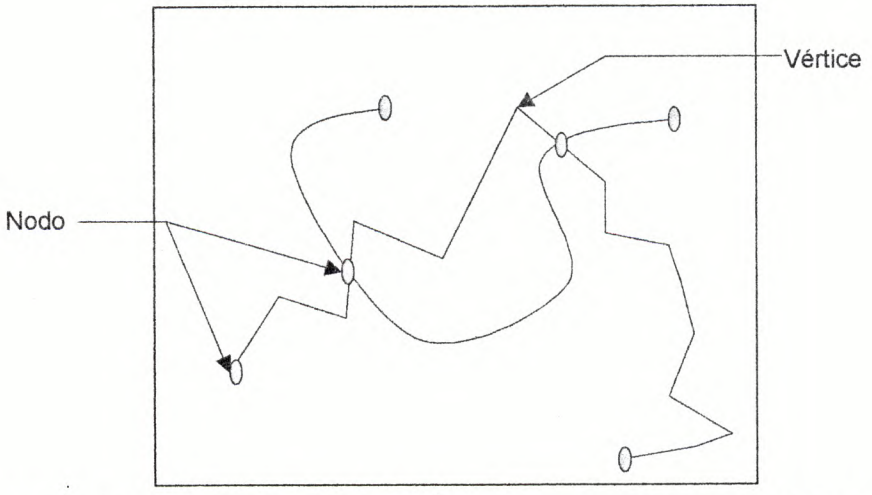

Figura 2.10. Elementos que componen los arcos. .[www.recursos.gabrielortiz.com]

- Entidades no espaciales

Son características cualitativas (por ejemplo nombres) o cuantitativas (por ejemplo datos estadísticos) asociadas a la entidad espacial que se desea describir, son almacenadas como códigos en tablas organizadas por un sistema de base de datos. Las entidades no espaciales resultan útiles para clasificar a los elementos de una cobertura, por ejemplo, si se tiene una cobertura de calles se pueden asignar códigos que permitan al sistema clasificar las calles en principales o secundarias. Las entidades no espaciales son llamadas también atributos.

- Coberturas de mapas

Una cobertura es una capa que contiene información geográfica, geométrica y descriptiva de entidades espaciales similares y está formada por conjuntos de ellas; se pueden construir por ejemplo coberturas que contengan calles, ríos, límites municipales, curvas de nivel, pozos, tanques, edificios, etc. El uso de coberturas es útil puesto que permite ocultar la información que no interesa y así tener mayor facilidad a la hora de explorar un mapa. Usualmente, en un mapa tradicional se representa una variedad de objetos en la misma hoja de papel y en ellos se encuentra todo lo referente a límites municipales, calles y edificios lo cual es útil pero implica que no se puede ver por separado, en este sentido, el uso de coberturas facilita el manejo y procesamiento de la información.

- Coordenadas espaciales de referencia

Estas son referencias numéricas únicas atribuidas a cada entidad espacial de una cobertura. Las coordenadas de referencia espacial están representadas por dos números que definen la posición

en los ejes "X" y "Y", estos valores se refieren a la localización geográfica de la entidad en el espacio como si estuviese ubicada sobre un mapa; la coordenada X se refiere a su posición horizontal (longitud) y la coordenada Y se refiere a su posición vertical (latitud).

- Bases de datos

Base de datos:
Es un conjunto completo de individuos, objetos o medidas que poseen alguna característica común observable.

Base de datos geográfica:
Una base de datos geográfica es una colección de datos organizados de tal manera que sirvan efectivamente para una o varias aplicaciones en los SIG, comprende la asociación entre su dos principales componentes: entidades espaciales y no espaciales.

La base de datos está formada por objetos del mundo real, estos quedan definidos en los SIG mediante los siguientes parámetros:

- Localización absoluta en el espacio de la superficie terrestre.
- Descripción de su forma bi o tridimensional y referencia respecto al sistema de coordenadas elegido.
- Información clasificadora y calificadora. Aspectos inherentes del objeto cartográfico
- Relaciones espaciales con los demás objetos de su entorno.

- Relaciones topológicas

Los elementos de una cobertura no constituyen entidades independientes, sino que existen dentro de un espacio y entre los mismos existen ciertas relaciones de tipo espacial que se denominan relaciones topológicas, y de cuyo formal estudio se encarga la topología.

Las relaciones topológicas indican al sistema cómo las entidades espaciales están relacionadas unas con otras para formar los mapas en términos de relaciones.

- Límite de percepción visual

El límite de percepción visual se define como la distancia mínima que es capaz de ver el ojo humano y toma un valor de 0.0002 metros.

2.7.3. Estructura de base de datos para un SIG

En función del modelo de datos implementado en cada SIG, podemos distinguir dos grandes grupos de Sistemas de Información Geográfica: SIG Vectoriales y SIG Raster. Los SIG vectoriales utilizan vectores (básicamente líneas), para delimitar los objetos geográficos, mientras que los raster utilizan una retícula regular para documentar los elementos geográficos que tienen lugar en el espacio. Ver figura 2.11.

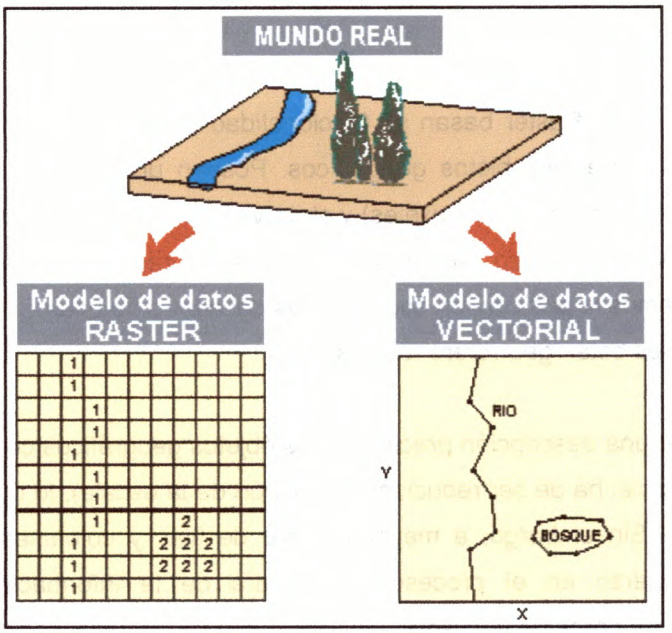

Figura 2.11. Representación de modelos de datos Raster y Vectorial.
[www.recursos.gabrielortiz.com]

Los SIG Vectoriales

Son aquellos Sistemas de Información Geográfica que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico. Con un par de coordenadas y su altitud definen un punto geodésico, con dos puntos generan una línea, y con una agrupación de líneas forman polígonos.

Entre los métodos para formar topología vectorial se encuentra la topología arco-nodo; Esta topología basa la estructuración de toda la información geográfica en pares de coordenadas, que son la entidad básica de información para este modelo de datos. Con pares de coordenadas (puntos) forma vértices y nodos, y con agrupaciones de éstos puntos forma líneas, con las que a su vez puede formar polígonos. Básicamente esta es la idea, muy sencilla en el fondo.

Para poder implementarla en un ordenador, se requiere la interconexión de varias bases de datos a través de identificadores comunes. Estas bases de datos, que podemos imaginarlas como tablas con datos ordenados de forma tabular, contienen columnas comunes a partir de las cuales se pueden relacionar datos no comunes entre una y otra tabla.

En general, el modelo de datos vectorial es adecuado cuando trabajamos con objetos geográficos con límites bien establecidos, como pueden ser fincas, carreteras, etc.

Los SIG Raster

Los Sistemas de Información Raster basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos. Poseen una retícula o malla regular de pequeñas celdas (a las que se denomina pixeles) y atribuyen un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Dado que la malla es regular (el tamaño del pixel es constante) y que conocemos la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los pixeles están georreferenciados.

Lógicamente, para tener una descripción precisa de los objetos geográficos contenidos en la base de datos el tamaño del pixel ha de ser reducido (en función de la escala), lo que dotará a la malla de una resolución alta. Sin embargo, a mayor número de filas y columnas en la malla (más resolución), mayor esfuerzo en el proceso de captura de la información y mayor costo computacional a la hora de procesar la misma.

No obstante, el modelo de datos raster es especialmente útil cuando tenemos que describir objetos geográficos con límites difusos, como por ejemplo puede ser la dispersión de una nube de contaminantes, o los niveles de contaminación de un acuífero subterráneo, donde los contornos no son absolutamente nítidos; en esos casos, el modelo raster es más apropiado que el vectorial.

2.7.4. Herramientas de software idóneas para una caracterización geotécnica.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta que nos permite obtener la representación en un soporte informático de un espacio geográfico. Los SIG se clasifican como se ha mencionado en el apartado anterior en dos grandes grupos: tipo vectorial y tipo raster o matricial. La diferencia entre ambos es clara, en el tipo vectorial se trabaja con líneas que crean polígonos, con el tipo raster se trabaja con una matriz para representar el terreno. En cada celda de esta matriz se contendrá la información para ese espacio de terreno. Un ejemplo de SIG vectorial es ARC-INFO y de tipo matricial GRASS, aunque ambos poseen sistemas de conversión de un tipo

a otro. Además el programa ERDAS IMAGINE que se utiliza para el tratamiento de imágenes de satélites o fotografías aéreas.

ARC-INFO

ARC/INFO es un conjunto integrado de programas especializados en el manejo de la información geográfica. Fue diseñado para la captura, análisis, consulta y representación de datos espaciales por ESRI como un sistema abierto y programable que constituye una gran ayuda para la gestión medioambiental y la planificación rural y urbana.

Permite integrar los datos espaciales con bases de datos externas como ORACLE, Dbase, etc. Además realiza un manejo ágil de los datos cartográficos pudiendo importar y exportar información desde formatos vectoriales como DXF y raster como GRASS o ERDAS.

GRASS

GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) es un Sistema de Información Geográfica que trabaja con ficheros tipo raster. Las primeras versiones fueron realizadas por el cuerpo de ingenieros de la armada americana y en la actualidad es la Baylor University la que lo está desarrollando. Hasta hace poco tiempo la versión mas actual era la GRASS 4.1 que contenía aproximadamente 40 programas para el tratamiento de imágenes, 60 para la manipulación de ficheros raster y otros muchos para la manipulación y procesamiento de imágenes.

La nueva versión de GRASS es la 4.2.1. posee algunos módulos mas que su versión anterior e incluye un entorno gráfico que es de gran utilidad sobre todo para usuarios no experimentados en GRASS.

Son múltiples las herramientas que GRASS 4.2 posee, entre las que podemos destacar:

- Análisis y modelización de información aplicada a cuencas, erosión, medioambiente, agricultura, uso y manejo del suelo, producción, etc.

- Análisis Raster aplicado a sistemas expertos, análisis de superficies, generación de cuencas, etc.

- Procesamiento de imágenes aplicado a la generación de histogramas, rectificación de imágenes, corrección radiométrica, rectificación fotográfica, etc.

- Análisis de Modelos digitales de elevaciones: Estudio de aspectos, pendientes, etc.

Existen módulos adicionales para el estudio de la erosión, análisis de la estructura del paisaje, transporte de sedimentos, análisis de cuencas y flujo y de predicción de incendios forestales.

ERDAS IMAGINE

Erdas Imagine es un paquete destinado al tratamiento de imágenes de satélite o fotografías aéreas. También puede ser utilizado como un Sistema de Información Geográfica de tipo raster, aunque no es su principal aplicación.

Las herramientas mas importantes que se destacan dentro de la aplicación son los siguientes:

- Virtural Viewing: permite la visualización de simples o múltiples niveles de una imagen, así como diversas transformaciones sobre dicha imagen.

- Image Enhancement: diversas herramientas para realizar contrastes, selección de colores, filtrado por convolución y análisis de principales componentes.

- Spatial Modeler: operaciones diversas para realizar modelos y todo tipo de funciones algebraicas con imágenes. Todo ello, con una interfase muy amigable con el usuario a través del lenguaje natural.

- Rectification: geo-referenciación de imágenes usando mapas u otras imágenes, mediante la localización interactiva de puntos de control, y a través de operaciones sobre una matriz de transformación, pudiendo utilizar hasta un polinomio de grado diez.

- Map Composer: crea mosaicos de imágenes con texto, bordes, barras de escala y otras opciones. Permite salida a plotters e impresoras de colores.

- Import/Export Files: conversión de niveles hacia y desde formato ERDAS 7.5 (para versiones anteriores). También tiene la posibilidad de otros tipos de formatos: TIFF, GIS, ANT, GRID.

ARC-VIEW

ArcView permite integrar herramientas de análisis tradicional con información geográfica en mapas visuales. La geocodificación permite conocer automáticamente la situación de cada plano lo cual permite detectar rápidamente los errores.

Los mapas pueden ser instantáneamente actualizados gracias a un intuitivo interfase gráfico que proporciona Arc View. Además permite añadir imágenes, sonidos y videos a los mapas.

ArcView permite analizar la información de múltiples modos. Se pueden combinar información de diferentes capas y encontrar lugares donde unas características particulares coincidan. Este programa tiene un completo entorno de realización de mapas con el cual fácilmente se pueden realizar mapas. Así el programa proporciona una completa colección de tipos de letra y símbolos y además proporciona clasificaciones automáticas de información, gráficos de negocios, etc.

Este programa permite actualizar antiguos planos o crearlos nuevos digitalizándolos o escaneandolos.

ArcView permite la lectura de los mapas de datos de múltiples formatos como los procedentes de ARC/INFO, AutoCAD (DXF y DWG) o Micro Station (DGN). Además puede abrir imágenes con extensión TIFF, JPEG, EPS, BMP, GIF y muchas otras. Puede usar directamente las tablas de datos en formato ASCII, Oracle, dBASE, INFO, ACCESS, FoxBase, SQL Server, y otras muchas.

Por último ArcView permite un avanzado análisis espacial con el cual se puede realizar múltiples estudios. Se pueden crear buffers basados en una distancia especificada o en un atributo, se puede unir información de un nivel a otro, se puede seleccionar información interactivamente o explícitamente basado en el criterio del usuario, superponer niveles de información para crear una nueva información, etc.

Este software es el que se utilizará para el procesamiento de los datos y mapas del trabajo, dada su capacidad para leer mapas en formatos múltiples y su facilidad para aprender a utilizarlo en corto tiempo.