



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN EL RELLENO
SANITARIO DEL KM 22 CARRETERA CA-9 AL PACÍFICO**

Paula Alejandra Reyes Hernández

Asesorado por el MSc. Ing. Alberto José Pérez Zarco

Guatemala, julio de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN EL RELLENO
SANITARIO DEL KM 22 CARRETERA CA-9 AL PACÍFICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

PAULA ALEJANDRA REYES HERNÁNDEZ

ASESORADO POR EL M.SC. ING. ALBERTO JOSÉ PÉREZ ZARCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Juan Merck Cos
EXAMINADOR	Ing. Luis Gregorio Alfaro Véliz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL TALUD EN EL RELLENO SANITARIO DEL KM 22 CARRETERA CA-9 AL PACÍFICO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 4 de septiembre de 2019.

Paula Alejandra Reyes Hernández

Ref. EEPFI-374-2020
Guatemala, 05 de marzo de 2020

Director
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Escuela de Ingeniería Civil
Presente.

Estimado Ing. Aguilar:

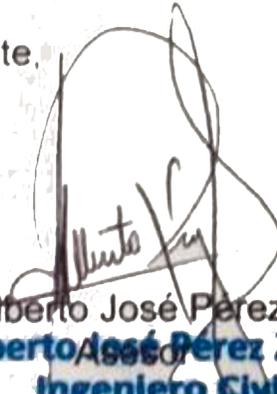
Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN EL RELLENO SANITARIO DEL KM 22 CARRETERA CA-9 AL PACÍFICO**, presentado por la estudiante **Paula Alejandra Reyes Hernández** carné número **199812165**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica.

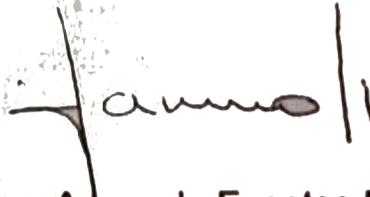
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular,

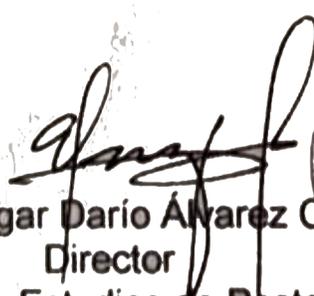
Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Alberto José Pérez Zarco
Alberto José Pérez Zarco
Ingeniero Civil
Colegiado 5701


Mtro. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Área
De Infraestructura




Mtro. Edgar Darío Álvarez Cott
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

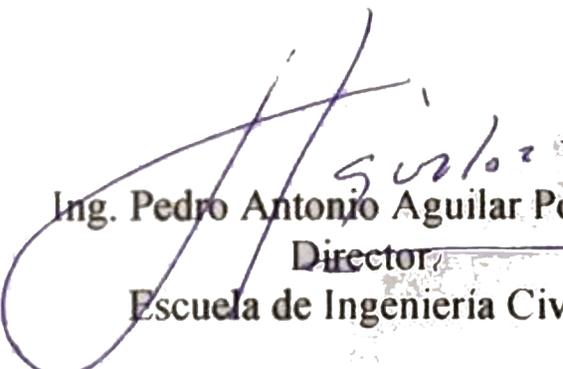
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



EEP-EIC-011-2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN EL RELLENO SANITARIO DEL KM 22 CARRETERA CA-9 AL PACÍFICO**, presentado por la estudiante universitaria Paula Alejandra Reyes Hernández, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

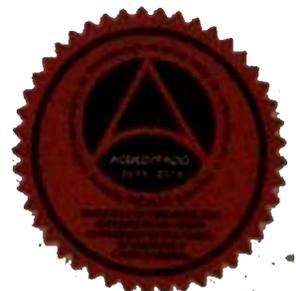
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Director
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, marzo de 2020

Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua





DTG. 152.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN EL RELLENO SANITARIO DEL KM 22 CARRETERA CA-9 AL PACÍFICO**, presentado por la estudiante universitaria: **Paula Alejandra Reyes Hernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, julio de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por la vida y permitirme alcanzar tan anhelado triunfo.
Mis padres	Leonel Reyes y Aura de Reyes. Por su amor y apoyo incondicional, brindado toda la vida.
Mi esposo	Mario Vinicio Rivas, por su amor y por ser mi fuente de inspiración.
Mis hermanas	María José y Lourdes Reyes. Por el amor y respeto que nos une.
Mis abuelos	Petronila Soto, Pablo Hernández, Esther Ochoa y Miguel Reyes. Por su amor y ejemplo al trabajo. Eterno descanso en la mansión celestial.
Mis tíos y tías	Por ser una importante influencia en mi carrera.
Mis suegros	Cristina de Rivas y Mario Rivas. Con cariño y respeto.
Mis primos	Con gran afecto.

Mis sobrinos

Con cariño y afecto.

Mis cuñados

Por su cariño y respeto.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y gran inspiración.
Facultad de Ingeniería	Por albergarme en sus aulas y ser parte de mi conocimiento.
Mis amigos de la Facultad	Por su amistad y compañía. En especial a Jacobo Morales, Percy Palacios y José Villatoro.
Asesores	Ing. Juan Merck por intachable labor como docente y apoyo incondicional y el Ing. Alberto Pérez por compartir su conocimiento
Mis amigos	Por su lealtad y gratos momentos compartidos. Gracias.
Amigos ingenieros	Por su ayuda y apoyo en este trabajo. Especialmente al Ing. Vicente Jo, Ing. Héctor Monzón e Ing. Efraín Aguilera.

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
4. JUSTIFICACIÓN	15
5. OBJETIVOS	17
6. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	19
7. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES	21
7.1. Tipos de taludes	21
7.1.1. Talud artificial	22

7.1.2.	Ladera natural	22
7.2.	Partes de un talud	23
7.2.1.	Altura	23
7.2.2.	Pie de talud	24
7.2.3.	Cabeza o escarpe	24
7.2.4.	Altura de nivel freático	24
7.2.5.	Pendiente	24
7.3.	Tipos de movimiento de un talud	24
7.3.1.	Desprendimientos	25
7.3.2.	Deslizamientos	26
7.3.3.	Volcamientos o volteo	27
7.3.4.	Flujos	28
7.3.5.	Desplazamientos	29
7.3.6.	Fenómenos complejos	30
8.	FACTORES GEOLÓGICOS, GEOMÉTRICOS, HIDROLÓGICOS GEOTÉCNICOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL TALUD	31
8.1.	Factores geológicos	31
8.2.	Factores geométricos y topográficos	32
8.3.	Factores hidrológicos	32
8.4.	Factores geotécnicos	33
8.4.1.	Factor de seguridad	33
8.4.4.1.	Factores y criterios para elegir el factor de seguridad	34

9.	FACTORES QUE PRODUCEN FALLAS DE ESTABILIDAD Y DESLIZAMIENTO	35
9.1.	Factores condicionantes	35
9.2.	Factores desencadenantes	36
10.	SUELOS	37
10.1.	Propiedades geotécnicas del suelo	38
10.1.1.	Origen de las rocas	38
10.1.1.1.	Rocas ígneas	38
10.1.1.2.	Rocas metamórficas	39
10.1.2.	Granulometría	40
10.1.2.1.	Gravas	40
10.1.2.2.	Arena	41
10.1.2.3.	Limos	41
10.1.2.4.	Arcillas	41
10.2.	Propiedades físicas del suelo	42
10.3.	Sistema de clasificación de suelos	42
10.3.1.	AASHTO	42
10.3.2.	Sistema unificado	43
11.	ENSAYOS PARA SUELOS	45
11.1.	Ensayo de granulometría	45
11.2.	Ensayo de límites	46
11.2.1.	Ensayo de límite líquido	46

11.2.2.	Ensayo de límite plástico	47
11.3.	Ensayo de corte directo	48
11.4.	Ensayo SPT	49
11.5.	Ensayo triaxial	50
11.6.	Ensayo CBR	51
11.7.	Ensayo Proctor standard	52
12.	MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DE ESTABILIDAD	55
12.1.	Método Morgenstern-Price	56
12.2.	Aplicaciones en programas de computadora	57
13.	OBRAS DE MITIGACIÓN	59
13.1.	Soil nailing	59
14.	HIPÓTESIS.....	61
15.	PROPUESTA DE ÍNDICE GENERAL.....	63
16.	METODOLOGÍA.....	69
17.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	71
18.	CRONOGRAMA	73

19.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	75
20.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Tipos de taludes.....	23
2.	Desprendimientos	26
3.	Deslizamientos rotacionales.....	27
4.	Deslizamientos traslacionales	27
5.	Volcamientos.....	28
6.	Tipos de flujos	29
7.	Desplazamientos laterales	30
8.	Formación de suelos	37
9.	Rocas ígneas	39
10.	Rocas metamórficas.....	40
11.	Gráfica de plasticidad.....	44
12.	Granulometría de partículas.....	46
13.	Cuchara de Casagrande	47
14.	Prueba del límite plástico	48
15.	Diagrama de un arreglo de corte directo	49
16.	Ensayo de penetración standard SPT	50
17.	Diagrama de un equipo de prueba de triaxial.....	51
18.	Equipo para el ensayo de CBR	52
19.	Equipo para la prueba de Proctor standard	53
20.	Métodos para aumentar el coeficiente de seguridad de taludes en suelos	56

TABLAS

I.	Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO	43
II.	Simbología del sistema unificado.....	44
III.	Cronograma.....	73
IV.	Presupuesto.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
FS	Factor de seguridad
km	Kilómetro
m	Metro
mm	Milímetro
pulg	Pulgadas

GLOSARIO

AASHTO

Por sus siglas en inglés American Association of State Highway and Transportation Officials, Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes es un órgano que establece normas públicas, especificaciones, hace pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de autopistas en todos los Estados Unidos.

ACI

Por sus siglas en inglés American Concrete Institute, Instituto Americano del Concreto es una organización sin fines de lucro de educación técnica para la sociedad fundada en 1904 y es una de las autoridades líderes mundiales en el manejo y práctica del concreto.

AGIES

Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, es una entidad privada no lucrativa, cultural, académica, gremial formativa y científica que promueve la investigación y divulgación de conocimientos científicos y tecnológicos en el campo de las estructuras, la sismología y áreas afines, así como el mejoramiento de los niveles docentes y profesionales en dichos campos, y el mejor y mayor uso de los recursos materiales y humanos conexos con el mismo.

Calicatas

Son una de las técnicas de prospección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico, estudios edafológicos o pedológicos de un terreno. Son excavaciones de profundidad pequeña a media, realizadas normalmente con pala retroexcavadora.

COCODES

Consejos Comunitarios de Desarrollo Urbano y Rural pertenece al Sistema Nacional de Consejos de Desarrollo de Guatemala, el cual es de creación constitucional. Esta entidad reúne a varios representantes de los distintos sectores de la población, en donde, se representa la participación de la población en general, es decir, tanto social como económicamente.

**Depósitos
piroclásticos**

Son producidos por la fragmentación del magma y de la roca encajante durante las erupciones explosivas. Dentro de estos depósitos se encuentran tres tipos de componentes: fragmentos de magma y de cristales (fragmentos esenciales o juveniles), y fragmentos líticos derivados de las paredes del conducto (fragmentos accidentales) o de partes solidificadas del magma (fragmentos accesorios).

Enlaces covalentes

Reacción entre dos átomos no metales. Se produce cuando existe una electronegatividad polar.

Estereofalsillas	Es una proyección estereográfica es un sistema de representación gráfico en el cual se proyecta la superficie de una esfera sobre un plano mediante un conjunto de rectas que pasan por un punto o foco. El plano de proyección es tangente a la esfera o paralelo a este y el foco es el punto de la esfera diametralmente opuesto al punto de tangencia del plano con la esfera.
Exudación	Forma en la que una parte del agua tiende a subir a la superficie del suelo o roca.
Extrusión	Afloración del magma a la superficie terrestre.
Gaviones	Es una caja rellena de piedra con un enrejado metálico de malla o a veces arena y tierra para el control de la erosión.
GEO5	Es un conjunto de software, que proveen soluciones para la mayoría de las tareas geotécnicas.
Heterogéneo	Es aquello que está compuesto de partes de distinta naturaleza.
IGN	Instituto Geográfico Nacional, Ing. Alfredo Obiols Gómez es una dependencia del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; de carácter técnico científico, rector, proveedor de productos y servicios que elabora y garantiza la información geográfica y cartográfica confiable para la

investigación, planificación y monitoreo para el desarrollo del país a nivel público y privado.

Infrayacente

Son rocas que pueden haber sido erosionadas, plegadas o incluso metamorfizadas, antes de que se vuelva a producir la sedimentación, originando un proceso de deposición con discordancias para los estratos superiores.

Insivumeh

Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología es una organización científica del gobierno de Guatemala que fue creado para estudiar y monitorear fenómenos y eventos atmosféricos, geofísicos e hidrológicos, sus riesgos para la sociedad, y ofrecer información y recomendaciones al gobierno y el sector privado en la ocurrencia de un desastre natural.

Licuefacción

Es el comportamiento de suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas circunstancias pasan de un estado sólido a un estado líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado.

Litológico

La litología es la parte de la geología que estudia a las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas. Incluye también su composición, su textura, tipo de transporte, así como su composición

mineralógica, distribución espacial y material cementante.

Lixiviados

Son líquidos que se forman como resultado de pasar o “percolarse” a través de un sólido. El líquido va arrastrando distintas partículas de los sólidos que atraviesa. Estos residuos suelen ser inertes, esto es que no son solubles ni combustibles, ni biodegradables.

NSE

Norma de Seguridad Estructural.

Presión intersticial

Es la presión del agua en los poros del suelo.

RESUMEN

En la actualidad, se lleva a cabo un ordenamiento dentro del relleno sanitario ubicado en el km 22 carretera al Pacífico, en el cual, por falta de planificación de obra civil como zanjas, drenajes, taludes y la topografía, se ha notado últimamente que los impactos y vibraciones al paso del tráfico y aguas pluviales que escurren sobre el muro de tierra están provocando el deterioro y desestabilidad del talud.

El presente diseño de investigación busca evaluar y demostrar los factores geológicos, geométricos, hidrogeológicos y geotécnicos a través de diferentes ensayos y topografía en campo que generen datos y parámetros, los cuales se procesan, analizan e interpretan en gabinete a través de programas y métodos buscando proponer diseño óptimo de estabilidad.

Al final se espera presentar una propuesta factible teóricamente y viable económicamente para lograr la estabilización del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico ante sus componentes heterogéneos.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de esta investigación es el fenómeno de la inestabilidad de taludes que es uno de los procesos geológicos más recurrentes en este país por su topografía. Por lo que se presenta el trabajo de investigación titulado: “Diseño de Investigación para la estabilización de talud en el relleno sanitario del Km 22 Carretera CA-9 Al Pacífico”.

Las características y heterogeneidad de los residuos depositados influyen en el comportamiento geotécnico y los deslizamientos de tierra ocurren generalmente provocados por algunos elementos importantes como los sismos, meteorización, lluvias y topografía que provocan la inestabilidad en los taludes, y es así como surge la inquietud de elaborar esta investigación, además de la importancia del área ya que no solo se protege el relleno sanitario sino la carretera de nivel internacional.

Para lo cual en la fase preliminar se presenta los antecedentes y marco teórico que son fuentes bibliográficas que sirven de base para el proceso de la investigación y metodología.

El siguiente capítulo inicia con la identificación y diagnóstico de la geológica y geotectónica de la zona de estudio regional y local. Aquí se trabaja la caracterización del talud a través de la identificación de los factores geológicos, geométricos, hidrogeológicos, su combinación y también los factores condicionantes y desencadenantes que provocan la inestabilidad del talud.

Por ser un estudio técnico y experimental se llevan a cabo los diferentes ensayos y estudios en laboratorio y campo bajo las normas establecidas y aprobadas en el medio (AGIES, AASHTO y ACI 318), para garantizar y dar credibilidad a los resultados, los cuales se presenta en este capítulo.

Con los resultados se procede al análisis e interpretación de estos para determinar y comprobar la hipótesis del estudio de que sea factible la estabilización del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico utilizando un método de estabilización como el de Morgenstern-Price.

Por último, se analiza la información global obtenida en campo y laboratorio para proponer una solución factible y efectiva de estabilización y que pueda aportar conocimientos más detallados y actualizados ya que por el uso de programas de computación como GEO5 u otro especializado en geotecnia puede obtenerse en menor tiempo la información y puede actuarse a tiempo como prevención logrando beneficios a nivel socioeconómico en el desarrollo del país.

Al final de la investigación se espera aportar nuevos conocimientos producto del análisis y de la experiencia adquirida ya en esta etapa.

2. ANTECEDENTES

A continuación, se presenta investigaciones de profesionales que servirá como referente a esta investigación que plantea lograr la estabilización del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico.

Por eso, se presenta el trabajo con el título *Caracterización geotécnica de los deslizamientos de taludes del km 18+900 al 19+600 de la ruta departamental 5 carretera a ciudad Quetzal, San Juan Sacatepéquez*, en la que elabora un análisis geotécnico, estudia las características de los taludes (ubicación, altura, tipo de suelo, pendiente, nivel freático, entre otros.), determina “las propiedades físicas y mecánicas (en laboratorio mediante ensayos predefinidos) para identificar el nivel de amenaza de cada talud” (Pérez, 2014, p. XV) y aportar información del área como: uso de la tierra y vegetación, hidrología, fallas geológicas, factores antrópicos y urbanos.

Se concluye que “para la elaboración de un estudio geotécnico es fundamental recurrir a fuentes de información como: mapas hidrológicos, geológico y topográficos otorgados por instituciones como el IGN e Insivumeh”, (Pérez, 2014, p. 103) sin ignorar la importancia de recopilar información mediante la comunidad afectada, ya sea la municipalidad en jurisdicción, Cocodes y los mismos pobladores, obteniendo datos relevantes como antecedentes de derrumbes en la zona, crecidas de ríos, precipitación pluvial, y que debido a que Guatemala es un país caracterizado por ser susceptible a movimientos telúricos muchas veces se requiere un análisis geológico y litológico como punto de partida. Se toma para esta investigación como una guía para identificar los

factores más importantes para la caracterización geotécnica del talud de estudio ya que presenta características similares.

Se analizó el trabajo sobre *Caracterización geotécnica y modos de falla estructural en el talud en roca del cerro Espinal Juliaca*, que para la investigación aplica el método de equilibrio límite, así como indica y relaciona la caracterización geotécnica con el modo de falla en el talud. Esta investigación determina el tipo de falla por medio del método de equilibrio límite y realiza el análisis de estabilidad “teniendo como resultados dos factores de seguridad en condición estática de 1.199 y para condiciones pseudoestáticas de 1.084, lo que significa que el talud se encuentra estable, pero muy cerca de la condición no estable”. (Valeriano, 2015, p. 111). Tomando en cuenta cada una de las características geológicas como litología, alteración, resistencia a la compresión simple, ángulo de fricción básico, presencia de agua medidos e identificados en campo y los modos controlados como la altura, pendiente y orientación del talud.

Por lo que recomienda que al tener “los valores generalizados de las características geotécnicas del talud se deba usar más análisis de estabilidad a través del método de equilibrio límite, pero en diferentes secciones longitudinales para obtener una mejor referencia de la estabilidad global del talud”. (Valeriano, 2015, p. 113).

En Cajamarca Perú fue presentado el trabajo para optar por el título profesional de Ingeniero geólogo llamado *Geotecnia de inestabilidad de taludes, en tramo de la carretera Huañimba - Cungunday, Cajamarca, Cajabamba*, la cual presenta que por “transitabilidad, precipitaciones e inadecuado manejo de

taludes existen dentro del tramos varias zonas críticas para lo cual se usa una evaluación geotécnica en esta investigación”. (Huamán, 2017, p. 1).

En todo el tramo los taludes son propensos fuertemente a procesos (erosión y meteorización) que generan alteraciones aportando a la inestabilidad del talud, para lo cual es necesario “definir los parámetros geomecánicos que servirán para realizar el análisis del factor de seguridad geotécnico en los taludes de la carretera y así relacionarlos con las características litológicas y morfoestructurales”. (Huamán, 2017, p. 4). Con estos datos desarrollar la metodología más adecuada para la modelación de taludes a partir de los parámetros evaluados y comparar las ventajas y limitaciones de los métodos.

Determinando así las estaciones inestables, para proponer a las autoridades locales y regionales medidas de mitigación inmediatas y a largo plazo un método de sostenimiento como shotcrete o gaviones, realizando siempre por seguridad vial un monitoreo constante en el tramo. Aquí muestra para esta investigación la importancia de definir los parámetros geomecánicos y a través de estos elegir el método más adecuado para la estabilización del talud en estudio.

Se consideró también el trabajo que se titula *Manual de procedimientos de ensayo de suelos y memoria de cálculo*, que explica que debe ponerse mucha atención a cada uno de los procedimientos para el desarrollo de infraestructura en proyectos de ingeniería civil para que cumplan con soluciones óptimas, seguras y confiables.

La variedad de características geológicas, topográficas y geomorfológicas de los suelos y rocas que existen actualmente son un reto diario de actualización de procesos activos como fallas y que se utilicen “pruebas en campo o laboratorio

para que la exploración del subsuelo se haga con mayor precisión y profesionalismo y bajo metodologías aprobadas y comprobadas”. (Botía, 2015, p. 16). Y bajo normativos nacionales e internacionales. Debido a esto presenta la metodología de los procedimientos de los diferentes ensayos de laboratorio.

En la cual presenta un esquema general de referencias, generalidades, objetivos, equipo, otros factores, procedimiento, cálculos, elementos de protección personal, informe y formato de toma de datos de los siguientes ensayos: “Humedad natural, peso unitario, límites (líquido y plástico), análisis granulométrico, gravedad específica, corte directo, ensayo CBR, ensayo Proctor modificado y clasificación de suelos según el sistema SUCS” (Botía, 2015, p. 18).

Aporta a esta investigación referencias generales de metodología de ensayos de laboratorio y campo (equipos, procedimientos y cálculos) que se realizarán en la fase de exploración en esta investigación y los cuales debe llevarse bajo normas para obtener los resultados más precisos.

Se refiere también el trabajo de ingeniería de minas sobre el *Estudio de factor de seguridad y caracterización geotécnica para la estabilidad del talud minado en concesión Sojo Piura, 2017*, en la que procesa la información recopilada a través de las investigaciones geotécnicas, ensayos de campo y laboratorio y se determine el factor de seguridad mínimo para la estabilidad del talud. Así que concluye que el uso de este “FS en los análisis de estabilidad proporciona dos previsiones importantes que son: consideración del margen de error entre parámetros empleados en el diseño y que puede existir realmente en el campo y limitar las deformaciones”. (Ardiles y Ahumada, 2018, p. 44).

Así como “los valores mínimos del factor de seguridad empleados en una investigación como límite inferior en el análisis de estabilidad pueden ser tomados los de referencia internacional si no existe normativa local”. (Ardiles y Ahumada, 2018, p. 8). Esta investigación aporta además de la caracterización del talud, el uso de un factor de seguridad mínimo que logra la estabilización del talud.

De igual manera se presentó en mayo el trabajo de grado de maestría en ciencias en ingeniería geotécnica de *Clasificación de Calidad de Roca con el método SLOPE MASS RATING SMR en un tramo de la ruta CA-9, para la identificación de taludes inestables y herramienta para estudio diagnóstico*, el cual explica que “hay métodos para determinar las discontinuidades en la roca como estereofalsillas, que correlaciona baja calidad de roca e identifica nuevas zonas con problemas de estabilización de taludes como método de predicción”. (Cacao, 2018, p. XI)

Además, describe que “las propiedades geológicas, geotécnicas y sus relaciones pueden presentarse a través de la elaboración de mapas multitemáticos” (Cacao, 2018, p. 87) y desde lo cual presenta que puede existir inestabilidad local cuando algunas propiedades naturales se relacionan con la estructura geológica.

Y a pesar de que en esta investigación no se caracteriza el talud como roca, se puede aplicar la representación gráfica de la inestabilidad del talud a través de los mapas multitemáticos.

De igual manera se consideró el trabajo de grado en Bogotá, Colombia que presenta la *Influencia de variación de parámetros de resistencia en obras de Estabilidad de Taludes*, que concluye que la variación de parámetros de

resistencia es relativamente alta principalmente para las cohesiones de los suelos lo que puede deberse a que “los métodos son estimativos en su mayoría y presenta desventajas y limitaciones; lo que no significa que los métodos sean inválidos, pero sí debe ser corroborados y ajustados con otro método” (Rodríguez y Peñuela, 2018, p. 25) de acuerdo con la experiencia, criterio y sentido común de los profesionales.

Para los casos del método probabilístico y los ensayos de laboratorio está claro que no basta con seleccionar una teoría de reconocimiento internacional, o ejecutar ensayos de laboratorio, si no se realiza una interpretación adecuada de los fenómenos de deslizamiento que tiene la zona, “los ensayos de laboratorio, las características del suelo encontrado y las posibles causas del movimiento y evidencia que la adecuada selección de parámetros influye en la factibilidad de ejecución de un proyecto”. (Rodríguez y Peñuela, 2018, p. 207)

Aquí demuestra la importancia de la clasificación del suelo y sus parámetros de resistencia como una parte importante para elegir el uso del método más adecuado de cálculo para lograr la estabilidad del talud, ya que al no hacer una buena interpretación de todos los factores que interviene en la inestabilidad del talud, se presente como un proyecto que tiene factibilidad en la etapa inicial pero que al ejecutarlo no pueda realizarse el proyecto.

Con relación a la estabilización de taludes se presenta el trabajo de grado titulado: *Análisis y propuesta para la estabilización de taludes en los depósitos piroclásticos de la Calzada la Paz, ciudad de Guatemala*, del cual interesa la metodología para identificar las posibles causas de fallas y deslizamientos en taludes y presenta la ventaja del uso del método de *soil nailing* por práctico en tiempo y espacio. En la calzada La Paz propone una solución rápida y viable para su estabilización. Se menciona dentro del contenido las ventajas y

desventajas de cada método, tomando en cuenta como factor primordial el económico.

Además de presentar criterios y lineamientos generales que permitan desarrollar un método constructivo o vegetativo. Y presenta que en una de las estaciones “el método de *Soil Nailing* es el más adecuado para la estabilización por ser el más práctico por tiempo y espacio para realizar el trabajo”. (Morales, 2015, p. 59). Los métodos analizados son estructurales y de bioingeniería, uno como complemento del otro.

Y recomienda que “para evitar la erosión es importante mantener o proporcionar buena cobertura vegetal, utilizar ángulos estables para pendientes de corte y relleno, proveer drenajes necesarios y adecuados”. (Morales, 2015, p. 65)

Apoyando la parte de análisis en la estabilización de taludes se encuentra del siguiente trabajo titulado *Análisis de la estabilidad global de un relleno reforzado con geosintético en la localidad de Llico*, que presenta como base el análisis a través de softwares como SLOPE/W o GEO5 la estabilidad estática y pseudoestática de un relleno y que cuando se requiera trabajar con o sin refuerzo de geomallas biaxiales.

En algunos casos especiales para “determinar parámetros geotécnicos es necesario realizar ensayos no drenados del subsuelo”. (González, 2017, p. II). Con esta información se puede determinar estratigrafía y factores de seguridad iniciales y finales para el uso de modelos como Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967).

De esta investigación interesa demostrar que “el uso de mallas o refuerzos con geosintéticos pueden aumentar a más del doble el factor de seguridad (FS) en condiciones estáticas de rellenos”. (González, 2017, p. 125). Y demuestra también el uso de software como una guía en los anexos. Concluye esta investigación que “la resistencia al corte, su comportamiento, los parámetros resistentes y la posición del nivel freático en los rellenos son factores de gran importancia para este tipo de análisis”. (González, 2017, p. 125).

Además, se recomienda que en futuras investigaciones se tomen en cuenta parámetros dinámicos.

Se sabe que también existen nuevos programas de software para la aplicación en los diseños de estabilización de taludes y se encuentra el trabajo de grado titulado *Estabilización de taludes aplicando el programa Geotécnico GEO&SOFT y aplicación práctica en talud de la Vía Pifo de Quito, Ecuador*, que compara los resultados obtenidos con el programa GEO & SOFT con métodos manuales de cálculo, concluyendo que “el programa “Geo&Soft” en su módulo (I.L.A.) no permite realizar un diseño de obras de contención de anclajes activos a un solo nivel por limitaciones del propio programa” (Mesías, 2018, p. 80) y que a pesar de esto, sus resultados no varían en mayor proporción con respecto a otros programas para análisis de protección de taludes.

Demuestra que “el método “*Bishop*” es el más acertado a la hora de analizar taludes en estado natural por su facilidad de cálculo y programación, el de “Morgenstern & Price” presenta mejores resultados analizando taludes con obras de contención”, (Mesías, 2018, p. 8) aunque su cálculo es más exigente. La importancia de esta investigación se basa en realizar el análisis del talud en un programa geotécnico y proponer alternativas de estabilización que sean factibles para presentar un diseño final y su estimación de costos.

Estos estudios tanto individual como en conjunto han evidenciado la importancia de conocer todos los factores internos y externos como la combinación entre estos que influyen en la inestabilidad de un talud. A pesar de que existen muchas fuentes de información y referencias teóricas en los medios, universidades y entidades de gobierno, es importante tener presente que, aunque esos datos existan es menester ir al lugar específico para la toma de datos y determinar los parámetros para usar en específico en el talud de estudio.

También es importante el uso de programas geotécnicos de computadora para comparar resultados con métodos manuales y así validar la información que se presenta para proponer alternativas de estabilización que sean factibles para realizar un diseño final óptimo en tiempo y costo.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La inestabilidad del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico es provocada por las vibraciones del paso del tráfico y aguas pluviales que escurren sobre el talud.

Por lo tanto, es importante resolver las siguientes interrogantes: ¿Es factible estabilizar el talud utilizando un método de estabilización en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico cuyos componentes son heterogéneos?

Y bajo esta premisa ¿Es necesario es conocer los factores geológicos, geométricos, hidrogeológicos y geotécnicos que influyen en la estabilización del talud del relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico? ¿Cuáles son los factores condicionantes (internos) y desencadenantes (externos) que influyen en la inestabilidad del talud del relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico? ¿Es posible caracterizar el talud del relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico?

4. JUSTIFICACIÓN

La importancia del presente trabajo de investigación en la estabilización del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico, se justifica porque debe corregirse el estado actual del talud que por factores como la vibración de los carros en la carretera y aguas pluviales escurriendo sobre el talud a falta de drenajes, actualmente se observa el desmoronamiento en los cortes de tierra que se ejecutaron al momento de construir y elegir el terreno para el relleno sanitario. En el momento de ejecución no se consideró ningún diseño de planificación y obra civil (zanjas, drenajes, taludes) y en la actualidad, se requiere un ordenamiento dentro del relleno sanitario, proyecto que pertenece a la autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán (AMSA).

En virtud de ello se debe evaluar y analizar en el presente estudio, los componentes del suelo para determinar qué factores internos y externos o su combinación debe considerarse para encontrar una metodología basada en la recopilación y análisis de datos obtenidos a través de laboratorios como de granulometría, límites, corte directo, corte triaxial, ensayo SPT y CBR para determinar sus factores, el uso de herramientas matemáticas o métodos ya aprobados como Morgenstern-Price para determinar el factor de seguridad, así como también nueva tecnología como los programas GEO5 o SLOPE/W que puede aplicarse efectivamente en esta área y tomarlo como un modelo de aplicación.

Esta investigación aportará a la labor académica más conocimientos del estudio geotécnico que se desarrolle en el área considerando que se presenta

componentes heterogéneos, como en un relleno sanitario, además de aportar conocimientos de aspectos técnicos y de diseño con las condiciones descritas anteriormente. A la vez trata de aplicar herramientas y mejores prácticas de ingeniería lo que podría servir como guía o consulta para futuras investigaciones.

Es importante cumplir con el objetivo de lograr la estabilidad del talud con una metodología práctica a través de un método que presente un diseño eficaz y factible que pueda aplicarse en el área con base a lo propuesto en esta investigación, que resguardará el funcionamiento del relleno sanitario, así como el de la carretera clasificada como de primer orden en Guatemala.

Se debe tomar en cuenta que también pueden darse eventos naturales que alteren el comportamiento del talud, como un sismo, por ejemplo y sugerir preparar la zona para disminuir los riesgos a través de medidas de mitigación y prevención para la seguridad de los empleados del relleno sanitario como los usuarios que pasan sobre la carretera.

5. OBJETIVOS

General

Proponer un método de estabilización del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico ante sus componentes heterogéneos.

Específicos

- Evaluar el talud para determinar los factores geológicos, geométricos, hidrogeológicos y geotécnicos, que influyen en la estabilización del relleno sanitario del km 22.
- Demostrar cuales son los factores que influyen en la inestabilidad del talud del relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico, por medio de ensayos de laboratorio y observación.
- Caracterizar el talud del relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico para determinar el diseño óptimo de estabilización.

6. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación busca evaluar la inestabilidad del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico, con base en los factores internos y externos que lo caracterizan y proponer el método más adecuado para su estabilización.

El nivel de investigación en cuanto a su carácter es de alcance explicativo, ya que al inicio se basa en observaciones y análisis para determinar diversos factores internos y externos que afectan el talud estudiado, buscando la causa a partir del efecto. Luego se lleva a cabo en una forma estructurada de recopilación y análisis de datos obtenidos a través de ensayos de laboratorio y campo, así como cálculos con herramientas matemáticas o métodos ya aprobados regulado bajo normas, para comprobar o no la hipótesis planteada. Se clasifica la investigación como experimental ya que manipula variables en condiciones controladas.

En la actualidad este tipo de investigaciones requiere experiencia para el uso y propuesta de una solución factible y óptima ya que la topografía y los factores que alteran la inestabilidad de taludes cada vez son más frecuentes y el uso de poblaciones al pie del talud o en la cabeza del talud aumenta por el poco control que se tiene en estos lugares.

El usuario más importante es AMSA ya que serían los encargados de llevar a cabo la ejecución del proyecto de estabilización del talud, según el diseño propuesto en esta investigación.

Con la colaboración de las municipalidades, especialmente la de Villa Nueva y Amatitlán porque la ubicación del relleno sanitario está en el límite de estos dos municipios y su área es influyente en gran parte de estos ya que colabora con la extracción de basura en estas comunidades. Otros usuarios importantes son Conred, Provia y el Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda para alguna toma de decisiones con respecto a alguna emergencia o un lugar con características similares.

Los beneficiarios son los trabajadores del relleno sanitario en el km 22 y usuarios de la carretera CA-9 ya que al estabilizar el talud se evita el soterramiento de personas y el cierre de una carretera centroamericana clasificada como de primer orden.

7. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

Dado el enfoque de la investigación que se presenta sobre estabilización de taludes, los factores internos y externos que influyen y la caracterización del talud, es importante conocer algunos conceptos como base del tema.

Con base en esto se debe contextualizar ¿Qué es un talud? Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente. (Suárez, 1998, p. 1)

Como es una pendiente o inclinación lo que se forma geoméricamente de allí la importancia de los movimientos de la masa de tierra o roca que pueda presentar un deslizamiento o desprendimiento.

7.1. Tipos de taludes

Estos también pueden clasificarse de la siguiente manera: talud artificial y talud natural. De los cuales se debe saber cómo se clasifica ya que de allí depende el tipo de solución que se pueda sugerir para lograr la estabilidad que se necesita al perder el equilibrio entre sus fuerzas internas y externas.

Las inestabilidades en las laderas, al igual que en los taludes excavados, se debe al desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, de tal forma que las fuerzas desestabilizadoras superan

a las fuerzas estabilizadores o resistentes. Este desequilibrio puede ser debido a una modificación de las fuerzas existentes o a la aplicación de nuevas fuerzas externas estáticas o dinámicas. (González, 2002, p. 623)

7.1.1. Talud artificial

Los taludes artificiales son formados por la participación del hombre para construir obras de ingeniería.

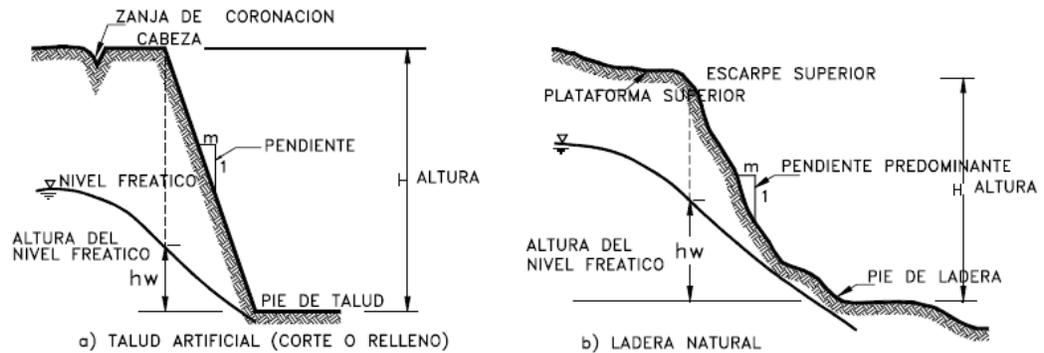
Los taludes artificiales de obras en tierra, donde hay selección de materiales, control de la construcción, colocación y compactación del suelo que los forma, se llega a una masa relativamente homogénea, en la cual el tipo de movimiento de falla es común, simple y definido. (Escobar y Duque, 2017, p. 173)

7.1.2. Ladera natural

Son taludes que por siglos y cambios en la superficie del relieve terrestre se han formado naturalmente.

En las laderas naturales la forma de la falla estará fijada por las condiciones geológicas, la resistencia de los materiales presentes y la geometría del talud; la multiplicidad de factores y su variabilidad, pueden llevar a situaciones muy complejas. (Escobar y Duque, 2017, p. 173)

Figura 1. Tipos de taludes



Fuente: Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.

7.2. Partes de un talud

Cuando se estudia un talud y ya se ha clasificado, se debe conocer como primer paso la geometría de este para caracterizarlo, y se pueden mencionar los siguientes elementos como partes de un talud:

7.2.1. Altura

Es una distancia que debe medirse verticalmente desde la parte superior del talud llamado cabeza de talud hasta la parte más baja de este llamado pie de talud como se indica en la figura anterior, de los cuales estos elementos del talud son mucho más fáciles de identificar en los taludes artificiales que en los naturales ya que por la intervención del hombre están mucho más definidos.

7.2.2. Pie de talud

Parte más baja del talud formado por el piso inferior y la pendiente del talud, que puede tener diferentes ángulos cerrados.

7.2.3. Cabeza o escarpe

Parte más alta de un talud formado por el piso superior y la pendiente del talud, que puede tener diferentes ángulos abiertos.

7.2.4. Altura de nivel freático

Sobre la altura del nivel freático se considera la medida vertical desde el pie del talud hasta donde se encuentre el agua ya sea superficial o internamente.

7.2.5. Pendiente

En un talud es la medida desde la cabeza del talud al pie del talud, la inclinación formada entre la cabeza de talud y pie del talud regularmente se mide en grados con respecto al pie del talud. Entre más vertical es el talud más probabilidad de tener inestabilidad se presenta. “Si la pendiente es lo suficientemente grande, puede ocurrir falla de la pendiente, es decir, la masa de suelo en la zona puede deslizarse hacia abajo”. (Braja, 2013, p. 334).

7.3. Tipos de movimiento de un talud

De acuerdo con la transformación que sufre el relieve terrestre ya sea por causa del hombre o la naturaleza la tierra tiende a moverse y por eso existen procesos de desplazarse, desprenderse o deslizarse los materiales como rocas

o suelos lo que provoca las diferentes configuraciones de taludes. Este tipo de procesos o modo de movimientos causados por diferentes factores pueden ser clasificados.

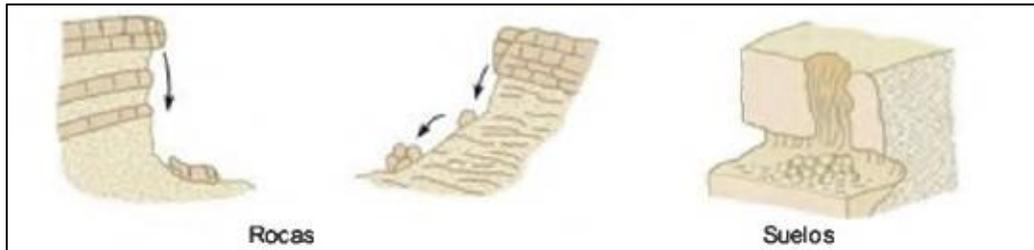
Los diferentes tipos de movimientos del terreno antes clasificados y definidos tienen su origen en factores naturales y/o humanos, por lo que la aparición de uno o más de estos influirá decisivamente en la disminución o pérdida de la resistencia al corte de los taludes. (Sanhueza y Rodríguez, 2013, p. 19)

“Existen varios tipos de clasificación, pero a continuación se presenta la clasificación de movimientos en masa propuesto por Varnes (1978)” (Suárez, 1998, p. 17), que tipifica los principales tipos:

7.3.1. Desprendimientos

Se puede describir como un movimiento producido por falta de apoyo en el terreno, puede darse con mucha rapidez y de los principales factores que provoca el movimiento es la erosión y los sismos. “Son frecuentes en laderas de zonas montañosas escarpadas, en acantilados y, en general, en paredes rocosas, siendo frecuentes las roturas en forma de cuna y en bloques formados por varias familias de discontinuidades”. (González, 2002, p. 628).

Figura 2. **Desprendimientos**



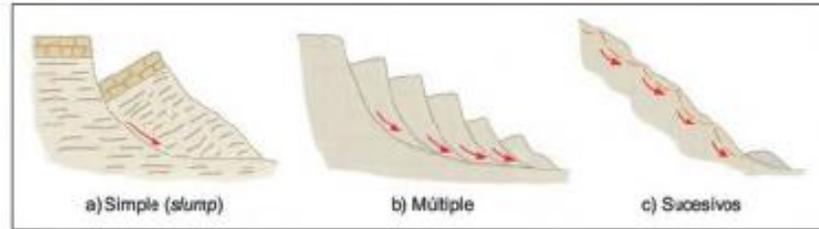
Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

7.3.2. **Deslizamientos**

Se puede describir como un proceso de corrimientos del terreno controlado por la gravedad. La velocidad puede ser muy variable pero la mayoría de las veces el movimiento es rápido y con mucho volumen del terreno. “Son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies”. (González, 2002, p. 623)

Estos deslizamientos se pueden dividir en deslizamientos rotacionales y traslacionales. En los deslizamientos rotacionales regularmente la superficie al fallar provoca una curva como se puede notar en la figura 3. “El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. Los deslizamientos rotacionales en suelos generalmente tienen una relación D_r/L_r entre 0.15 y 0.33 (Skempton y Hutchinson 1969)”. (Suárez, 1998, p. 17)

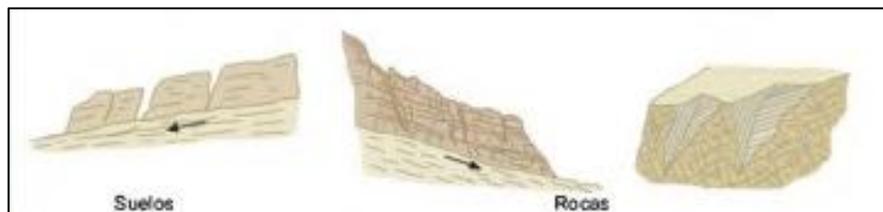
Figura 3. **Deslizamientos rotacionales**



Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

Y en el deslizamiento de traslación hace que la falla en la superficie el terreno se desplace hacia afuera o abajo y sea más plana. “Los movimientos traslacionales tienen generalmente, una relación D_r/L_r de menos de 0.1. En muchos deslizamientos de traslación la masa se deforma y/o rompe y puede convertirse en flujo”. (Suárez, 1998, p. 18).

Figura 4. **Deslizamientos traslacionales**



Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

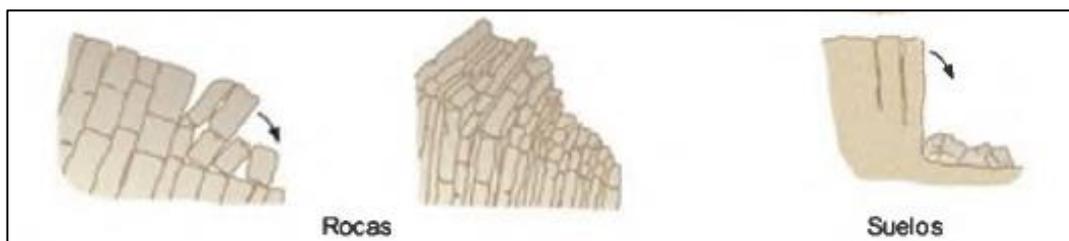
7.3.3. **Volcamientos o volteo**

Es un movimiento en el terreno que puede describirse como una rotación sobre su eje perdiendo la posición original hacia adelante o abajo. “Las fuerzas

que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos”. (Suárez, 1998, p. 14).

“Derivan en desprendimientos o deslizamientos según la geometría de la ladera. Pueden variar de extremadamente lentos (<16 mm/año) a extremadamente rápido, a veces acelerando durante el movimiento”. (Sieron, 2004, p. 12).

Figura 5. **Volcamientos**



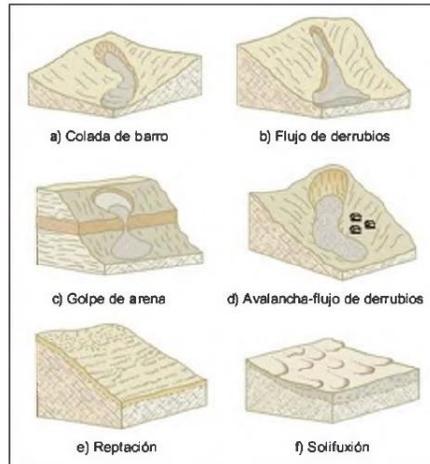
Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

7.3.4. **Flujos**

Este consiste en un movimiento de arrastre que se produce en el terreno cuando generalmente está saturado de agua, su movimiento puede ser lento o muy rápido.

Los flujos o coladas son movimientos de masas de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o debris flow) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. (González, 2002, p. 626)

Figura 6. Tipos de flujos



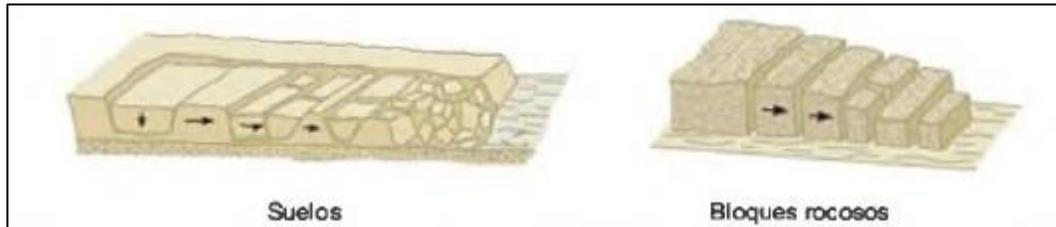
Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

7.3.5. Desplazamientos

Este movimiento puede describirse como un movimiento en el terreno que cambia de posición y se traslada de lugar en pendientes bajas se desplazan muy lentamente.

Este tipo de movimiento (denominado en algunas clasificaciones como extensión lateral o lateral spreading) hace referencia al movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado sobre un material blando y deformable. Los desplazamientos laterales también pueden ser provocados por licuefacción del material infrayacente, o por procesos de extrusión lateral de arcillas blandas y húmedas, bajo el peso de las masas superiores. (González, 2002, p. 629)

Figura 7. **Desplazamientos laterales**



Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

7.3.6. **Fenómenos complejos**

Estos movimientos en los taludes tienden a ser muy regulares, pero muchas veces se vuelven complejos cuando en algunos casos se crean combinaciones de dos o más de los movimientos presentados anteriormente, por eso en algunos casos se determinan otros conceptos de movimiento en base a la información y experiencia recopilada a través de los años.

Cuando se trata de fenómenos complejos, en los cuales hay involucrado más de un mecanismo, se utilizan nombres compuestos. Por ejemplo, una caída que continúa como flujo se denotará desprendimiento de bloque-flujo de detritos. (Sieron, 2004, p. 25)

8. FACTORES GEOLÓGICOS, GEOMÉTRICOS, HIDROLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL TALUD

Cuando se analiza un talud es importante determinar los factores geológicos, geométricos, hidrológicos y geotécnicos que influyen para mantener el equilibrio de fuerzas internas y externas que logran la estabilidad.

La geología, por ejemplo, define características o propiedades del talud, la geometría determina la forma del talud, la hidrología matiza el comportamiento del agua en el talud y la geotecnia determina la interacción de los elementos del talud.

A continuación, se presenta algunos conceptos de factores que influyen en este estudio:

8.1. Factores geológicos

Dentro de los factores geológicos se analiza el origen del suelo a partir la litología y sus características de formación. La estructura y discontinuidades que se presenta por medio de la estratigrafía y también la meteorización que se produce por alteraciones químicas y físicas modificando algunas características de los parámetros que influyen en la estabilidad como lo son los de resistencia y permeabilidad.

“La geología generalmente, define las características o propiedades del suelo o roca. La formación geológica determina la presencia de materiales duros

o de baja resistencia y las discontinuidades pueden facilitar la ocurrencia de movimientos a lo largo de ciertos planos de debilidad”. (Suárez, 1998, p. 36).

8.2. Factores geométricos y topográficos

La conformación topográfica del talud como se presentó anteriormente puede afectar solos o en conjunto la estabilidad del talud y para determinar la geometría y relieve del talud se usa la topografía que nos proporciona ángulos y distancias.

“La altura, pendiente, curvatura, largo y ancho, actuando en forma conjunta o separada, afectan la estabilidad de un talud, por cuanto determinan los niveles de esfuerzos totales y las fuerzas de gravedad que provocan los movimientos”. (Suárez, 1998, p. 35).

8.3. Factores hidrológicos

Conocer el agua en la tierra, su origen, distribución, movimientos y propiedades a través de su ciclo ayuda, ya que puede afectar el tiempo de concentración de la escorrentía superficial que va ligada a la infiltración por la ocurrencia de la lluvia. Así como también la temperatura que ejerce una influencia en el clima y la meteorización, para alterar el sistema.

Los cambios en el régimen de aguas se encuentran generalmente, relacionados con las lluvias y la hidrología superficial. Las precipitaciones máximas, mínimas, promedio, anuales, mensuales y diarias como su duración actúan como detonadores de movimientos en las laderas o taludes. (Suárez, 1998, p. 36)

8.4. Factores geotécnicos

La interacción interna de las partículas (cohesión, fricción, humedad, presión intersticial) y elementos que conforman el suelo se presenta en esta parte donde se puede mencionar la resistencia al corte.

“La resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior”. (Braja, 2013, p. 228).

8.4.1. Factor de seguridad

Establecer el FS en el análisis de la estabilización de un talud representa el grado de amenaza al que está expuesto en diferentes condiciones y es el ingeniero geotécnico el encargado de determinarlo.

Cuando FS sea igual a 1.00 el talud está en un estado de falla incipiente. Generalmente un valor de 1.40 como factor de seguridad con respecto a la resistencia es aceptable para el diseño de un talud estable. El valor mínimo del factor de seguridad aceptable en una ladera depende de varias circunstancias, que se pueden asociar con el tipo de talud. (Escobar y Duque, 2017, p. 169)

En muchos casos se espera que los ingenieros civiles realicen cálculos para comprobar la seguridad de los taludes naturales, taludes de excavaciones y terraplenes compactados. Este proceso, llamado análisis de estabilidad del talud, implica la determinación y la comparación del corte desarrollado a lo largo de la superficie de ruptura más probable con la resistencia del suelo al corte. (Braja, 2013, p. 334)

8.4.1.1. Factores y criterios para elegir el factor de seguridad

En Guatemala indica la norma NSE 2.1.7.4. “En condiciones estáticas el factor de seguridad para taludes temporales será superior a 1.35 y para taludes permanentes será superior a 1.50. Para condiciones sísmicas el factor de seguridad será igual o superior a 1.10 en todos los casos”. (AGIES, 2018, p. 7).

“En algunos lugares que deseen aplicar normas y no tengan un código específico como un valor mínimo de FS la AASHTO (2001) exige los siguientes factores de seguridad de estabilidad de taludes:

FS \geq 1.3 para cargas estáticas

FS \geq 1.1 para carga sísmica con K_h de 0.5 A”. (Suárez, 2009, p. 3)

“Estos factores, generalmente, varían desde 1.15 a 1.5 y es común especificar factores de seguridad de 1.3 para las cargas estáticas. (Suárez, 2009, p. 3).

9. FACTORES QUE PRODUCEN FALLAS DE ESTABILIDAD O DESLIZAMIENTO

Los factores condicionantes y desencadenantes como su combinación a través de fallas en la superficie hacen posible el movimiento del terreno y provoca inestabilidad. Para mantener el equilibrio en los taludes y un diagnóstico es primordial reconocer esos factores, algunos de estos con base en experiencia.

Los cortes, excavaciones y movimientos de tierra que se realizan en esas zonas sin asesoría técnica, los diseños inapropiados de estructuras muchas veces construidas con tecnologías inadecuadas y con materiales de mala calidad, así como la ausencia de redes para la evacuación de aguas residuales que se vierten directamente sobre el terreno, provocan erosión, debilitamiento e inestabilidades del terreno que desencadenan los movimientos de masas de suelo y rocas. (Cuanalo, Oliva y Gallardo, 2011, p. 46)

9.1. Factores condicionantes

Son factores internos que condicionan la situación de equilibrio de un talud, están dados por características y propiedades internas. Las que se pueden mencionar que influirán en la investigación serían las geométricas, litológicas, estratigráficas. “Los factores condicionantes dependen de las características intrínsecas de las laderas”. (Oliva y Flores, 2005, p. 708).

9.2. Factores desencadenantes

Son conocidos también como los de variables externas y se activan cuando provocan las fallas debido a una serie de condiciones que actúa sobre las características y propiedades del suelo. Entre las que influyen en esta investigación se menciona la lluvia (escorrentía superficial e infiltración), la actividad sísmica, la actividad volcánica reciente y la actuación antrópica.

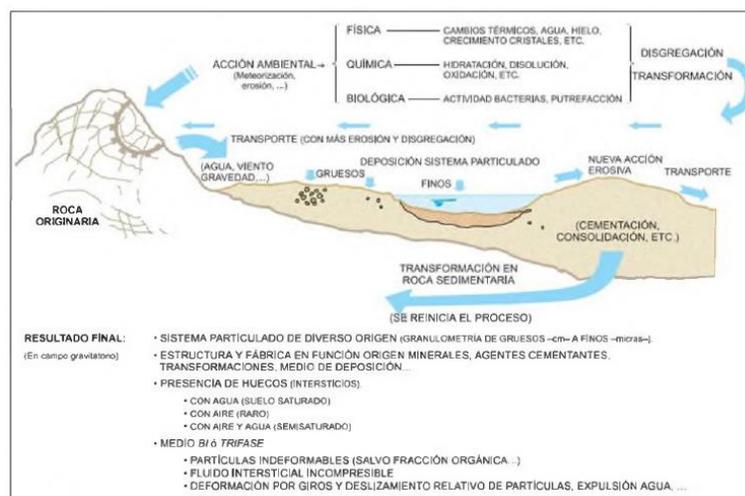
Los factores desencadenantes que influyen en la inestabilidad son debido a las condiciones climáticas regionales, por los eventos extremos y por el grado de impacto o deterioro ocasionado por las actividades del hombre. (Oliva y Flores, 2005, p. 708)

10. SUELOS

Se puede decir que el suelo es la capa superficial de la tierra formada por diferentes elementos como minerales, materia orgánica, aire, agua y que es producido por efectos de meteorización, así como por la acción de plantas y animales sobre la superficie.

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas: física, química y biológica. Todo ello da lugar a fenómenos de disgregación (alteración o meteorización) y transformación de la roca, creándose el perfil de meteorización. (González, 2002, p. 18)

Figura 8. Formación de los suelos



Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

10.1. Propiedades geotécnicas del suelo

Debido a elementos como la erosión, meteorización, intemperización en la superficie de los suelos estos forman una base sólida que ha sido visible a través del tiempo y ha evolucionado conforme al relieve que puede haber sido alterado por la naturaleza o el hombre según sus necesidades.

“Muchas de las propiedades físicas del suelo son dictadas por el tamaño, la forma y la composición química de los granos. Para entender mejor estos factores, uno debe estar familiarizado con los tipos de roca que forman la corteza terrestre”. (Braja, 2013, p. 16).

Por lo anterior es importante conocer el origen de las rocas que es una mezcla de elementos y de procesos químicos, biológicos y físicos durante los siglos, y que cambian por la acción del agua, del viento y los seres vivos principalmente.

10.1.1. Origen de las rocas

Con base en su origen, las rocas se dividen en tres tipos básicos: ígneas, sedimentarias y metamórficas. De las cuales para esta investigación se conceptualizará las ígneas y metamórficas que son las que influyen en el talud.

10.1.1.1. Rocas ígneas

Son llamadas también rocas volcánicas y se forman en las profundidades de la tierra se dividen en dos grupos: intrusivas y extrusivas. Las primeras ascienden por grietas, pero se mantienen subterráneas sin salir lo contrario que

las segundas que fluyen a través del magma hacia la superficie de la tierra en forma de lava y al enfriarse se forma las rocas.

“Las especies más comunes de esta categoría son los granitos, riolitas, garbos, basaltos, dioritas, andesitas, tobas, pómez, etc.” (Hoyos, 2012, p. 141).

Figura 9. **Rocas ígneas**



Fuente: Hoyos, F. (2012). *Geotecnia, diccionario básico*.

10.1.1.2. Rocas metamórficas

Son rocas eruptivas o sedimentarias transformadas por factores químicos, físicos y biológicos. Se transforman especialmente por grandes presiones y temperaturas.

“Las especies de rocas metamórficas más comunes incluyen cornubianas, esquistos, neises, mármoles y serpentinitas”. (Hoyos, 2012, p. 142).

Figura 10. **Rocas metamórficas**



Fuente: Ingeoexpert. (2019). *Rocas metamórficas: tipos y clasificación*. Recuperado de <https://ingeoexpert.com/2019/11/08/rocas-metamorficas-tipos-y-clasificacion/>

10.1.2. Granulometría

Es el proceso de clasificación o medición de los granos de suelo o roca y la distribución de los diferentes tamaños de las partículas. El objetivo es agrupar las partículas según su forma y su tamaño determinando la proporción relativa en peso, como a continuación:

10.1.2.1. Gravos

“Suelo con tamaño de grano entre unos 8-10 cm y 2 mm; se caracterizan porque los granos son observables directamente. No retienen el agua, por la inactividad de su superficie y los grandes huecos existentes entre partículas”. (González, 2002, p. 20).

10.1.2.2. Arena

“Suelo con partículas comprendidas entre 2 y 0,060 mm, todavía son observables a simple vista. Cuando se mezclan con el agua no se forman agregados continuos, sino que se separan de ella con facilidad”. (González, 2002, p. 22).

10.1.2.3. Limos

Suelos con partículas comprendidas entre 0,060 y 0,002 mm (algunas normativas indican que este último valor debe de ser 0,005 mm, pero no hay apenas consecuencias prácticas entre ambas distinciones). Retienen el agua mejor que los tamaños superiores. Si se forma una pasta agua-limo y se coloca sobre la mano, al golpear con la mano se ve como el agua se exuda con facilidad. (González, 2002, p. 22)

10.1.2.4. Arcillas

Suelo formado por partículas con tamaños inferiores a los limos (0,002 mm). Se trata ya de partículas tamaño gel y se necesita de transformaciones químicas para llegar a estos tamaños, unidas por enlaces covalentes débiles, pudiendo entrar las moléculas de agua entre las cadenas produciendo a veces, aumentos de volumen (recuperables cuando el agua se evapora) por eso se vuelve un material muy problemático. (González, 2002, p. 22)

10.2. Propiedades físicas del suelo

Cuando se trabaja un talud es esencial conocer propiedades y características del suelo, debe ser importantes determinarlos e identificarlos, entre los que se puede mencionar están: la porosidad, peso específico, densidad, plasticidad, permeabilidad y compresibilidad los cuales indican valores de parámetros que se usan en el proceso de cálculo.

10.3. Sistemas de clasificación de suelos

Por la variedad de partículas, características de los suelos y la transformación del relieve terrestre, se desarrolló a través de normativas internacionales métodos de clasificación para organizar y comprender sus propiedades. “Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar de forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas, sin una descripción detallada”. (Braja, 2013, p. 78).

En esta investigación por aplicación se presenta los siguientes:

10.3.1. AASHTO

“El Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO fue propuesto originalmente para el Highway Research Board’s Committee on Classification of Materials for Subgrades and Granular Type Roads (1945)”. (Braja, 2012, p. 18).

De acuerdo con el siguiente cuadro se clasifican los suelos por este método:

Tabla I. **Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO**

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-1			A-2			
	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10	50 máx						
Malla núm. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla núm. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Para la fracción que pasa							
Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (IP)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Clasificación de la capa	Excelente a buena						
Clasificación general	Materiales de limo y arcilla (más de 35% de la muestra total pasa la malla núm. 200)						
	A-4	A-5	A-6	A-7			
Análisis por mallas (% que pasa)							
Malla núm. 10							
Malla núm. 40							
Malla núm. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín			
Para la fracción que pasa							
Malla núm. 40							
Límite líquido (LL)	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín			
Índice de plasticidad (IP)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín			
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos				
Calificación subrasante	Regular a malo						

^aSi IP ≤ LL - 30, la clasificación es A-7-5.
^bSi IP > LL - 30, la clasificación es A-7-6.

Fuente: Braja, D. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*.

10.3.2. Sistema unificado

El Sistema unificado de clasificación de suelos (Unified Soil Classification System) lo propuso originalmente A. Casagrande en 1942 y más tarde lo revisó y adoptó el United States Bureau of Reclamation y el US Army Corps of Engineers. En la actualidad el sistema se utiliza prácticamente en todo el trabajo geotécnico. (Braja, 2012, p. 19)

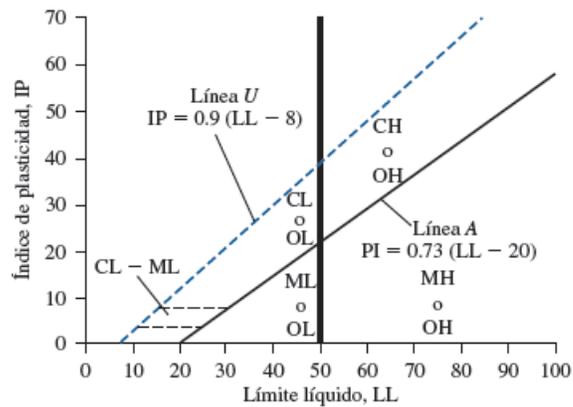
A continuación, se presentan los símbolos de este sistema:

Tabla II. **Simbología del sistema unificado**

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos orgánicos y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduado	Mal graduado

Fuente: Braja, D. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*.

Figura 11. **Gráfica de plasticidad**



Fuente: Braja, D. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*.

En esta investigación se usará el sistema unificado para la clasificación de los suelos.

11. ENSAYOS PARA SUELOS

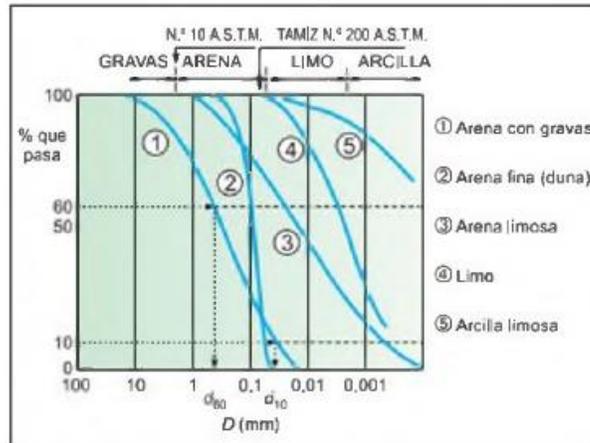
Durante el desarrollo de esta investigación se debe realizar varios ensayos para caracterizar y clasificar los suelos y así determinar los parámetros o factores que presenta el talud en estudio. Se mencionan los siguientes:

11.1. Ensayo de granulometría

Este ensayo en general permite la caracterización física del suelo, clasificando los tamaños de granos y agrupándolos, todo esto por medio de mallas o tamices. Cuando el suelo presenta homogeneidad el comportamiento no es bueno, al contrario, si presenta heterogeneidad es favorable en términos geológicos.

Con este ensayo se pueden determinar datos como coeficientes de uniformidad y curvatura, porcentaje de gravas, arenas y finos y curva granulométrica. Esta prueba cumple las Normas ASTM D-422, AASHTO T88.

Figura 12. **Granulometría de partículas**



Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

11.2. Ensayo de límites

En este ensayo es importante definir la consistencia de los suelos en función del contenido de agua para caracterizar su comportamiento. A continuación, se mencionan dos de los que se usan generalmente.

11.2.1. Ensayo de límite líquido

Este se determina como el porcentaje de humedad del suelo debajo del comportamiento plástico. Será un fluido viscoso si alcanza porcentaje de humedad mayor al límite líquido. Puede determinar datos de asentamiento, y para compactación máxima densidad.

Se usa regularmente un molde denominado Cuchara de Casagrande. El procedimiento para la prueba de límite líquido está dado por ASTM D-4318 y AASHTO T89-02.

Figura 13. **Cuchara de Casagrande**



Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

11.2.2. Ensayo de límite plástico

“Este se determina como la frontera entre el estado plástico y semisólido del suelo según Atterberg. Y este ayuda a determinar el índice de plasticidad que es la diferencia entre el valor de límite líquido y plástico”. (González, 2002, p. 22).

Si el índice es bajo con poco contenido de agua pasa a estado semisólido y si es alto necesita gran cantidad del agua para que se transforme.

“Se usa amasando suelo seco con poca agua y formando elipsoides, arrollándolos con la palma de la mano sobre una superficie lisa, hasta llegar a un diámetro de unos 3 mm y una longitud de 25-30 mm”. (González, 2002, p. 23). El procedimiento para la prueba de límite plástico está dado por ASTM D-4318 y AASHTO T90.

Figura 14. **Prueba del límite plástico**



Fuente: Braja, D. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.

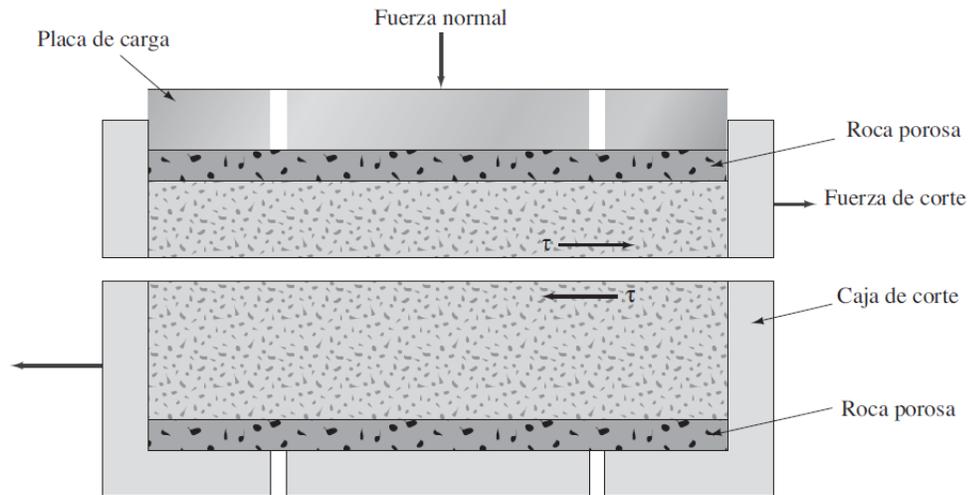
11.3. Ensayo de corte directo

“Este ensayo es uno de los más importantes para proyectos de estabilidad de talud ya que determina la resistencia al esfuerzo cortante, este impone dos esfuerzos uno vertical que induce un esfuerzo normal (presión) y otro horizontal que determina la cohesión y ángulo de fricción del suelo”. (Suárez, 1998, p. 93).

Es válido mencionar que por las variables y características se puedan cometer errores y obtener resultados erróneos así que debe ser un técnico capacitado y con experiencia.

De este ensayo se obtiene la gráfica esfuerzo normal vs esfuerzo de corte. En la figura se puede ver un diagrama de cómo se lleva a cabo el ensayo. El procedimiento para esta prueba está dado por ASTM D-3080-98 y AASHTO T236-3.

Figura 15. Diagrama de un arreglo de corte directo



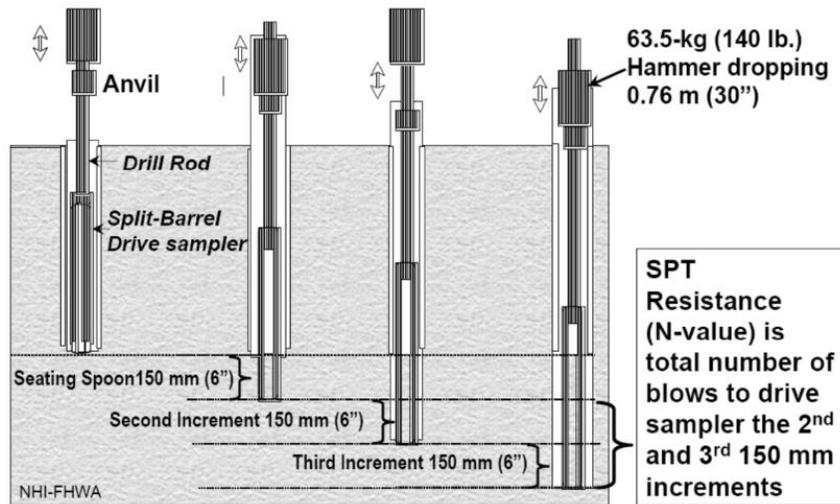
Fuente: Braja, D. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.

11.4. Ensayo SPT

Como lo indica su nombre es un ensayo de penetración para obtener información geotécnica del subsuelo y se practica in situ. La aplicación de este ensayo en solo en suelos arenosos. Es un método dinámico ya que contabiliza número de golpes en la muestra.

De este ensayo se obtiene la gráfica correlación entre el número de golpes, la compacidad y el ángulo de fricción interna. En la siguiente figura se puede observar un diagrama de cómo se lleva a cabo el ensayo. El procedimiento para esta prueba está dado por ASTM D-1586.

Figura 16. Ensayo de penetración *standard* SPT



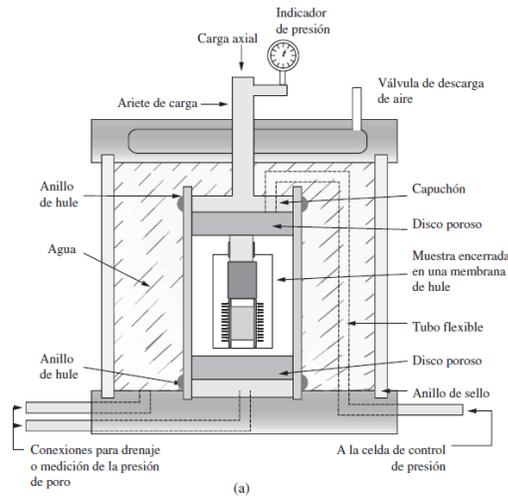
Fuente: Sfriso, A. (2018). *Ensayo SPT*.

11.5. Ensayo triaxial

“Es una de las pruebas que permite medir las propiedades mecánicas de los suelos y rocas y también determina los parámetros del esfuerzo cortante como los valores de cohesión y ángulo de rozamiento interno”. (Suárez, 1998, p. 89). Da resultados de alta confiabilidad para la estabilización de taludes, se necesita un técnico especializado y tener calibrados los equipos que se utilizaran.

De este ensayo se construye la gráfica del círculo de Mohr. En la figura se puede ver un diagrama de cómo se lleva a cabo el ensayo. El procedimiento para esta prueba está dado por ASTM D-4767 y ASTM D-2850.

Figura 17. Diagrama de un equipo de prueba triaxial



Fuente: Braja, D. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.

11.6. Ensayo CBR

Este método mide la resistencia al corte bajo condiciones de humedad y densidad controlada, normalmente analiza materiales con partículas de diámetro máximo de $\frac{3}{4}$ ". Este ensayo se vuelve clave en obras de infraestructura vial porque de él se obtiene un valor de penetración. Acrónimo de California Bearing Ratio. (Hoyos, 2012, p. 35)

De este ensayo se obtiene la curva de presiones de penetración, gráfica que muestra carga (PSI) vs penetración (pulg). Normalmente es una operación mecánica como lo muestra la figura 18. El procedimiento para esta prueba está dado por ASTM D-1883-07 y D-3080.

Figura 18. **Equipo para el ensayo de CBR**



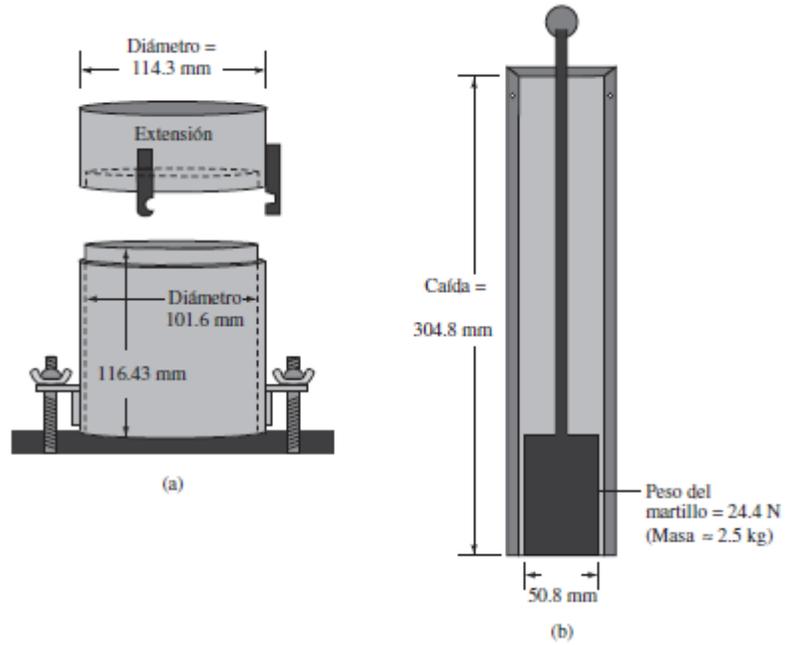
Fuente: Hoyos, F. (2012). *Geotecnia, diccionario básico*.

11.7. Ensayo Proctor standard

Este es un método de compactación produciendo una reducción de vacíos que varía según las características del suelo. Busca la relación de la humedad del suelo y el peso unitario seco. Se usa este ensayo en obras de rellenos y base para pavimento.

De este ensayo se obtiene la curva de compactación que presenta el gráfico contenido de humedad vs peso unitario. El procedimiento para esta prueba está dado por ASTM D-1557-00 y AASHTO T180-01.

Figura 19. **Equipo para la prueba de Proctor standard**



Fuente: Braja, D. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.

12. MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DE ESTABILIDAD

Cuando se ha caracterizado el talud y se tiene resultados de los diferentes ensayos que proporciona los parámetros, se debe elegir un método de análisis apropiado que permita encontrar la estabilidad del talud, y con esto proponer una solución factible y viable de protección al talud.

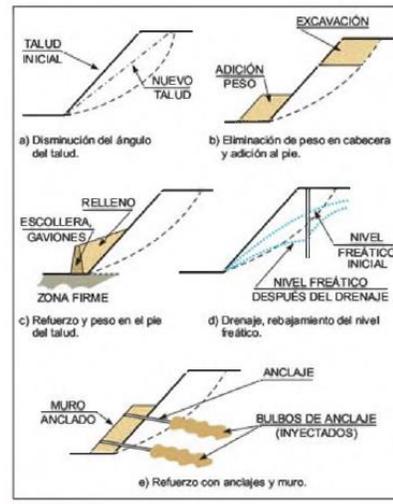
En la actualidad existen varios métodos que se tienen al alcance para determinar el FS y aplicarlo para lograr la estabilidad de un talud dentro de los cuales se puede mencionar el de Bishop, talud infinito, Jambú, Morgenstern-Price, etc. Los cuales se aplican por el tipo de falla o características del talud, pero también en algunos su aplicación es limitada por los parámetros que manejan.

“Las medidas estabilizadoras pueden consistir en:

- Modificación de la geometría del talud.
- Drenajes.
- Aumento de la resistencia del terreno mediante la introducción en el talud de elementos estructurales resistentes.
- Construcción de muros u otros elementos de contención”.

(González, 2002, p. 471)

Figura 20. **Métodos para aumentar el coeficiente de seguridad de taludes en suelos**



Fuente: González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.

Los análisis de estabilidad de taludes se pueden realizar mediante modelos de Equilibrio límite. Estos se basan en una serie de iteraciones que buscan un círculo de falla (en el caso de fallas circulares) o planos de falla (para fallas no circulares), al perder el equilibrio entre las fuerzas actuantes y resistentes del sistema. (Pérez, 2016, p. 1)

12.1. Método Morgenstern-Price (1965)

Para esta investigación se elige utilizar el método de Morgenstern-Price que utiliza relaciona fuerzas cortantes y fuerzas normales. Es un método que usa el equilibrio límite, es preciso y se trabaja por medio de dovelas, con la ventaja que no importa la forma de falla y puede trabajarse en varios paquetes de software.

“En general, este tipo de método considera las siguientes hipótesis:

- El FS asociado a un determinado talud, es constante para toda la superficie de falla.
- La resistencia al corte del suelo estudiado satisface el criterio de Mohr – Coulomb.
- Al momento de la falla la resistencia al corte del suelo se desarrolla con una magnitud constante en toda la superficie de rotura”.
(Sanhueza y Rodríguez, 2013, p. 21)

12.2. Aplicaciones en programas de computadora

Gracias al avance de la tecnología en la actualidad se puede encontrar varios programas para el cálculo de modelos geotécnicos, entre los que se puede mencionar el GEO5, STABLE, SLOPE/W, entre otros, algunos que son de uso gratuito y otros con licencia pero que permiten en forma fácil y rápida iterar parámetros y obtener análisis de resultados más exactos.

13. OBRAS DE MITIGACIÓN

En nuestro medio hay algunas soluciones efectivas que pueden utilizarse para lograr la estabilización de taludes, pero a veces resultan poco prácticas, poco económicas y factibles de aplicar por diversos factores. Entre las que se menciona micropilotes, estructuras de retención, geomallas, hidrosembados, *Soil Nailing*, entre otros, cada una con sus ventajas y desventajas de aplicación.

Para este estudio se elige trabajar el *Soil Nailing*, por ser un método versátil, flexible y adaptable a suelos heterogéneos.

13.1. Soil Nailing

Este se presenta como un método moderno con inclusiones (varillas corrugadas de acero) o refuerzos cementados en su superficie sobre el suelo y cubierto o revestido de concreto lanzado. Este tipo de estructura puede ser provisional o permanente. Se construye generalmente de arriba hacia abajo, y puede tener diferente geometría según el requerimiento del área.

“Este sistema es utilizado en taludes altos y áreas muy limitadas bajo un diseño conservador y soportes permanentes”. (Pérez, 2014, p. 1).

14. HIPÓTESIS

Es factible la estabilización del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico utilizando un método de estabilización.

Hipótesis nula:

No es factible la estabilización del talud en el relleno sanitario del km 22 carretera CA-9 al Pacífico utilizando un método de estabilización.

15. PROPUESTA DE ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

HIPÓTESIS

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

1. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

1.1. Tipos de taludes

1.1.1. Talud artificial

1.1.2. Ladera natural

1.2. Partes de un talud

1.2.1. Altura

1.2.2. Pie de talud

1.2.3. Cabeza o escarpe

1.2.4. Altura de nivel freático

1.2.5. Pendiente

- 1.3. Tipos de movimiento de un talud
 - 1.3.1. Desprendimientos
 - 1.3.2. Deslizamientos
 - 1.3.3. Volcamientos o volteo
 - 1.3.4. Flujos
 - 1.3.5. Desplazamientos
 - 1.3.6. Fenómenos complejos
- 2. FACTORES GEOLÓGICOS, GEOMÉTRICOS, HIDROLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL TALUD
 - 2.1. Factores geológicos
 - 2.2. Factores geométricos y topográficos
 - 2.3. Factores hidrológicos
 - 2.4. Factores geotécnicos
 - 2.4.1. Factor de seguridad
 - 2.4.4.1. Factores y criterios para elegir el factor de seguridad
- 3. FACTORES QUE PRODUCEN FALLAS DE ESTABILIDAD O DESLIZAMIENTO
 - 3.1. Factores condicionantes
 - 3.2. Factores desencadenantes
- 4. SUELOS
 - 4.1. Propiedades geotécnicas del suelo
 - 4.1.1. Origen de las rocas
 - 4.1.1.1. Rocas ígneas

- 4.1.1.2. Rocas metamórficas
 - 4.1.2. Granulometría
 - 4.1.2.1. Gravas
 - 4.1.2.2. Arena
 - 4.1.2.3. Limos
 - 4.1.2.4. Arcillas
 - 4.2. Propiedades físicas del suelo
 - 4.3. Sistema de clasificación de suelos
 - 4.3.1. AASHTO
 - 4.3.2. Sistema unificado
- 5. ENSAYOS PARA SUELOS
 - 5.1. Ensayo de granulometría
 - 5.2. Ensayo de límites
 - 5.2.1. Ensayo de límite líquido
 - 5.2.2. Ensayo de límite plástico
 - 5.3. Ensayo de corte directo
 - 5.4. Ensayo SPT
 - 5.5. Ensayo triaxial
 - 5.6. Ensayo CBR
 - 5.7. Ensayo Proctor standard
- 6. MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA EL DISEÑO DE ESTABILIDAD
 - 6.1. Método Morgenstern-Price
 - 6.2. Aplicaciones en programas de computadora
- 7. OBRAS DE MITIGACIÓN

7.1. Soil nailing

8. GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA

8.1. Información general

8.1.1. Información de la obra

8.1.1.1. Descripción

8.1.1.2. Colindancias

8.1.1.3. Sistema constructivo y clasificación

8.1.1.4. Nivel de protección

8.1.2. Información del entorno

8.1.2.1. Clima

8.1.2.2. Vegetación

8.1.2.3. Relieve

8.2. Información geológica

8.2.2. Marco geológico

8.2.2. Geomorfología

8.2.2. Geología local

9. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

9.1. Información geotécnica del terreno

9.1.1. Plan de exploración

9.1.1.1. Técnicas de exploración

9.1.1.2. Características de las obras
de exploración

9.1.2. Interpretación geotécnica del terreno

9.1.2.1. Modelo de la estructura del
terreno (estratigrafía)

9.1.2.2. Características de las unidades geotécnicas (ensayos de campo y laboratorio)

9.1.2.3. Microzonificación geotécnica del terreno

9.2. Consideraciones sísmicas para el diseño

9.3. Geometría del talud

9.1. Factor de seguridad

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1. Análisis de estabilidad (programa)

10.2. Método de estabilización

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICE

16. METODOLOGÍA

Este estudio es de carácter explicativo por lo que la metodología se basa en método científico de investigación para lo cual se observa, se toman los datos, se realiza el análisis con base a resultados que se interpretan.

En la primera fase se hará la recolección y recopilación de datos en gabinete y campo que consiste en el análisis de antecedentes del tema y de la zona de estudio a través de recopilación bibliografía lo que incluye teorías, estudios, diagnósticos, artículos, libros o mapas. Los cuales ayudan a encontrar las variables, indicadores o factores que debe evaluar y determinar para la comprobación del estudio. Así como también delimitar el alcance establecido.

En la siguiente fase se propone como principio el uso de topografía que determine la configuración geométrica, como instrumento de uso: el equipo topográfico y libreta de topografía para recopilación de datos y el programa de AutoCAD para la elaboración del plano de corte y elevación de los taludes.

Luego, caracterizar el talud, determinando los factores condicionantes y desencadenantes que influyen en este talud a través de ensayos como de granulometría, límites, corte directo, CBR, SPT y triaxial. Todas estas pruebas realizadas con el equipo y herramientas necesarias y bajo las normas y metodologías aprobadas. Proporcionando estos datos y parámetros (estratigrafía, granulometría, límites, entre otros) necesarios que requiera el método de análisis adecuado. Es importante el uso de equipo de seguridad y lo necesario para toma de muestras en campo.

Como tercera fase se hace el procesamiento de datos y análisis e interpretación de resultados se propone y selecciona utilizar el método de Morgenstern-Price para determinar el factor de seguridad que sirve para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle o las condiciones de su comportamiento para que no falle. Y con base a esto, proponer un diseño o propuesta para la estabilización del talud (*Soil Nailing*, muro de gravedad, muros armados, anclajes activos y pasivos, pantalla de pilotes, entre otros).

Al trabajar la caracterización del talud y el diseño es importante mencionar que se usará las normas del ASTM, NSE, AASHTO y ACI 318. Es importante también, el chequeo de: deslizamiento, volteo presiones sobre suelo, asentamientos, entre otros. El uso de un software como GEO5 o algún otro más práctico en esta fase para comparación con el análisis a mano es un factor importante que puede presentar diferentes resultados que requieran un mejor análisis. Aquí también pueden chequearse tendencias o relaciones entre los factores e indicadores y los resultados se indican en tablas, diagramas y dibujos.

En la última fase se elige la mejor propuesta de diseño. Debe comprobarse al elegir que sea una propuesta factible teóricamente y viable económicamente para su ejecución y así cumplir o no la hipótesis planteada.

Se inicia la elaboración del informe y se hace la entrega final de tesis para presentar al final de este mes la sustentación o defensa de la tesis.

17. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Las técnicas de análisis para este estudio indican que está sometido a condiciones especiales de experimentación, ya que el fenómeno bajo estudio es susceptible de sufrir modificaciones en sus variables y tiene el propósito de estudiar su conducta, comportamiento y características.

Para la recopilación de datos de antecedentes del tema y de la zona de estudio se usa el método de tabulación manual a través bibliografía lo que incluye teorías, estudios, diagnósticos, artículos, libros o mapas para recolectar. Se usa también la tabulación mecánica (calculadoras), para apoyar en operaciones aritméticas y cálculos que se realicen a mano.

En esta fase también se aplica la recopilación para el uso de datos de laboratorio y campo de los ensayos de granulometría, límites, corte directo, CBR, SPT, triaxial y así tabular y clasificar los datos obtenidos y mostrar las variables, indicadores o factores que se debe evaluar en una forma ordenada y lógica para su uso.

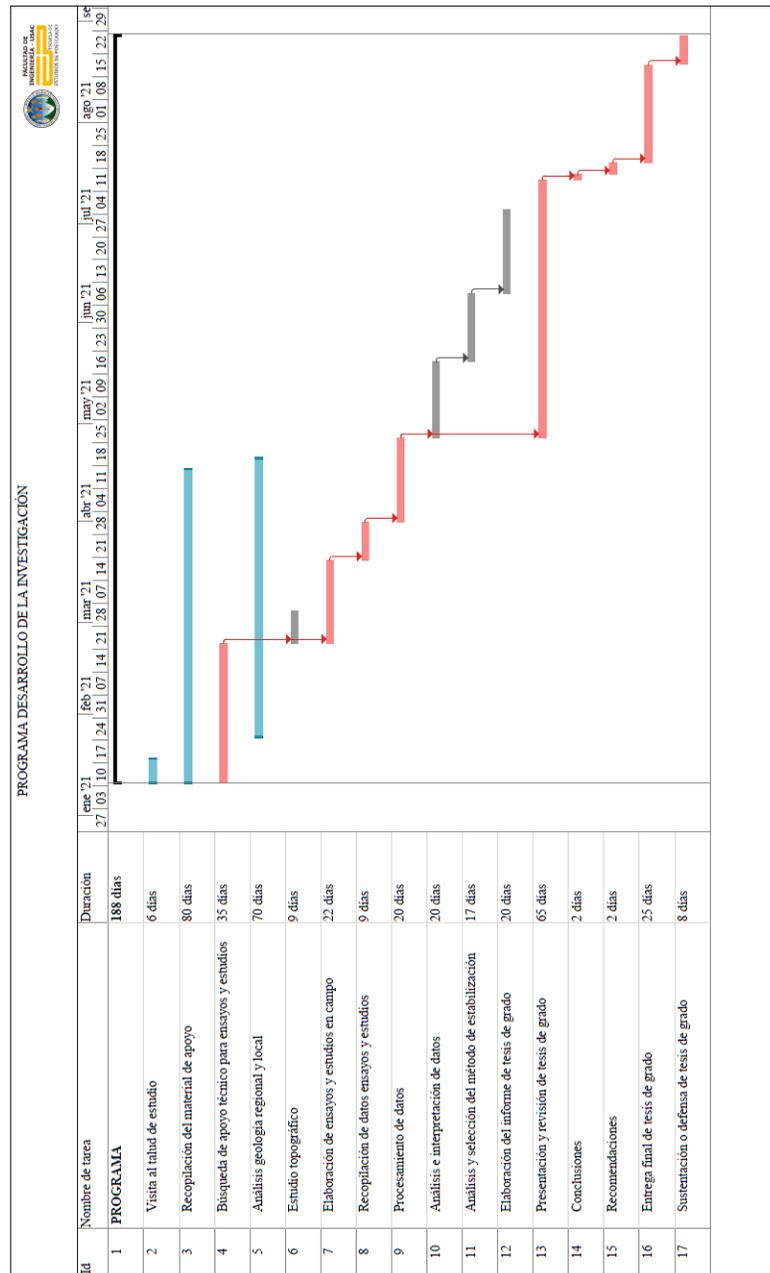
Complementando con la tabulación en computadora para que al analizar los datos se puedan presentar resultados en gráficas, cuadros y documentos que resumen la información obtenida, así como también programas de evaluación como GEO5 o SLOPE/W para determinar de forma más rápida y completa el diseño de este estudio.

En la fase de desarrollo y análisis, la técnica de uso será el univariado, ya que solamente tiene una variable la investigación.

Se aplica el uso de la estadística descriptiva ya que presenta gráficas, cuadros y resúmenes de datos de los cuales sólo utilizan los obtenidos en la realidad sin permitir la modificación de ninguno. Aquí puede utilizar el software de Excel para la presentación de los datos. En la estadística inferencial propone utilizar la prueba de hipótesis para demostrar o refutar la hipótesis nula.

18. CRONOGRAMA

Tabla III. Cronograma



Fuente: elaboración propia.

19. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La factibilidad de un proyecto se refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios para lograr los objetivos señalados, el cual se apoya en tres aspectos básicos:

Aspectos técnicos: sí es factible ya que mejora el sistema actual y busca la disponibilidad de tecnología que satisfaga las necesidades.

Aspectos operativos: sí es posible ya que busca la prevención, operación y uso garantizado del relleno sanitario.

Aspectos económicos: es viable ya que este proyecto pertenece a la autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán (AMSA) del cual se pediría recursos económicos, con el interés de seguir trabajando el relleno sanitario y su ordenamiento. Esta área colinda con una de las carreteras más importantes del país, por esto se solicitaría que el estudio y su ejecución sea patrocinados por el Ministerio de Comunicaciones o la municipalidad a la que está suscrita. Además del aporte de los estudios y diseño de estabilización por parte del estudiante de maestría de post grado de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Por lo que, sí es factible llevar a cabo el estudio.

A continuación, se presenta presupuesto para tomar en cuenta durante la realización del estudio.

Tabla IV. Presupuesto

PRESUPUESTO PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN					
CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	PU	SUBTOTAL	OBSERVACIONES
1 Estudio de Topografía con planos	global	1.00	Q 5,000.00	Q 5,000.00	
2 Cámara e impresión de fotos	global	1.00	Q 250.00	Q 250.00	se usará la cámara de un teléfono móvil
3 Calicatas a cielo abierto h= 1.50 mts (2 unidades c/area de estudio)	unidad	8.00	Q 840.00	Q 6,720.00	para desarrollar el perfil estratigrafico
4 Ensayo Estándar	global	1.00	Q 12,285.00	Q 12,285.00	granulometría, límites, humedad, etc
5 Ensayo Corte Directo	un	8.00	Q 1,890.00	Q 15,120.00	
6 Ensayo Especial	un	8.00	Q 367.50	Q 2,940.00	proctor modificado
7 Geólogo (clasificación, estudio y caracterización des suelo y roca)	un	1.00	Q 15,000.00	Q 15,000.00	geomorfología, litología y estratigrafía.
8 Ensayo Geofísico	un	1.00	Q 10,000.00	Q 10,000.00	sondeo electrico vertical
9 Ensayo inclinación de rocas	un	3.00	Q 630.00	Q 1,890.00	
10 Estudio Hidrológico	un	1.00	Q 1,000.00	Q 1,000.00	aporte como parte de la investigación
11 Gasolina visita al proyecto	un	18.00	Q 50.00	Q 900.00	
12 Analisis de datos y diseño del proyecto (incluye presupuesto de ejecución)	global	1.00	Q 10,000.00	Q 10,000.00	este seria el aporte en tiempo de la investigación (uso de software donde aplique)
13 Impresiones y papeleria al inicio y durante la investigación	global	1.00	Q 5,000.00	Q 5,000.00	libros, copias, impresiones, etc
14 Gasolina para revisiones con el asesor	un	12.00	Q 150.00	Q 1,800.00	
15 Impresión de planos e informe final	global	1.00	Q 700.00	Q 700.00	a color y copias en blanco y negro
TOTAL				Q 88,605.00	

Fuente: elaboración propia.

20. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abanto, H., Bolaños, O., Córdova, J., Manya, A., Oyarce, J., y Rodas, E. (2017). *Evaluación Geotécnica y Litológica de un macizo rocoso en el cañón de Chicche*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. Recuperado de https://www.academia.edu/35808072/UNIVERSIDAD_NACIONAL_DE_CAJAMARCA_FACULTAD_DE_INGENIER%3%8DA_ESCUELA_ACAD%3%89MICA_PROFESIONAL_DE_INGENIER%3%8DA_DE_MINAS_PROYECTO_EVALUACI%3%93N_GEOTECNICA_Y_LITOLOGICA_DE_UN_MACIZO_ROCOSO_UBICADO_EN_EL_CA%3%91ON_DE_CHICCHE_Presentado_por_Asesor_Cajamarca_junio_del_2017
2. AGIES. (2018). *Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Guatemala.
3. Ardiles, A., y Ahumada, L. (2018). *Estudio del factor de seguridad y caracterización geotécnica para la estabilidad del talud minado en concesión Sojo Piura, 2017*. (Tesis de Pregrado). Universidad Privada del Norte, Perú. Recuperado de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13369>
4. Barillas, J. (2015). *Auditoría del Relleno Sanitario de la Zona 3*. (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

5. Botia, W. (2015) *Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo*. (Tesis de Pregrado). Universidad Militar Nueva Granada Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6239/MANUAL%20DE%20PROCEDIMIENTOS%20DE%20ENSAYOS%20DE%20SUELOS.pdf;jsessionid=B89D52EDEF27A40A0A79C65DF27A230D?sequence=1>
6. Braja, M. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. México: Cengage Learning.
7. Braja, M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Mexico: Cengage Learning.
8. Cacao, E. (2018). *Clasificación de Calidad de Roca con el método SLOPE MASS RATING SMR en un tramo de la ruta CA-9, para la identificación de taludes inestables y herramienta para estudio diagnóstico*. (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
9. Cano, M. (2013). *Estudio de los mecanismos de inestabilidad de taludes y laderas del Flysch carbonatado de Alicante*. (Tesis de Doctorado). Universidad de Alicante. España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/45428>
10. Cuanalo, O., Oliva, A., y Gallardo, R. (2011). *Inestabilidad de laderas Influencia de la actividad Humana*. Revista Elementos. No. 84, Vol.18. pp. 39-46. Recuperado de

<https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000001436.pdf>

11. De Matteis, A., Angelone, S., y Garibay, M. (2003). *Estabilidad de Taludes*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Rosario, Argentina. Recuperado de <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>
12. Escobar, C., y Duque, G. (2016). *Geotecnia para el trópico andino*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/53560/>
13. Fong, M. (2016). *Caracterización técnica de la hidrosiembra con mulch de refinación térmica, para el control de erosión y arrastre de sedimentos en taludes de corte y relleno de proyectos de infraestructura*. (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala.
14. González, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Educación.
15. González, S. (2017). *Análisis de la estabilidad global de un relleno reforzado con geosintético en la localidad de Llico*. (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. Recuperado de <http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/1152>

16. Hedberg, H. (1980). *Guía para la clasificación, terminología y procedimientos estratigráficos*. España: Reverte S.A.
17. Hernández, L., Santamarta, J. (2015). *Ingeniería Geológica en terrenos Volcánicos*. Madrid, España: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
18. Hoyos, F. (2001). *GEOTECNIA. Diccionario Básico*. Medellín, Colombia: Hombre Nuevo Editores.
19. Huamán, R. (2017). *Geotecnia de inestabilidad de taludes, en el tramo de la carretera Huañimba - Cungunday, Cajamarca*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Cajamarca, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1669>
20. Medina, M. (2018). *Problemas Geotécnicos en los Rellenos Sanitarios*. (Tesis de Pregrado). Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Recuperado de <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/3768/Trabajo%20Final%20-%20Problemas%20Geot%C3%A9cnicos%20en%20Rellenos%20Sanitarios%20-%20Medina%20Mar%C3%ADa%20Emilia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

21. Mesías, D. (2018). *Estabilización de taludes aplicando el programa Geotécnico GEO&SOFT y aplicación práctica en talud de la Vía Pifo. Quito, Ecuador.* (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica de Ecuador, Quito. Recuperado de <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/15439/TESES%20ESTABILIZACION%20DE%20TALUDES%20GEO%26SOFT%20DIEGO%20MES%208DAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
22. Morales, R. (2015). *Análisis y propuesta para la estabilización de taludes en los depósitos piroclásticos de la calzada la paz, ciudad de Guatemala.* (Tesis de Pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala.
23. Pérez, A. (2016). *Análisis de estabilidad del talud en el Cambray II.* No. 1 Vol. 7. Revista de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
24. Pérez, B. (2014). *Caracterización geotécnica de los deslizamientos de taludes del km 18-900 al 19+600 de la ruta departamental 5, carretera a ciudad Quetzal, San Juan Sacatépequez. Guatemala.* (Tesis de Pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala.
25. Quezada, L. (2015). *Estabilización de taludes con métodos de bioingeniería.* Cuarto Coloquio de Jóvenes Geotecnistas, Primer encuentro de Profesores. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. Recuperado de https://nanopdf.com/download/4cjjquezada_pdf

26. Quinto, S., y Ponce, M. (2018). *Caracterización geológica-geotécnica del macizo rocoso del cuerpo mineral del yacimiento Loma Larga*. (Tesis de Pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/15226>
27. Rodríguez, T., Peñuela, C. (2018). *Influencia de variación de parámetros de resistencia en obras de Estabilidad de Taludes*. (Tesis de Pregrado) Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11349/13319>
28. Sánchez, V. (2011). *Metodologías de Caracterización de Macizos Rocosos*. Artículo de la Pontificia Universidad Javeriana, Especialización en Geotecnia Vial y Pavimentos, Bogotá, Colombia. Recuperado de https://www.academia.edu/36777450/Metodologias_de_caracterizaci%C3%B3n_de_macizos_rocosos_-_Viviana_Sanchez?auto=download
29. Sanhueza, C., y Rodríguez L. (2013). *Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales*. Revista de la construcción vol. 12 no. 1, Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003>
30. Sieron, K. (2004). *Mecanismos asociados a la inestabilidad de laderas: Factores que condicionan y desencadenan los deslizamientos*. 1er. Foro "Inestabilidad de laderas en el Estado de Veracruz, Centro de Ciencias de la Tierra. México: Instituto de Ecología. Recuperado de

http://www1.inecol.edu.mx/cv/CV_pdf/libros/Inestabilidad_de_laderas_en_el_estado_de_Veracruz.pdf

31. Suárez, J. (1998). *Deslizamiento y Estabilización de Taludes en Zonas Tropicales*. Segunda Edición. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia: Geotecnología S.A.S. Recuperado de <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>
32. Suárez, J. (2009). *Deslizamientos Análisis Geotécnico TOMO I*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia: Geotecnología S.A.S. Recuperado de <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>
33. Tardeo, C., y Zanabria, E. (2016). *Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de cuenca - Huancavelica. Lircay*, (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Huancavelica, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1935>
34. Tomás, R., Romana, M., y Serón, J. (2017). *Revisión del estado Actual de la Clasificación Geomecánica SMR*. Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica No 190, España: CEDEX. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/70953>

35. Ulla, J. (2006). *Los Rellenos Sanitarios*. La granja, Revista de Ciencias de la Vida No. 4. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. pp. 2-17. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/4760/476047388001.pdf>
36. Veleriano, F. (2015). *Caracterización Geotécnica y modos de falla estructural en el talud en roca del cerro espinal juliaca, Puno*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/2297>
37. Vergara, R. (2018). *Estabilización de talud por tres métodos: gaviones, geomalla y muro de contención en el centro poblado San Juanito Alto Distrito de Guadalupito-Viru-La Libertad*. (Tesis de Pregrado). Universidad San Pedro, Chimbote, Perú. Recuperado de <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/7988>