

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**ANÁLISIS DE INESTABILIDAD DE TALUDES MEDIANTE EQUILIBRIO
LÍMITE Y ELEMENTOS FINITOS, TRAMO SANTA ROSA– TUCO BAJO
CARRETERA BAMBAMARCA – CENTRO POBLADO TUCO**

PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

Presentado por:

BACH. MILDOR ROISER EUGENIO CARRANZA

Asesor

ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA

CAJAMARCA – PERÚ

2017

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por darme la vida y ser quien me enseña y guía a diario mis pasos para tomar decisiones acertadas en el camino de la vida.

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Facultad de Ingeniería y a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica por ser la forjadora de mi desarrollo profesional.

A mi asesor de Tesis, el Ing. Roberto Gonzales Yana, quien con sus conocimientos, orientación y ayuda que me brindo hicieron posible la culminación de esta tesis.

A mis docentes y personal administrativo por todas sus enseñanzas, tiempo y apoyo incondicional.

A mis padres, por su apoyo incondicional, y enseñarme que los sueños se logran a base de esfuerzo y dedicación, y a mis hermanos y tíos quienes me han impulsado a seguir adelante y culmine esta etapa de mi vida.

A mis amigos y compañeros quienes me apoyaron a lo largo de mi carrera, escuchándome, aconsejándome y en muchas ocasiones guiándome

DEDICATORIA

A mis Padres con todo mi cariño y mi amor, las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano en los momentos más difíciles, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento, Saúl y Aurelia.

A mi hermana y hermanos, que me han dado el amor y la calidez de la familia a la cual quiero, Nataly, Nilton y Saulo.

A mí novia, quien ha sido mi impulso para la culminación de mi tesis, gracias a su apoyo constante y amor incondicional, este éxito es tuyo, gracias por estar a mi lado, Verónica.

A mi tío por su apoyo incondicional, no solo en la etapa de formación Universitaria sino también en toda mi vida, Wálter.

CONTENIDO

	Pág.
CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANTECEDENTES	3
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 CRITERIOS DE ROTURA DE HOEK Y BROWN	4
2.2.2 CRITERIOS DE MOHR – COULOMB	9
2.2.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.....	10
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	18
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1 UBICACIÓN	20
3.2 ACCESIBILIDAD	21
3.3 CLIMA	21
3.4 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	21
3.4.1 TIPO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	21
3.4.2 ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS POR OBJETIVO	21
3.4.3 POBLACIÓN DE ESTUDIO	22
3.4.4 MUESTRA	22
3.4.5 UNIDAD DE ANÁLISIS	22

	Pág.
3.4.6 DELIMITACIÓN TEMPORAL	22
3.4.6 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	23
3.5 PROCEDIMIENTO	25
3.5.1 ETAPA DE GABINETE I.....	25
3.5.2 ETAPA DE CAMPO.....	25
3.5.3 ETAPA DE GABINETE II	26
3.6 TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	27
3.6.1 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	27
3.6.2 UNIDADES LITOLÓGICAS LOCALES	30
4.6.3 UNIDADES ESTRUCTURALES DISCONTINUAS	34
4.6.4 HIDROLOGÍA	37
4.6.5 GEOTECNIA	38
 CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	73
4.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	73
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84
4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	87
 CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
5.1 CONCLUSIONES	88
5.2 RECOMENDACIONES	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	94

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Representación del criterio de Hoek y Brown, en el espacio de tensiones normal y tangencial (Software RocData, Rocscience)	4
Tabla 2 Estimación en terreno de la Resistencia en Compresión Uniaxial (Hoek Brown, 1997).....	5
Tabla 3 Valores de la constante m_i para roca intacta, por tipo de roca (Hoek Brown, 1997)	6
Tabla 4 Caracterización del macizo rocoso en función de los bloques basado en familias de discontinuidades (Marinos, P; Hoek, E. 2000).....	8
Tabla 5 Estimación del GSI para macizos heterogéneos como flysch (Marinos, P; Hoek, E. 2000).....	8
Tabla 6 Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suarez, 2009).....	13
Tabla 7 Coordenadas del tramo de estudio.....	20
Tabla 8 Ubicación Política del tramo de estudio.....	20
Tabla 9 Vías de acceso al tramo de estudio.....	21
Tabla 10 Coordenadas UTM del Talud N° 01 Tramo Km 13+200 – Km 13+468.1.	38
Tabla 11 Geometría del Talud N° 01	39
Tabla 12 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 01 (obtenidos del estudio de mecánica de suelos y del Software RocDataV5).....	40
Tabla 13 Coordenadas UTM del Talud N° 02 Tramo Km 13+569.3– Km 13+716.8.	42
Tabla 14 Geometría del Talud N° 02	43
Tabla 15 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 02 (obtenidos de Estudio de mecánica de suelos y Software RocDataV5).....	44
Tabla 16 Coordenadas UTM de Talud N° 03 Tramo Km 13+832.26–Km 13+976.46.....	44
Tabla 17 Geometría del Talud N° 03	45
Tabla 18 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 03.....	46
Tabla 19 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 03 (Software RocData).....	47
Tabla 20 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 03 (Software RocDataV5)	47
Tabla 21 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 03 (Obtenidos del Software RocDataV5).....	48
Tabla 22 Coordenadas UTM del Talud N° 04 Tramo Km 14+869 – Km 14+961	49

	Pág.
Tabla 23 Geometría del Talud N° 04.	50
Tabla 24 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 04 (Software RocDataV5 y Estudio de mecánica de suelos)	50
Tabla 25 Coordenadas UTM del Talud N° 05 Tramo Km 15+13.7 – Km 15+79.5	50
Tabla 26 Geometría del Talud N° 05.	52
Tabla 27 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 05.....	52
Tabla 28 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 05 (obtenidos de RocDataV5).....	53
Tabla 29 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 05 (obtenidos de RocData V5)	54
Tabla 30 Coordenadas UTM del Talud N° 06 Tramo Km 15+194.4 – Km 15+275.1	54
Tabla 31 Geometría del Talud N° 06.	55
Tabla 32 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 06.....	56
Tabla 33 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 06 (Obtenidos del Software RocDataV5).....	57
Tabla 34 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 06 obtenidos del software RocData.....	57
Tabla 35 Coordenadas UTM del Talud N° 07 Tramo Km 15+541.8 – Km 15+617.4	58
Tabla 36 Geometría del Talud N° 07	59
Tabla 37 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 07.....	60
Tabla 38 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 07 (obtenidos del software RocDataV5).....	61
Tabla 39 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 07 (obtenidos del software RocData).	61
Tabla 40 Coordenadas UTM del Talud N° 08 Tramo Km 15+699.8– Km 16+084.6	62
Tabla 41 Geometría del Talud N° 08.	63
Tabla 42 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 08, en el tramo compuesto solo por areniscas.	64
Tabla 43 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 08, en el tramo compuesto por intercalación de areniscas y lutitas.	65
Tabla 44 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 08, en el tramo compuesto por areniscas (obtenidos del Software RocDataV5).	65

	Pág.
Tabla 45 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 08, en el tramo compuesto por areniscas y lutitas (Obtenido del Software RocDataV5).....	66
Tabla 46 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 08 (Obtenidos del Software RocdataV5).....	67
Tabla 47 Coordenadas UTM del Talud N° 09 Tramo Km 15+768.0 – Km 16+443.0	67
Tabla 48 Geometría del Talud N° 09.	68
Tabla 49 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 09.....	69
Tabla 50 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 09 (Obtenidos del Software RocDataV5).....	70
Tabla 51 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 09 (Obtenidos del Software RocDataV5 y del estudio de mecánica de suelos).....	70
Tabla 52 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 09 (Obtenido del Software RocDataV5).....	71
Tabla 53 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 01	74
Tabla 54 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 02	75
Tabla 55 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 03	76
Tabla 56 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 04	77
Tabla 57 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 05	78
Tabla 58 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 06	79
Tabla 59 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 07	80
Tabla 60 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 08	81
Tabla 61 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 09.	82
Tabla 62 Cuadro resumen de los factores de seguridad de los taludes analizados.....	83
Tabla 63 Factor de seguridad de los Taludes N° 01, 02 y 03 mediante equilibrio limite. ...	84
Tabla 64 Comparación de lugar de falla del Talud N03 y Talud 09 mediante equilibrio limite y elementos finitos.....	85
Tabla 65 Comparación de la influencia de las discontinuidades en el factor de seguridad de los Taludes N° 05 y 09.	85
Tabla 66 Comparación de la influencia de la composición litológica, estructural y geomorfología en el factor de seguridad de los Taludes N° 07 y 08.....	86
Tabla 67 Zonificación de inestabilidad del tramo de estudio.	86

ÍNDICE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Envoltante de falla, criterio de Mohr–Coulomb (Lambe & Whitman, 1972).....	10
Figura 2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suarez, 2009)	11
Figura 3 Metodología de discretización del dominio en elementos finitos. (Bobet, 2010)..	15
Figura 4 Modelamiento de una falla en un talud con la metodología del SRF en RS2. (Rocscience, 2016).	17
Figura 5 Planicie en la comunidad de Piñipata (E: 782056, N: 9270731)	27
Figura 6 Lomada en la comunidad de Piñipata (E: 782288, N: 9271408)	28
Figura 7 Ladera en la comunidad de Piñipata (E: 782056, N: 9270731)	29
Figura 8 Escarpes entre las comunidades de Piñipata y Tuco Bajo (E: 782199, N: 9271902)	30
Figura 9 Areniscas blanquecinas en Tramo Km 13+571 a Km 14+547	31
Figura 10 Areniscas negruzcas del Grupo Goyllarisquizga en el Tramo Km 14+685 a Km 16+400, con la presencia de una capa de carbón.....	32
Figura 12 Intercalación de areniscas y lutitas del Grupo Goyllarisquizga en el Tramo Km 14+685 a Km 16+400.....	32
Figura 12 Depósito coluvial en el talud de la carretera (la carretera tiene un ancho de 7m aprox.) en el tramo del Km 14+547 a Km 14+685.....	33
Figura 13 Falla Piñipata 1 ubicada a 1 km de la zona urbana de la comunidad de Tuco Bajo, es una falla normal (E: 782402, N: 9271033).	35
Figura 14 Falla Piñipata 2 del tipo Normal, ubicada en el tramo de la carretera Bambamaca- Tuco Bajo en el Km 15+515 (E: 782287, N: 9271683).	36
Figura 15 FallaTuco 1 del tipo Normal, ubicada en el tramo de la carretera Bambamaca-Tuco Bajo en el Km 15+774 (E: 782388, N: 9271703).	37
Figura 16 Talud N° 01 (E: 781505, N: 9270195).....	39
Figura 17 Flujo de detritos en la comunidad de Santa Rosa (E: 781444, N: 9270164) (Google Earth-2016).....	41
Figura 18 Vista de escarpe principal y cuerpo del flujo de detritos.	42
Figura 19 Talud N° 02 (E: 781773, N: 9270236).....	43
Figura 20 Talud N° 03 en macizo rocos de areniscas (E: 781899, N: 9270450).	45

	Pág.
Figura 21 Talud N° 04 (E: 782375, N: 9271166).....	49
Figura 22 Talud N° 05 (E: 782352, N: 9271284).....	51
Figura 23 Talud N° 06 (E: 782308, N: 9271398).....	55
Figura 24 Talud N° 07 (E: 782305, N: 9271698).....	59
Figura 25 Talud N° 08 (E: 782356, N: 9271747).....	63
Figura 26 Talud N° 09 (E: 782718, N: 9271427).....	68
Figura 27 Deslizamiento rotacional en la comunidad de Tuco Bajo (E: 782721 N: 9271430) (Google Earth - 2016).....	72

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

- a** : Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
- ASTM** : American Society for Testing Material
- c** : Cohesión del macizo rocoso
- c'** : Cohesión efectiva
- C1, C2** : Familias de discontinuidades
- CL** : Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media
- D** : Factor de disturbancia del macizo rocoso
- e** : Espesor de las discontinuidades
- E** : Este
- E** : Módulo de Young o Módulo de Elasticidad
- E1, E2** : Familias de discontinuidades
- Ei** : Módulo de Young de la roca intacta
- Em** : Módulo de Young del macizo rocoso
- F1, F2** : Familias de discontinuidades
- FS** : Factor de seguridad
- GSI** : Índice de Resistencia Geológica
- GSI_{res}** : Índice de Resistencia Geológica Residual
- H1, H2** : familia de discontinuidades
- J-MEF** : Método de Elementos Finitos con representación explícita de las discontinuidades
- m³** : Metros cúbicos
- m_b** : Valor reducido de la constante del material m_i
- MEF** : Método de Elementos Finitos
- m_i** : Parámetro de la roca intacta obtenido de ensayos triaxiales
- ML** : Limos inorgánicos y arenas muy finas
- MN** : Meganewton.
- MPa** : Megapascuales.
- N** : Norte
- NE** : Noreste
- s** : Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
- S** : Sur

SP : Arenas mal graduadas, arenas con grava

s_{res} : Constante residual que depende de las propiedades del macizo rocoso

SUCS : Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

SW : Suroeste

UCS : Resistencia a la compresión uniaxial

W : Oeste

σ_1' : Tensión efectiva principal mayor en el momento de la rotura

σ_3' : Tensión efectiva principal menor en el momento de la rotura

σ_h : Tensión horizontal

σ_n : Tensión normal

σ_v : Tensión vertical

ϕ' : Ángulo de rozamiento interno

τ : Tensión tangencial

WGS84: World Geodetic System 1984

RESUMEN

El tramo Santa Rosa a Tuco Bajo de la carretera Bambamarca – Centro Poblado Tuco, ubicado en la Provincia y Distrito de Bambamarca, comunidades de Santa Rosa, Piñipata y Tuco Bajo está constituido por areniscas y lutitas del Grupo Goyllarisquizga y suelos coluviales que están siendo meteorizados, erosionados y alterados en sus propiedades geotécnicas, las lluvias en los meses de diciembre a abril disminuyen los esfuerzos de resistencia interna como la cohesión, ángulo de fricción y aumentan la presión intersticial, las vibraciones en los taludes producidas por el paso de vehículos aumentan los esfuerzos de corte afectando la estabilidad de los taludes. Para cumplir el objetivo principal de esta investigación de analizar la inestabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite y elementos finitos utilizando los softwares Slide y Phase2 se ha cartografiado la litología que componen los taludes: areniscas, lutitas y suelos coluviales; las unidades geomorfológicas como planicies, lomadas, laderas y escarpes en cuya modelación han incidido los ríos Llaucano y Rosas y las quebradas Santa Rosa y El Amarillo; las fallas que tienen mayor incidencia en la inestabilidad de taludes como la Falla Tuco 01 y la falla Piñipata 5; y por último, las características geomecánicas de los taludes de rocas que tienen un GSI que varía de 40 a 50, resistencia uniaxial a la compresión de 70 a 75 MPa, peso unitario de 0.026 MN/m³ y ángulo de fricción de 51 a 58°, los taludes de suelos del tipo CL tiene cohesión de 0.22 Kg/cm², ángulo de fricción 13.2° y peso específico húmedo 1.74 gr/cm³; la zonificación del análisis de inestabilidad de taludes muestra que el 32.25 % son de inestabilidad muy alta ($FS < 1$), 4.27% de inestabilidad alta ($1 \leq FS < 1.5$), 1.95% de inestabilidad baja ($FS \geq 1.5$) y el 61.54% son taludes estables.

Palabras claves: Análisis de inestabilidad de Taludes, Factor de Seguridad, Elementos Finitos, Equilibrio Limite, zonificación de inestabilidad.

ABSTRACT

The Santa Rosa to Tuco Bajo section of the Bambamarca - Tuco Village Center road, located in the Province and District of Bambamarca, communities of Santa Rosa, Piñipata and Tuco Bajo are constituted by sandstones and shales of the Goyllarisquizga Group and colluvial soils that are being weathering , eroded and altered in their geotechnical properties, rains in the months of December to April decrease the internal resistance stresses such as cohesion, friction angle and increase interstitial pressure and vibrations in the slopes produced by the passage of vehicles increase the cutting efforts affecting slope stability. To fulfill the main objective of this research to analyze the instability of slopes using the methods of limit equilibrium and finite elements using the software Slide and Phase2, the lithology of the slopes has been mapped: sandstones, shales and colluvial soils; the geomorphological units such as plains, hills, slopes and escarpments whose modeling has influenced the Llaucano and Rosas rivers and the Santa Rosa and El Amarillo streams; the faults that have a greater incidence in the instability of slopes are the fault Tuco 01 and the fault Piñipata 5 and finally the geomechanical characteristics of the slopes of rocks that have a GSI that varies from 40 to 50, uniaxial compressive strength of 70 to 75 MPa, unit weight of 0.026 MN / m³ and friction angle from 51 to 58 °, soil slopes of type CL has cohesion of 0.22 kg / cm², friction angle 13.2 ° and wet specific gravity 1.74 gr / cm³; The zoning of the slope instability analysis shows that 32.25% are of very high instability (FS <1), 4.27% of high instability (1 <= FS <1.5), 1.95% of low instability (FS >= 1.5) and the 61.54% are stable slopes.

Key Words: Slope instability analysis, Factor of safety, Finite element, Limit Equilibrium, Zoning Instability.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la carretera Bambamarca – Centro Poblado Tuco desde el tramo Santa Rosa hasta Tuco Bajo se encuentran afloramientos de rocas sedimentarias: areniscas y lutitas pertenecientes al Grupo Goyllarisquizga, y suelos aluviales y coluviales que están siendo meteorizados, erosionados y alterados en sus propiedades geotécnicas, las lluvias que se dan en la zona con mayor intensidad en los meses de diciembre a abril disminuyen los esfuerzos de resistencia interna como la cohesión, ángulo de fricción y aumentan la presión intersticial, las vibraciones en los taludes producidas por el paso de vehículos y aumentan los esfuerzos de corte que afectan la estabilidad de los taludes. Por lo que es importante un estudio de inestabilidad de los taludes calculando los factores de seguridad.

Los taludes inestables son un peligro inminente para los pobladores de las comunidades de Santa Rosa, Tuco Bajo y Piñipata, dificulta la movilización de los pobladores y el traslado de productos de comercialización. La información obtenida del análisis de inestabilidad de los taludes será importante para mostrar a las autoridades competentes y comunidades que se debe prevenir posibles pérdidas de vidas humanas y económicas tomando las medidas necesarias para controlar los tramos altamente inestables. De allí la importancia de evaluar el grado de inestabilidad de los taludes, respondiendo la siguiente incógnita: ¿Cuál es la inestabilidad de los taludes en el tramo Santa Rosa – Tuco Bajo, en la Carretera Bambamarca – Centro Poblado Tuco?; en ésta investigación comprobaremos la hipótesis que indica que la inestabilidad de taludes en el tramo Santa Rosa – Tuco Bajo, en la carretera Bambamarca –

Centro Poblado Tuco es condicionado por la litomorfoestructuras, hidrología que afectan las propiedades geomecánicas de las rocas y suelos, haciéndolo altamente inestable.

Con este estudio se busca evaluar e identificar el grado de inestabilidad del tramo Santa Rosa – Tuco Bajo, siendo la metodología descriptiva y analítica, siendo necesario la utilización de datos obtenidos a través de un buen sistema de recolección, es un tipo de investigación explicativo y/o correlacional, explicativo porque se pretende determinar las causas de la inestabilidad; y correlacional porque se ha determinado cómo han influido las variables litomorfoestructurales en la inestabilidad de taludes. Teniendo un tiempo de duración de 10 meses para realizar la investigación desde marzo – diciembre de 2016.

El objetivo principal de la investigación es analizar la inestabilidad de taludes en el tramo Santa Rosa – Tuco Bajo, en la Carretera Bambamarca – Centro Poblado Tuco mediante los métodos de equilibrio límite y elementos finitos. Siendo los objetivos específicos: cartografiar las unidades litomorfoestructurales, identificar las variables geológicas en los taludes, caracterizar la geomecánica de los taludes y realizar zonificación de la inestabilidad de taludes a partir de los Factores de Seguridad obtenidos mediante los Softwares Phase2 y Slide.

En el Capítulo II se presenta los antecedentes a nivel internacional, nacional y local del tema a investigar, las bases teóricas en la cual se fundamenta la investigación y la definición de términos básicos; en el Capítulo III se detalla los materiales y métodos empleados, siguiendo un estricto cronograma de trabajo en campo y gabinete donde se ha recopilado los datos que fundamentan la investigación, en el Capítulo IV se aborda el análisis y discusión de resultados a los cuales se han llegado del procesamiento de datos obtenidos en campo y en el Capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones a los cuales se han llegado al finalizar la ejecución de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

WILSON (1984) realizó para el INGEMMET el estudio geológico de los cuadrángulos de Chota (14-f), Celendín (14-g), concluyendo que la geodinámica actual es el resultado de la tectónica y de los procesos meteóricos, generando así diversos geoambientes cada uno con características especiales.

ZAVALA y MALENA (2011) Evaluaron la ocurrencia de peligros geológicos y geohidrológico en Cajamarca mediante un método heurístico que involucró diversos factores que influyen en la peligrosidad (Litología, hidrogeología, hidrología y geomorfología).

MALDONADO (2014) realizó la evaluación de la estabilidad de taludes de la pared final de un tajo, utilizando Métodos de Equilibrio Límite (MEL) usando el programa bidimensional Slide V.6 y los métodos GLE/Morgenstern-Price y Spencer y el Método de Elementos Finitos (MEF) mediante el programa Phase2 (Rocscience) Los resultados de FoS obtenidos con los diferentes métodos son comparados y discutidos, asimismo se presentan las ventajas y limitaciones de cada método.

KHADIJA et al (2012) aplica el método de equilibrio limite y elementos finitos para analizar la estabilidad de un talud de geometría compleja, compuesta de una alternancia entre areniscas y margas, los cálculos finales del factor de seguridad no tiene una diferencia significativa entre los dos métodos.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 CRITERIOS DE ROTURA DE HOEK Y BROWN

El criterio es válido para evaluar la resistencia de la matriz rocosa, siendo no lineal el criterio donde representa la gráfica de rotura siendo una curva de tipo cóncava. Desarrollado inicialmente para su aplicación a macizos rocosos fracturados sin alterar su matriz rocosa resistente.

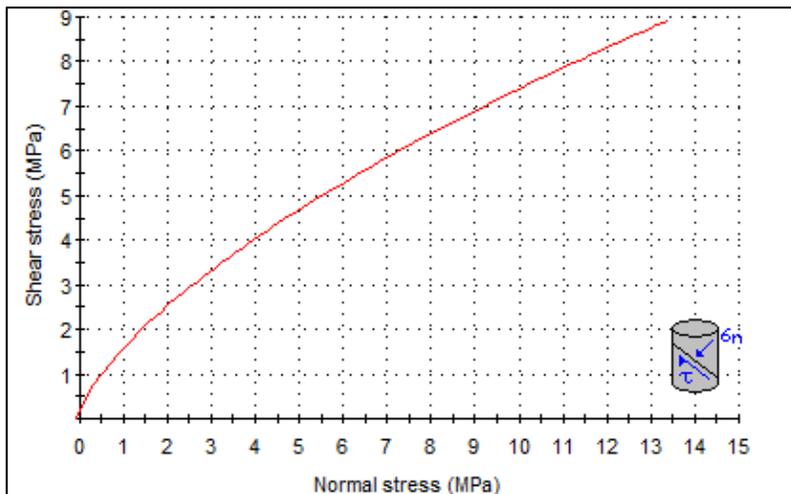


Tabla 1 Representación del criterio de Hoek y Brown, en el espacio de tensiones normal y tangencial (Software RocData, Rocscience)

Para aplicar el criterio de rotura de Hoek - Brown se requiere conocer tres parámetros del macizo rocoso (Hoek & Brown, 1997):

A. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (σ_{ci}) DE LA ROCA INTACTA

Cuando no es posible realizar pruebas de laboratorio, se pueden utilizar siguiente tabla para estimar el valor de σ_{ci} . Estas estimaciones se pueden usar para los propósitos de un diseño preliminar, pero para diseños de detalle se deberían de desarrollar ensayos de laboratorio que permitan obtener valores más confiables.

Clase (a)	Clasificación de la roca según su resistencia	Resistencia Uniaxial (Mpa)	Indice de carga puntual (Mpa)	Estimación en terreno de la resistencia	Ejemplos
R6	Extremadamente Resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo de geólogo solo causan descostramientos superficiales en la roca.	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, grenito, cuarcita
R5	Muy Resistente	100-250	4-10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo de geólogo para fracturarse.	Anbibolita, gabro, arenisca, basalto, gneiss, marmol, granodiorita, caliza, riolita, toba.
R4	Resistente	50-100	2-4	Un trozo de roca requiere mas de un golpe de martillo de geólogo para fracturarse.	Caliza, marmol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras
R3	Moderadamente Resistente	25-50	1-2	Un trozo de rocas puede fracturarse con un golpe del martillo de geólogo, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbon, esquistos, pizarras, limolitas.
R2	Débil	5-25	(b)	Un golpe con la punta del martillo de geólogo deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	Muy Débil	1-5		La roca se disgrega a ser golpeada con la punta del martillo de geólogo. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas.	Roca muy alterada o meteorizada.
R0	Extremadamente Débil	0.25-1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Salbanda arcillosa dura.

Tabla 2 Estimación en terreno de la Resistencia en Compresión Uniaxial (Hoek Brown, 1997).

B. EL VALOR DE LA CONSTANTE DE HOEK Y BROWN PARA LA ROCA INTACTA (m_i)

Cuando no es posible realizar pruebas de laboratorio, se pueden utilizar siguiente tabla para estimar el valor de m_i . Estas estimaciones se pueden usar para los propósitos de un diseño preliminar, pero para diseños de detalle se deberían de desarrollar ensayos de laboratorio que permitan obtener valores más confiables.

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy Fina
SEDIMENTARIAS	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Arcillolita 4
			←----- Grauwaca -----→ (18)			
	No Clásticas	Orgánicas	←----- Creta -----→ 7			
			←----- Carbón -----→ (8 - 21)			
		Carbonatos	Brechas (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza Micrítica 8	
Químicas		Yeso 16	Anhidrita 13			
METAMÓRFICAS	No Foliadas		Mármol 9	Rocas Córneas (19)	Cuarcita 24	
	Levemente Foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 25 - 31	Milonitas (6)	
	Foliadas		Gneiss 33	Esquistos 4 - 8	Filitas (10)	Pizarras 9
ÍGNEAS	Intrusivas	Claras	Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorita (30)		Dacita (17)	
	Oscuras	Diorita (28)		Andesita 19		
Gabbro 27		Dolerita (19)	Basalto (17)			
	Extrusivas Piroclásticas		Aglomerados (20)	Brechas (18)	Tobas (15)	

Tabla 3 Valores de la constante m_i para roca intacta, por tipo de roca (Hoek Brown, 1997)

C. VALOR DEL ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) DEL MACIZO ROCOSO (Hoek, Kaiser & Bawden)

El Índice Geológico de Resistencia (GSI) proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presentaría un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas.

Respecto al uso del Índice Geológico de Resistencia (GSI) para caracterizar geotécnicamente el macizo rocoso, es conveniente tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- A diferencia de otros índices de calidad geotécnica, el índice de resistencia geológica se desarrolló específicamente para evaluar el efecto de escala en la resistencia al corte del macizo rocoso definido según el criterio de rotura de Hoek y Brown.
- No es aplicable en aquellos casos en que el comportamiento del macizo rocoso presenta un claro control estructural, lo que se puede traducir en una sobre valoración de la resistencia del macizo rocoso.
- No considera la resistencia a la compresión de la roca intacta, ya que al evaluar la resistencia del macizo rocoso se incluyen los parámetros que definen el criterio de rotura de Hoek y Brown.
- No considera el espaciamiento entre las estructuras, ya que este está implícitamente incluido al evaluar la blocosidad del macizo rocoso (a mayor espaciamiento, el macizo rocoso es más masivo y a menor espaciamiento es de mayor blocosidad).
- No considera la condición de fracturas porque el criterio de rotura de Hoek y Brown se define en términos de tensiones efectivas.
- Debe definirse como un rango y no como un valor único. En la práctica es usual definir un rango de unos 10 o 20 puntos.
- En casos especiales, como macizos rocosos heterogéneos, puede ser necesario desarrollar una versión especial de la tabla de clasificación GSI. Un ejemplo de esto se muestra en la Tabla 5, donde se presenta una tabla desarrollada por Marinis y Hoek (Marinis, P. y Hoek, E., 2000) para el caso de macizos rocosos heterogéneos estratificados.
- La evaluación del índice GSI en base al mapeo de afloramientos de roca en superficie, usualmente afectados por desconfinamiento e intemperización, no necesariamente es válida en profundidad debido a que el macizo rocoso estará confinado y no afectado por la intemperización.
- En el caso de macizos rocosos dañados por la voladura, deberá tenerse especial cuidado al evaluar el índice GSI ya que podría duplicarse el efecto del daño de la voladura, al incluir el parámetro “D” propuesto por Hoek (Hoek E., et al., 2002) para cuantificar este daño al evaluar la resistencia al corte del macizo rocoso.

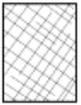
		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES		80	70			
			60			
				50		
				40		
					30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Tabla 4 Caracterización del macizo rocoso en función de los bloques basado en familias de discontinuidades (Marinos, P; Hoek, E. 2000)

		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
	A. Thick bedded, very blocky sandstone <i>The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.</i>	70				
	B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone	60	A			
	C. Sandstone and siltstone in similar amounts		50	B		
	D. Siltstone or silty shale with sandstone layers			C		
	E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers			D		
C, D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.				40		
	F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure				30	
	G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers					20
	H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.					10

→ : Means deformation after tectonic disturbance

Tabla 5 Estimación del GSI para macizos heterogéneos como flysch (Marinos, P; Hoek, E. 2000)

2.2.2 CRITERIOS DE MOHR – COULOMB

El criterio de rotura Mohr – Coulomb, fue propuesto inicialmente pensado para el estudio en suelos, siendo un criterio lineal. Esto significa que la ecuación que define la superficie de fluencia es una línea recta. Para el criterio, se define la rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. (Gonzales L, 2014)

$$\tau = c' + \tan\phi'$$

Dónde:

c' = la cohesión, en efectivas. Es una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.

ϕ' = el ángulo de rozamiento interno

τ = la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura

σ = la tensión normal que actúa en el plano de rotura

El suelo será estable para un estado de esfuerzos donde el círculo de Mohr quede totalmente por debajo de la envolvente, la resistencia máxima del suelo será alcanzada en un plano donde el círculo de Mohr sea tangente a la envolvente.

De la ley de Mohr-Coulomb se desprende que la resistencia al corte de suelos en términos generales tiene dos componentes (Suarez J. 1998):

- Resistencia por Fricción ($\tan\phi$): se debe al roce entre partículas cuando están sometidas a esfuerzos normales.
- Resistencia por Cohesión (c): se debe a fuerzas internas físico-químicas que mantienen unidas a las partículas en una masa.

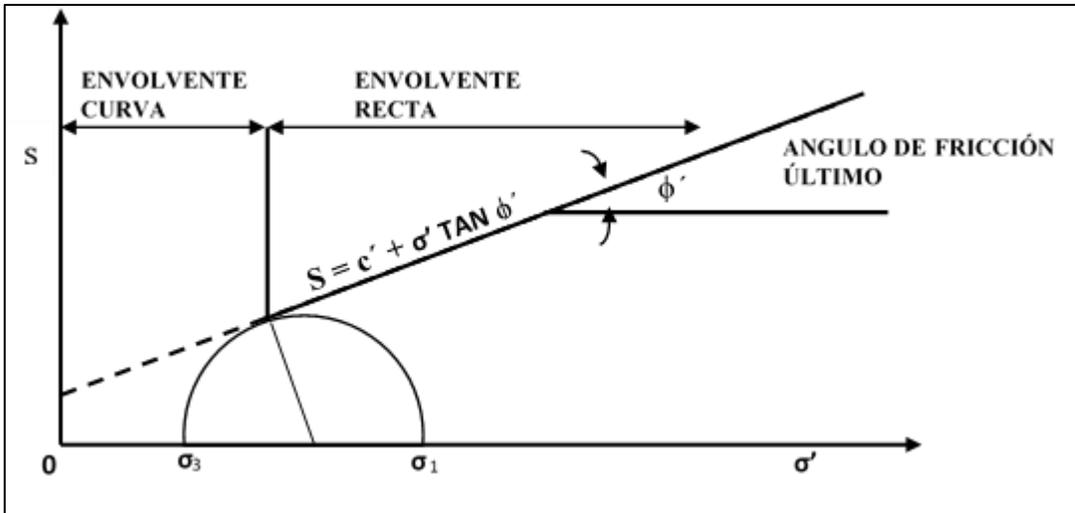


Figura 1 Envolvente de falla, criterio de Mohr–Coulomb (Lambe & Whitman, 1972).

Los suelos no cohesivos como la grava, arena, y limos no plásticos se asumen sin cohesión, y ensayos de laboratorio lo confirman. Casos de suelos típicos que merecen ser mencionados corresponden a los suelos no cohesivos saturados, arcillas normalmente consolidadas y limos arcillosos. El valor de ϕ para suelos no cohesivos saturados varía generalmente entre 27° y 45° grados, dependiendo por ejemplo del aumento de la densidad relativa, de la granulometría y de la forma de las partículas (Wu, 1996).

2.2.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

En cuanto a los métodos de análisis usados en problemas de estabilidad, éstos se dividen en dos grandes grupos: los Métodos de Equilibrio Límite y los Métodos Numéricos. Los métodos numéricos son la técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad en la mayoría de los casos de evaluación de estabilidad de taludes. Sin embargo, los métodos de límite de equilibrio, son más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación (“Toppling”) y las fallas en cuña (Suarez, 2009)

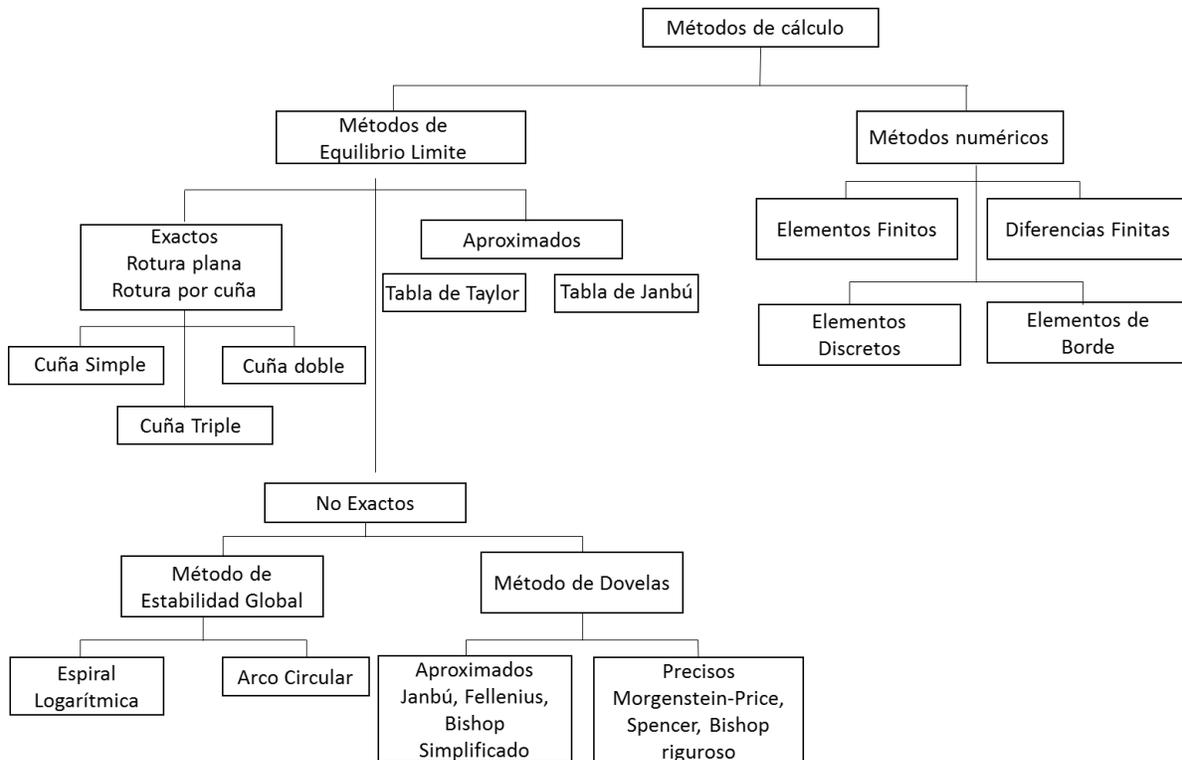


Figura 2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suarez, 2009)

A. MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

Un análisis de límite de equilibrio permite obtener un factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación. El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0 (Suarez, 2009)

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han ido mejorando los sistemas de dovelas desarrollados por Petterson y Fellenius (1936). Algunos métodos son precisos y otros, solamente aproximados. Los métodos de Bishop (1955) y Janbú (1954) han sido muy utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer

(1967), ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión (Suarez, 2009).

Comparación de los diversos métodos

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficientes sísmicos. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.

Tabla 6 Métodos de análisis de estabilidad de taludes (Suarez, 2009)

La cantidad de métodos que se utilizan, dan resultados diferentes y en ocasiones, contradictorios los cuales son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad. Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos de todo el mundo, son el simplificado de Bishop y los métodos precisos de Morgenstern y Price y Spencer. Cada método da valores diferentes en el factor de seguridad.

Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, los factores de seguridad determinados por el método de Bishop difieren aproximadamente un 5% con respecto a soluciones más precisas. Mientras el método simplificado de Janbú generalmente subestima el factor de seguridad hasta valores del 30 y en algunos casos los

sobreestima hasta valores del 5%. Esta aseveración fue documentada por Fredlund y Krahn (1977).

Los métodos que satisfacen el equilibrio en forma más completa son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan, con frecuencia, problemas numéricos que conducen a valores irreales de F.S, por exceso o defecto.

Por las razones anteriormente expuestas, se prefieren los métodos más sencillos y fáciles de manejar como es el método simplificado de Bishop. Todos los métodos que satisfacen el equilibrio completo, dan valores similares del factor de seguridad (Fredlund y Krahn, 1977, Duncan y Wright, 1980). No existe un método de equilibrio completo que sea significativamente más preciso que otro. El método de Spencer es más simple que el de Morgenstern y Price o el de Chen y Morgenster. Los métodos de Morgenstern son más flexibles para tener en cuenta diversas situaciones de fuerzas entre dovelas; no obstante, se debe tener en cuenta que la dirección de las fuerzas entre partículas en estos métodos, no afecta en forma importante el resultado del factor de seguridad. El método de Sarma, tiene ciertas ventajas en relación con los demás métodos, para el análisis sísmico.

Parámetros Utilizados en los Análisis de Límite de Equilibrio (Suarez, 2009)

Los modelos tienen en cuenta los factores primarios que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de los sismos, flujo de agua, propiedades de resistencia y peso unitario de los suelos

Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático de límite de equilibrio. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque de límite de equilibrio no produce resultados satisfactorios.

B. MÉTODOS NUMÉRICOS: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. Estos elementos se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos. El método típicamente utilizado es el de la formulación de desplazamientos, el cual presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente (Suarez, 2009).

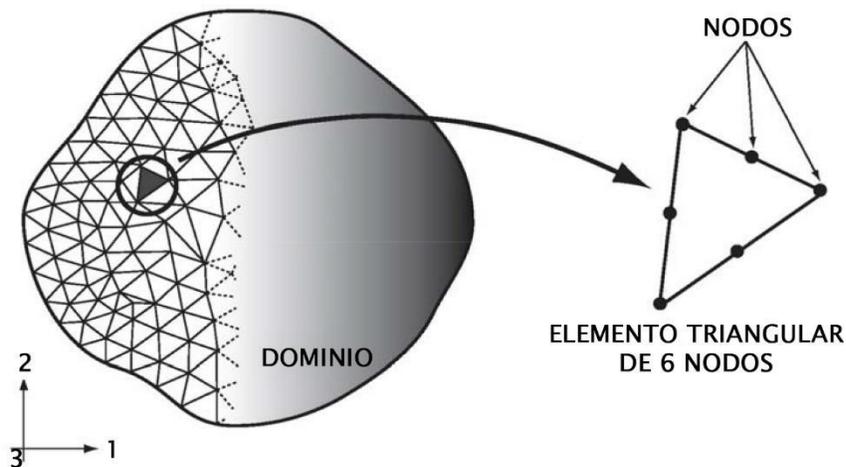


Figura 3 Metodología de discretización del dominio en elementos finitos. (Bobet, 2010)

Los métodos numéricos son la técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad en la mayoría de los casos de evaluación de estabilidad de taludes. Los factores que generan el deslizamiento pueden ser complejos y muy difíciles de modelar; no obstante, con el objeto de analizar esas situaciones complejas, existen algunas herramientas utilizando elementos finitos. El método de elementos finitos es hoy el más utilizado y probablemente, el modelo numérico más versátil para el análisis de estabilidad de taludes (Carter et al, 2001).

Ventajas de los métodos de elementos finitos (Suarez, 2009)

- Se puede considerar el comportamiento no lineal de los materiales en la totalidad del dominio analizado.

- Es posible modelar la secuencia de excavación incluyendo la instalación de refuerzos y sistemas de estructura de soporte.
- La falla que se produce en el talud es progresiva.
- Los detalles estructurales de juntas o fisuras cercanas pueden modelarse utilizando una técnica de homogenización.
- Se puede emplear una formulación convencional de deformaciones para la mayoría de las posibilidades de carga.

Desventajas de los métodos de elementos finitos (Suarez, 2009)

- Debido a que el sistema de ecuaciones es muy grande, se requieren tiempos prolongados y capacidades altas de memoria dependiendo de la estructura general de los taludes y la implementación de los algoritmos del código de elementos finitos.
- La totalidad del volumen del dominio analizado tiene que discretizarse.
- Algunos modelos requieren de algoritmos sofisticados de acuerdo con el tipo de material constitutivo utilizado.
- El método no es apropiado para rocas muy fracturadas o suelos altamente fisurados cuando las discontinuidades se encuentran distribuidas en forma no uniforme y controlan el comportamiento mecánico de los taludes.

B1. Factor de seguridad con el método del Factor de Reducción de Resistencia

Con elementos finitos el factor de seguridad es evaluado realizando una reducción gradual de los parámetros de resistencia al cortante de los materiales “Strength Reduction Factor (SRF) e induciendo a una falla. Inicialmente, la fuerza de gravedad se aplica en estado elástico para obtener la primera distribución de esfuerzos en todo el talud (Suárez, 2007). Luego, la reducción gradual de la resistencia va a producir un esfuerzo residual en los elementos fallados y así se evalúa la fuerza residual. Así el valor inicial SRF se asume lo suficientemente pequeño para obtener un problema elástico, luego va aumentando etapa por etapa hasta que se desarrolle una falla global del talud (Popescu, Ugai, & Trandafir, 2000).

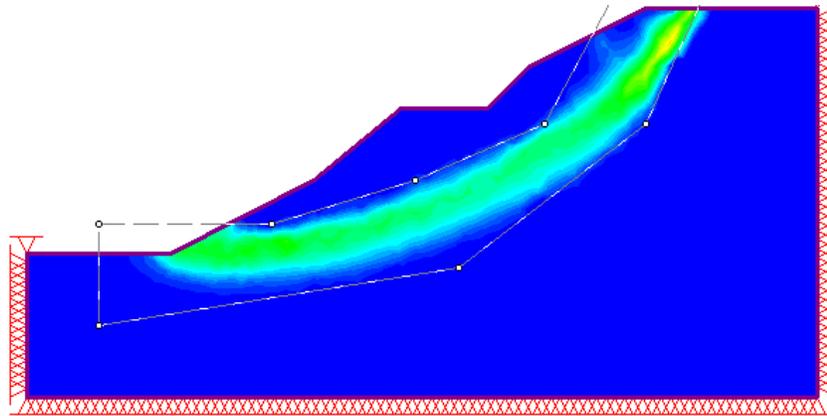


Figura 4 Modelamiento de una falla en un talud con la metodología del SRF en RS2. (Rocscience, 2016).

B2 Descripción de la herramienta computacional utilizada: Phase2 v7 (ROCSCIENCE)

Phase2 es un programa desarrollado por Rocscience para el análisis bidimensional de estructuras geotécnicas mediante el MEF. Este programa permite la generación de mallas bidimensionales de elementos finitos, ya sea con elementos triangulares cuadrangulares, e incluso la malla puede ser personalizada por el usuario.

El programa es útil para analizar modelos complejos en ingeniería geotécnica, como por ejemplo: túneles en roca débil, cavernas subterráneas, tajos abiertos, cimentaciones y taludes, además incorpora modelos constitutivos como el Cam-Clay, Mohr-Coulomb y el Criterio Generalizado de Hoek y Brown.

Este programa permite realizar el análisis tensión-deformación por etapas de cálculo, además incluye las opciones de modelado por deformación plana y simetría axial, permite importar la geometría y propiedades de los materiales. A partir de la versión 7.0, el programa incluye la alternativa de modelamiento explícito de los planos de las discontinuidades (Método J-MEF) y además incorpora la opción de calcular el factor de seguridad mediante la reducción de los parámetros de resistencia al corte (SSR), considerando los criterios de rotura de Mohr - Coulomb o el de Hoek y Brown.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

✓ **Talud**

Un “talud” es una masa de tierra que no es plana sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente (Suarez, 2009).

✓ **Factor de Seguridad (F. S.)**

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

F.S.=Resistencia al cortante disponible/Esfuerzo al cortante actuante

✓ **Macizo rocoso**

Masa rocosa afectada por discontinuidades o superficies de debilidad. (González, 2002).

✓ **Superficie de falla**

El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud (Suarez, 2009).

✓ **Cohesión**

Adherencia de los fragmentos, partículas o granos de las rocas, que ejercen unos a otros ayudados por la matriz o cementante. El grado de diagénesis o litificación se manifiesta en la cohesión de los fragmentos, a mayor diagénesis mayor cohesión (Dávila, 2011).

✓ **Ángulo de fricción interna**

Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad y fue descrito inicialmente por Amonton G. en el año 1699 (Lambe T. y Whitman R.1991)

✓ **Estabilidad**

Estado y condición de una estructura o de una masa de material cuando puede soportar los esfuerzos aplicados durante largo tiempo sin sufrir una deformación o movimiento apreciable que no se recupere o devuelva al retirar la carga (Hoyos, 2012)

✓ **Inestabilidad**

Es la ocurrencia de grandes deformaciones estructurales o tiene signos de movimientos que son el resultado de la aplicación de esfuerzos (Long, 2006)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN

La carretera está trazada en los Andes del norte Peruano, en el cuadrángulo de Celendín (14-g); con coordenadas UTM – DATUM - WGS84 – ZONA - 17S (ver Anexo 3, plano N° 01). En la cuenca del Atlántico, desde los 2558 m.s.n.m hasta los 2080 m.s.n.m.

Tomando como referencia a la ciudad de Bambamarca, el punto de inicio del tramo a estudiar es el Km 13 +200 y el punto final el Km 16 + 826.

Tabla 7 Coordenadas del tramo de estudio.

	Longitud	Latitud
Punto Inicial (Km 13 + 200)	781390.34	9270154.48
Punto Final (Km 16+ 826)	782931.01	9271828.60

Políticamente se encuentra ubicado en (para mayor referencia ver anexo 6):

Tabla 8 Ubicación Política del tramo de estudio.

Región	Cajamarca
Provincia	Hualgayoc
Distrito	Bambamarca
Comunidades	Santa Rosa, Tuco Bajo, Piñipata

3.2 ACCESIBILIDAD

El acceso al punto inicial del área de estudio se realiza en dos tramos; primero, desde la ciudad de Cajamarca hasta la ciudad de Bambamarca, y el segundo tramo desde la ciudad de Bambamarca hasta la comunidad de Santa Rosa. Desde Bambamarca, para llegar a la comunidad de Santa Rosa, se puede tomar la ruta Bambamarca-Tuco Bajo o Bambamarca-La Paccha en Jr. San Carlos cuadra 01.

Tabla 9 Vías de acceso al tramo de estudio.

Ruta-Terrestre	Distancia (Km)	Vía	Estado
Cajamarca- Bambamarca	119	Asfaltada	Buena
Bambamarca-Santa Rosa	13.20	Afirmada	Mala

3.3 CLIMA

La zona de estudio se caracteriza por tener un clima templado y seco a través del año, la temperatura media anual se encuentra a 16 °C. La precipitación es de 792 mm al año, con altas precipitaciones pluviales en los meses de diciembre a abril y bajas precipitaciones de mayo a noviembre. Durante ambos períodos, la temperatura cae hasta los 4°C bajo cero y no sobrepasa los 21°C. (Ocón V. 2015)

3.4 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.4.1 TIPO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La metodología es descriptiva y analítica, siendo clave la utilización de datos obtenido a través de un sistema de recolección de datos.

Siendo un tipo de investigación explicativo y/o correlacional; explicativo, porque vamos determinar las causas de la inestabilidad y correlacional, porque determinaremos cómo influyen las variables litomorfoestructurales e hidrología en la inestabilidad de taludes.

3.4.2 ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS POR OBJETIVO

Para identificar los tramos inestables se realiza una observación de los taludes a lo largo de la carretera, una vez identificados, realizamos mediciones geométricas de los taludes

representativos; con los parámetros obtenidos de la caracterización geotécnica de suelos y/o rocas y los datos obtenidos en laboratorio y el Software RocLab se introducirán en los Softwares Slide (Método de equilibrio limite) y el Software Phase2 (Método de elementos finitos, con representación explícita de las discontinuidades) de los cuales se obtendrá un factor de seguridad que nos indicara cuan cerca está el talud de fallar, el grado de inestabilidad se mostrará en un mapa de zonificación de inestabilidad de taludes.

Para el cartografiado de las litomorfoestructuras se lograra mediante la toma de datos en campo utilizando equipo geológico: brújula geotécnica, GPS, Lupa, Picota de geólogo, protáctor; datos que serán apuntados en una libreta de campo para posteriormente plasmarlos en mapas geomorfológico, geológico-estructural. La caracterización geotécnica y geomecánico de suelos y rocas obtenidos en campo, en los ensayos de laboratorio de suelos y en el software RocLab son plasmados en un mapa geotécnico - geomecánico.

3.4.3 POBLACIÓN DE ESTUDIO

3.626 km de la carretera Bambamarca – Centro Poblado Tuco desde Santa Rosa hasta Tuco Bajo.

3.4.4 MUESTRA

Taludes inestables de la carretera Bambamarca – Centro Poblado Tuco, desde Santa Rosa hasta Tuco Bajo, en los cuales se realizará tres ensayos de mecánica de suelos.

3.4.5 UNIDAD DE ANÁLISIS

Taludes de suelo y roca a lo largo de la carretera Bambamarca – Centro Poblado Tuco desde el tramo Santa Rosa hasta Tuco Bajo.

3.4.6 DELIMITACIÓN TEMPORAL

El estudio de investigación tendrá una duración de 10 meses (marzo –diciembre 2016).

3.4.6 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Técnicas

➤ **Cartografiado Litológico.**

Identificación y delimitación de las unidades litológicas presentes en el área de estudio.

➤ **Cartografiado Geomorfológico.**

Identificación de tipos de relieve o formas del terreno y sus límites.

➤ **Cartografiado estructural.**

Parametrización y caracterización de estructuras geológicas elementales: rumbos, buzamientos, fallas, familias de diaclasas

➤ **Análisis geotécnico e inestabilidad.**

- Caracterización geométrica y geotécnica de los taludes inestables de suelos y rocas.
- Obtención del factor de seguridad mediante equilibrio límite y elementos finitos mediante los Softwares Slide y Phase2 respectivamente.

Instrumentos y Equipos

➤ **Imágenes satelitales**

Es la representación visual de las características del terreno, capturada por un sensor colocado en un satélite artificial. Las imágenes obtenidas se observa y verificar estructuras, drenaje, accesos, cerros, caseríos, escarpes y procesos geodinámicos antiguos y/o actuales.

➤ **Modelo digital de elevaciones (MDE)**

Es una representación visual y matemática de los valores de altura mediante un conjunto de cotas con respecto al nivel medio del mar. En este plano se interpretó y digitalizó el área de estudio, se caracterizó las formas del relieve tomando en consideración las curvas de nivel.

➤ **Brújula tipo Brunton Azimutal.**

Utilizado para la toma de datos de direcciones de discontinuidades y planos de estratificación.

➤ **GPS navegador Garmin epx.**

Instrumento utilizado para la obtención de las coordenadas para la ubicación de puntos con coordenadas del sistema UTM, DATUM WGS-84.

➤ **Flexómetro de 5m y Wincha de 50m**

El flexómetro se utilizó para medir longitudes pequeñas, como espaciamiento, persistencia, abertura entre diaclasas y la Wincha se utilizó para medir longitud y ancho de los taludes.

➤ **Protactor escalas 1:500, 1:1000**

Utilizado para trazar ángulos y medir distancias a escalas determinadas. Se utilizó para plotear todos los puntos, Dip y Dip-Direction (estructuras) tomadas en campo.

➤ **Picota de Geólogo**

Herramienta necesaria para extraer muestras de roca y probar la resistencia de las mismas en campo.

➤ **Tablas geotécnicas**

Utilizados como guías para la documentación de las propiedades de resistencia de los macizos rocosos.

➤ **Libreta de campo.**

Elemento didáctico destinado al registro de las observaciones que se realizan en campo, gabinete y/o laboratorio. Se utilizó para anotar observaciones de carácter geológico, estructural, geohidrológico, hidrológico y geodinámico; tomadas en campo y gabinete.

➤ **Cámara fotográfica digital.**

Dispositivo electrónico usado para capturar y almacenar fotografías, sonidos y videos electrónicamente en un formato digital. Se utilizó para capturar las fotografías de las características de estructuras, deslizamientos, geoformas, etc., que nos ayudarían en la investigación.

➤ **Computadora-Laptop**

Para la elaboración de la presente tesis se utilizó el software Microsoft Office, para el análisis de estabilidad los Softwares Slide y Phase2 y para la elaboración de planos se utilizó el software ArcGis 10.3.

3.5 PROCEDIMIENTO

3.5.1 ETAPA DE GABINETE I

Esta etapa se conforman en dos fases: la primera; antes de comenzar el trabajo en campo con recopilación de información referente al tema de investigación, información de estudios realizados en la zona, obtención de mapas geológicos, geomorfológicos, satelitales y finalmente realizar una planificación de tareas a realizar. La segunda fase lo conforma campañas de campo constituyendo un análisis e interpretaciones de los datos obtenidos en campo.

3.5.2 ETAPA DE CAMPO

Aquí ejecutamos lo planificado en laboratorio, realizando las mediciones geométricas y caracterización geomecánica mediante los formatos de toma de datos, además se realiza el cartografiado geológico y geotécnico.

a) Para la recolección de datos en el formato para la caracterización de macizo rocoso modificado por Rodríguez R. y Alcántara E. Se procede de la siguiente manera:

- Primero codificamos la estación, apuntamos fecha y procedemos a tomar las coordenadas GPS (en el sistema WGS-84).
- Describimos el macizo rocoso empezando por la litología y si es posible la Formación geológica, grado de meteorización, clasificamos la calidad del macizo rocoso de acuerdo a su calidad utilizando el GSI.
- Finalmente con el martillo de Geólogo golpeamos la roca para calcular empíricamente su resistencia.

b) Para la recolección de datos en los formatos para la caracterización de taludes de rocas, se procede de la siguiente manera:

- Codificamos la estación, apuntamos fecha y procedemos a tomar las coordenadas GPS (en el sistema WGS-84).
- Caracterizamos el macizo rocoso del talud, empezando por la litología, caracterización de las familias de discontinuidades más críticas y cálculo el GSI.
- Medimos el rumbo y buzamiento de la cara, pie y cabeza del talud, usando una wincha o flexómetro medimos la altura y ancho del pie del talud.
- Finalmente con el martillo de Geólogo golpeamos la roca para calcular empíricamente su resistencia.

c) Para la recolección de datos en los formatos para la caracterización de taludes de suelos, se procede de la siguiente manera:

- Codificamos la estación, anotamos la fecha y coordenadas GPS (en el sistema WGS-84).
- Se caracteriza el talud del suelo, identificando tipo de depósito y la alteración.
- Luego medimos el rumbo, buzamiento de la cara, cabeza y pie del Talud y medimos con una wincha o flexómetro la altura y pie del talud.
- Finalmente clasificamos el suelo empíricamente de acuerdo al sistema de clasificación de suelos USCS.

3.5.3 ETAPA DE GABINETE II

En esta fase toda la data de campo fue estudiada, analizada y procesada, los resultados plasmados en cuadros, figuras y planos.

Los datos obtenidos en la ficha de registro geológico - geotécnico como: GSI, índice de resistencia, factor de disturbación, los cuales se introducirán en el Software RocLab, obteniendo las constantes empíricas del macizo rocoso (m, s y a) y los parámetros resistentes del macizo (C y \emptyset). Y los parámetros obtenidos en laboratorio de suelos se introducen en los Softwares Slide y Phase2 para obtener el factor de seguridad, los cuales nos indicaran el grado de inestabilidad de los taludes.

3.6 TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.6.1 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

A. Planicies (0° A 8°)

Estas geoformas en el área de estudio ocupan el 4.67% del área total, siendo conformados por remanentes topográficos de la superficie de erosión. Presentan una cobertura de depósitos fluvio-aluviales a márgenes del río Llaucano, con un aspecto de paisajes llanos abiertos. Son aprovechados por los comuneros como áreas de cultivo de plátano y café.



Figura 5 Planicie en la comunidad de Piñipata (E: 782056, N: 9270731)

B. Lomadas (8° a 20°)

Son las geoformas con más extensión en la zona con 49.50% del área total, se pueden ver en tres tramos de la carretera; dos de los cuales están siendo afectados por procesos geodinámicas de movimientos de masas en las comunidades de Santa Rosa y Piñipata (Km

13+200 hasta Km 13+472.4 y Km 14+188.4 hasta Km 14+765.7 respectivamente) y el tercero desde Km 16+140.3 hasta el final del tramo estudiado (Km 16+626.2).



Figura 6 Lomada en la comunidad de Piñipata (E: 782288, N: 9271408)

C. Laderas (20° a 50°)

Estas geoformas se encuentran en dos tramos de la carretera (Km 13+472.4 hasta Km 14+188.4 y Km 14+765.7 hasta Km 16+140.3), ocupando una extensión del 45.58% del área de estudio, está constituido litológicamente por areniscas, lutitas y mantos de carbón pertenecientes al grupo Goyllarisquizga; con variaciones en su conformación morfológica, debido a los agentes erosivos y los cambios litológicos y en especial a su comportamiento frente a las deformaciones estructurales que han actuado, los cuales han dado lugar a las geoformas actuales.



Figura 7 Ladera en la comunidad de Piñipata (E: 782056, N: 9270731)

D. Escarpas (50° a más)

Este tipo de unidad geomorfológica es comúnmente generadora de zonas críticas por su alta pendiente, y al ser sometidas a procesos de excavación mecánica entran en estado de desequilibrio continuo y son muy difíciles de estabilizar. Ocupan una extensión del 0.24% en el área de estudio. Desde el Km 13+913.7 hasta Km 13+967 en areniscas del Grupo Goyllarisquizga, encontramos escarpas con fuertes pendientes de hasta 80° debido principalmente al retrabajo de los agentes geodinámicos sobre los macizos rocosos.

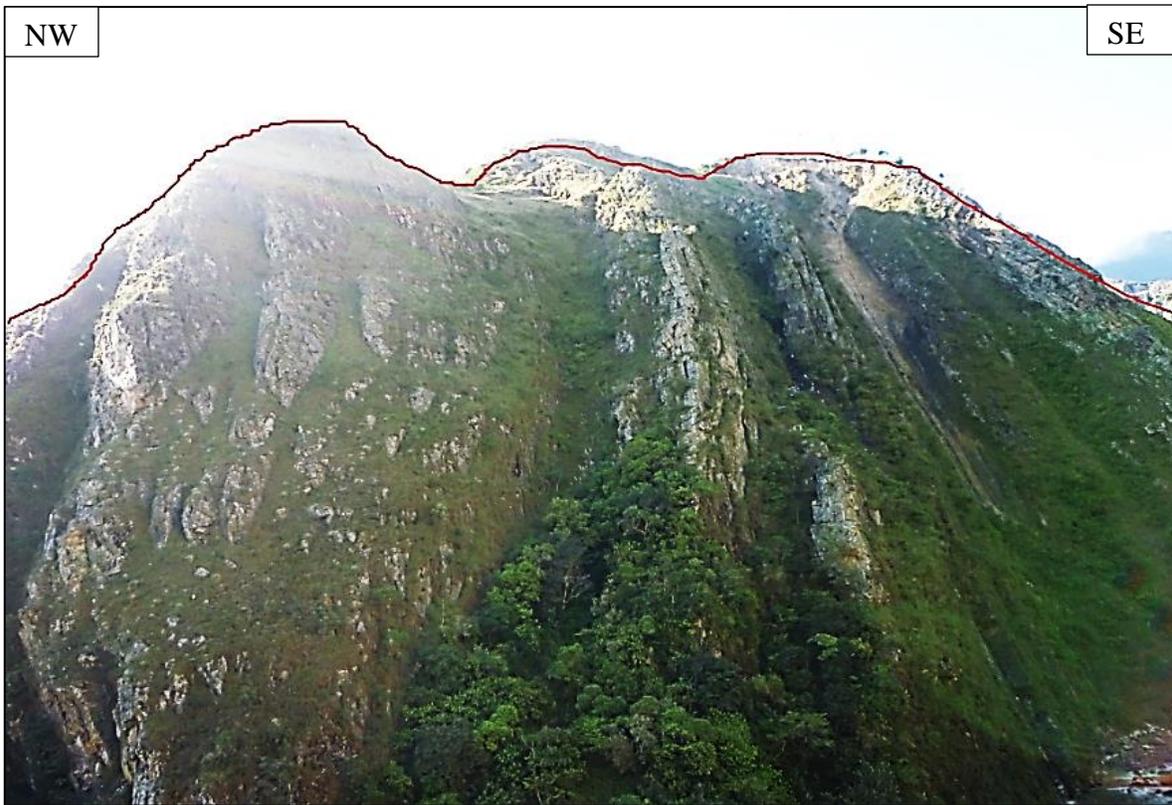


Figura 8 Escarpes entre las comunidades de Piñipata y Tuco Bajo (E: 782199, N: 9271902)

3.6.2 UNIDADES LITOLÓGICAS LOCALES

La geología local de la zona de estudio está compuesta por rocas sedimentarias del Grupo Goyllarisquizga y depósitos que cubren la mayor parte del área de estudio.

A. GRUPO GOYLLARISQUIZGA (Ki-g)

Esta unidad está compuesta por la alternancia de areniscas, lutitas y mantos de carbón, en los cuales se puede observar estratos gruesos y delgados con estructuras de estratificación cruzada y marcas de oleaje. Ocupa una extensión del 63.25 % del total del área de estudio.

Los tramos en los cuales es visible el Grupo Goyllarisquizga se describen a continuación:

Tramo Km 13+315 a Km 13+451 y Tramo Km 13+571 a Km 14+547: areniscas ferruginosas y blanquecinas de grano medio respectivamente, las areniscas blanquecinas también son visibles en el Km 16+779 a Km 16+826.



Figura 9 Areniscas blanquecinas en Tramo Km 13+571 a Km 14+547

En el Tramo Km 14+685 a Km 16+400, se ven areniscas de grano medio, con una coloración negruzca por estar en contacto con la capa de carbón que la suprayace, en este tramo también hay intercalación de estratos de areniscas con lutitas.

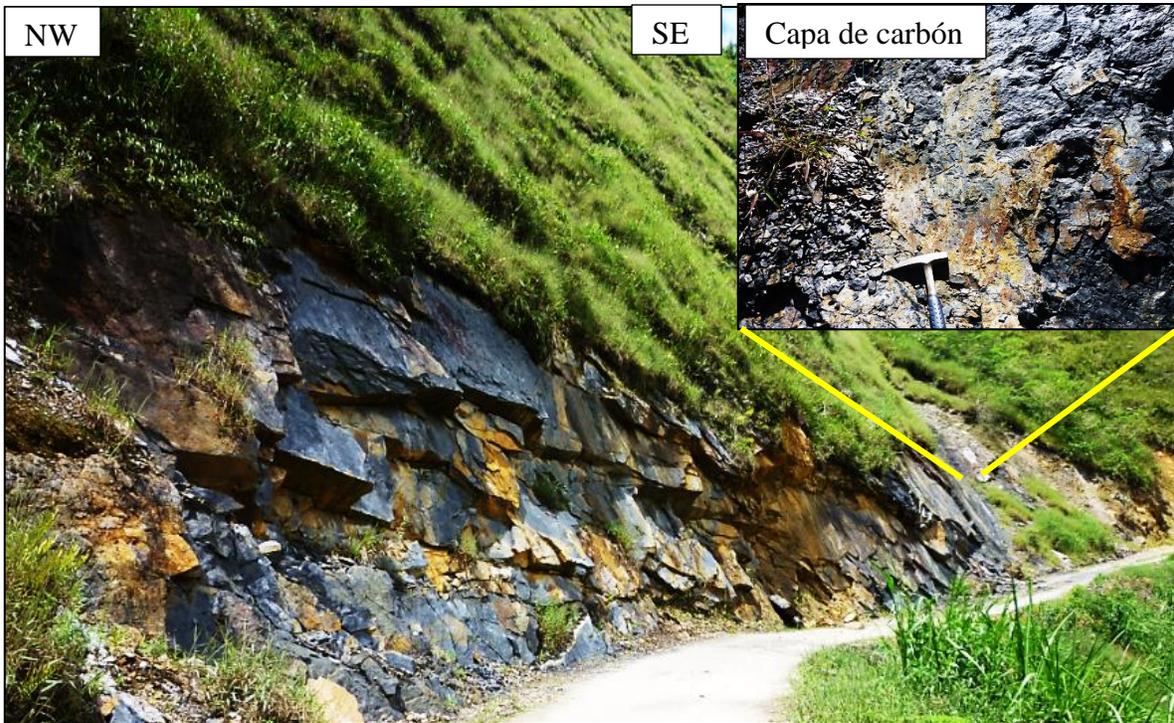


Figura 10 Areniscas negruzcas del Grupo Goyllarisquiza en el Tramo Km 14+685 a Km 16+400, con la presencia de una capa de carbón.

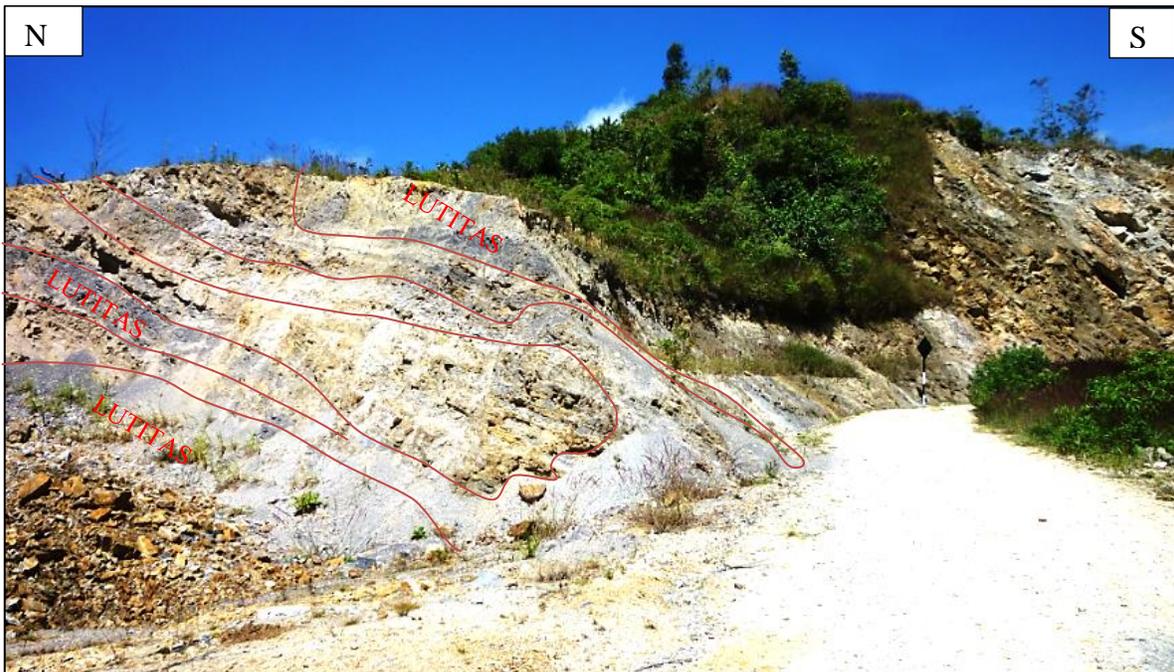


Figura 11 Intercalación de areniscas y lutitas del Grupo Goyllarisquiza en el Tramo Km 14+685 a Km 16+400.

B. DEPÓSITOS COLUVIALES (Q-co)

Estos depósitos están constituidos por fragmentos de areniscas angulosos y subangulosos y matriz arenosa y limoarcillosa, presentando una fábrica matriz soportada y en algunos tramos clasto soportado. Se encuentran localizados en las zonas inferiores de las laderas de los cerros y en áreas de poca pendiente. Ocupa una extensión del 30.18 % del total del área de estudio. En el ara de estudio se encuentran en los siguientes tramos: Tramos Km 13+200 a Km 13+315 y Km 13+451 a Km 13+571, zona que está sometida a proceso de movimientos de masas y erosión hídrica por la quebrada Santa Rosa, el deposito está constituido de bloques, cantos y gravas angulosos y subangulosos de areniscas en una matriz arenolimososa; Tramo Km 14+547 a Km 14+685, constituido por fragmentos de areniscas angulosas en una matriz limoarenosa, depositado por acción de la gravedad y en el tramo del Km 16+400 a Km 16+779, en la zona de Tuco Bajo por acción de la gravedad y acción del agua que han depositado fragmentos de arenisca en una matriz arcillo arenosa.



Figura 12 Depósito coluvial en el talud de la carretera (la carretera tiene un ancho de 7m aprox.) en el tramo del Km 14+547 a Km 14+685.

C. DEPÓSITO COLUVIO-ALUVIAL (Q-co/al)

Depósitos que ocupan una extensión del 3.26 % del área total de estudio, ubicados en la comunidad de Tuco Bajo que han sido transportado por la acción de la gravedad y agua, están compuestas por cantos subredondeados y redondeados en una matriz arenoarcillosa. No están visibles en el tramo de estudio.

D. DEPÓSITO FLUVIALES (Q-fl)

Son depósitos de rocas policmíticas subredondeadas y redondeadas con sedimentos acumulados en el curso del río Llaucano, su tamaño varía desde la arcilla hasta las gravas, cantos y bloques. En el área de estudio es visible en la zona de Piñipata al inicio del Km 13+200, no es visible en los taludes de la carretera del tramo sujeto a investigación. Ocupa una extensión del 3.31 % del total del área de estudio.

4.6.3 UNIDADES ESTRUCTURALES DISCONTINUAS

El análisis estructural realizado en la zona permitió determinar la presencia de fallas de origen tectónico, del tipo normales en el tramo que abarca las comunidades de Piñipata y Tuco Bajo. Las denominaciones de las fallas será de acuerdo al lugar donde se han identificado.

A. Falla Piñipata 1.

La falla Piñipata 1 corta al talud de carretera de Bambamarca hacia Tuco Bajo, a la altura del Km 14+776 en areniscas del Grupo Goyllarisquizga. Esta falla es del tipo normal, con rumbo de 301°, buzamiento de 53° hacia el NE y pitch de 95°. Es visible la presencia de brecha y milonita, que están siendo erosionados y meteorizados por los agentes meteorológicos, aunque estos procesos no tienen mucha incidencia en la estabilidad del talud, por lo cual no se ha realizado un análisis de este tramo.

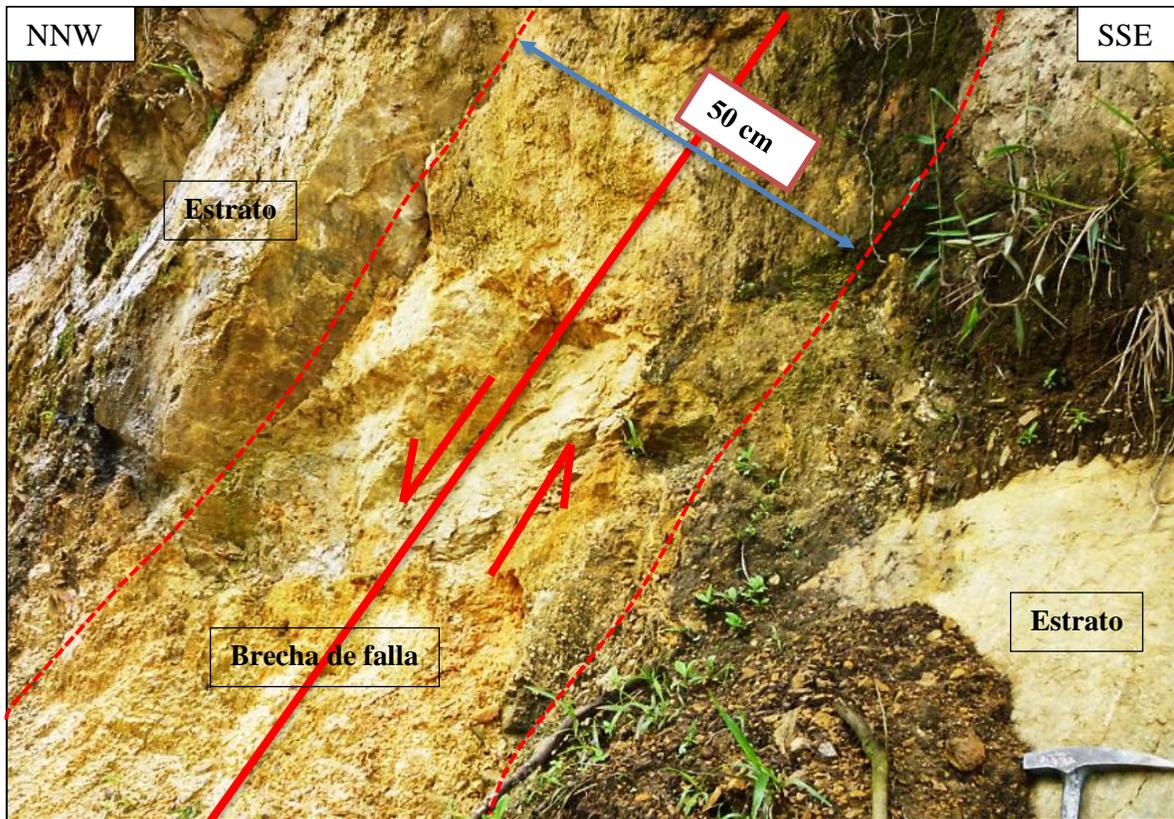


Figura 13 Falla Piñipata 1 ubicada a 1 km de la zona urbana de la comunidad de Tuco Bajo, es una falla normal (E: 782402, N: 9271033).

B. Falla Piñipata 2.

La falla Piñipata 2 corta al talud de carretera de Bambamarca hacia Tuco Bajo a altura del Km 15+515, entre areniscas del Grupo Goyllarisquizga.

Esta falla es del tipo Normal determinado mediante el análisis de los indicadores cinemáticos presentes en el plano de falla; con rumbo de 166° , buzamiento del plano de falla de 55° hacia el SW y pitch de 133° . El plano de falla es paralela a la estratificación en el bloque piso la roca está fracturada y meteorizada, parte del bloque techo está cubierto con depósitos coluviales.



Figura 14 Falla Piñipata 2 del tipo Normal, ubicada en el tramo de la carretera Bambamarca-Tuco Bajo en el Km 15+515 (E: 782287, N: 9271683).

C. Falla Tuco 1.

La falla Tuco 1 corta al talud de carretera de Bambamarca hacia Tuco Bajo, a la altura del Km 15+774, entre areniscas del Grupo Goyllarisquizga.

Esta falla es del tipo Normal, determinado mediante el análisis de los indicadores cinemáticos presentes en el plano de falla; tiene rumbo de 24° y con buzamiento de 59° hacia el SE y pitch 83° . A ambos lados del plano de falla, la roca esta craquelada debido a los desplazamientos de los bloques.

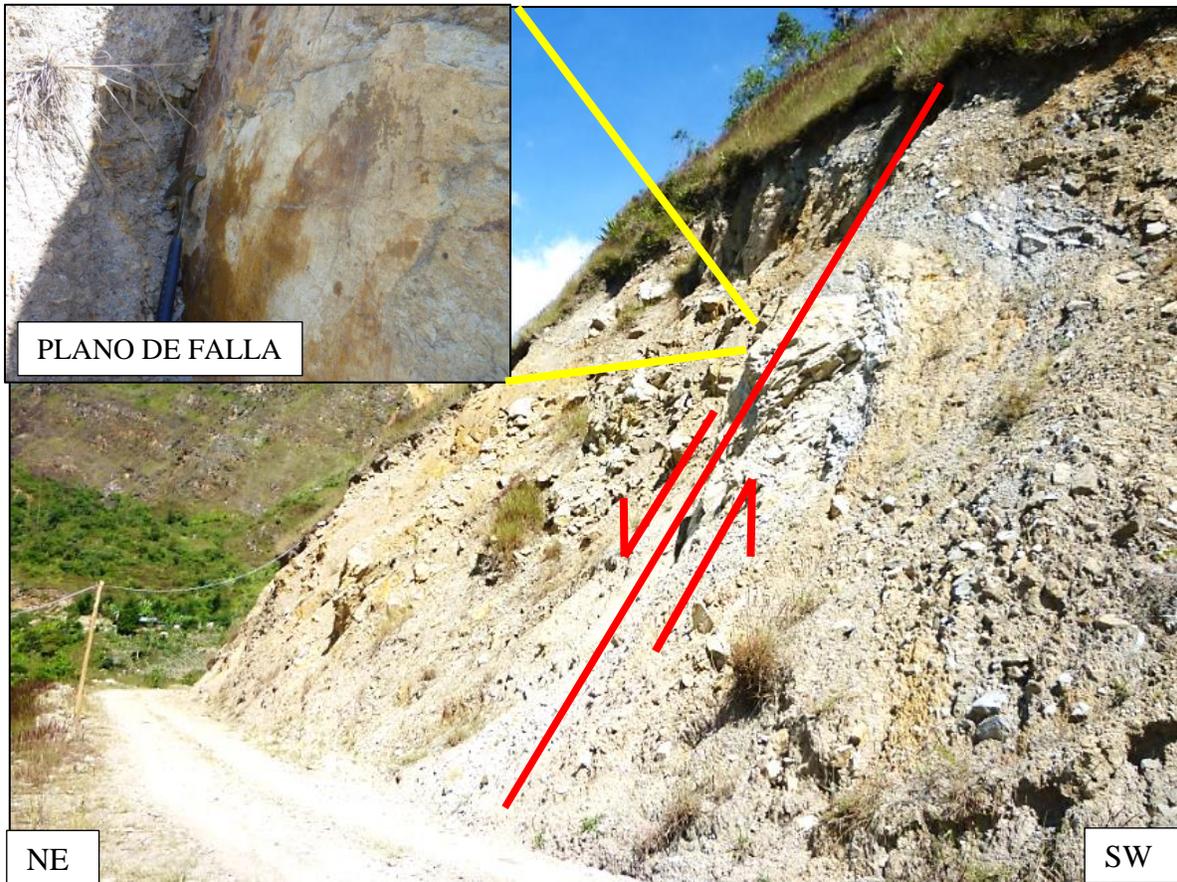


Figura 15 Falla Tuco 1 del tipo Normal, ubicada en el tramo de la carretera Bambamaca-Tuco Bajo en el Km 15+774 (E: 782388, N: 9271703).

4.6.4 HIDROLOGÍA

Hidrográficamente la zona de estudio se encuentra ubicada en la cuenca del río Llaucano, perteneciente a la vertiente del Atlántico. El tramo estudiado está influenciado por dos ríos y dos quebradas.

4.7.4.1 RÍOS

A. Río Llaucano

El río Llaucano tiene una dirección aproximadamente paralela a la carretera de estudio con una dirección Suroeste-Noreste, tiene un caudal aproximado de 15.277 m³/seg, siendo los meses de diciembre a abril con mayor caudal debido al aumento de las lluvias (Pantoja, 2013).

B. Río Rosas.

Río que tiene una dirección sureste a noreste atravesando los depósitos coluviales, afluyendo hacia el río Llaucano.

4.7.4.2 QUEBRADAS

En el área de estudio se ha contabilizado dos quebradas que tienen una dirección Sureste a Noroeste siendo afluentes al río Llaucano.

A. Quebrada San Rosa.

Quebrada que marca el inicio del tramo en estudio, tiene una dirección sureste a noreste atravesando los depósitos coluviales, afluyendo hacia el río Llaucano.

B. Quebrada El Amarillo.

Quebrada ubicada en la comunidad de Tuco Bajo, con una dirección sureste a noroeste y afluye hacia el río Llaucano. Atraviesa los depósitos coluviales y parte del Grupo Goyllarisquizga.

4.6.5 GEOTECNIA

En el tramo de Santa Rosa hacia Tuco bajo, se describe y caracteriza los taludes en los tramos que han sido identificados como críticos.

A. Talud N° 01: Tramo Km 13+200 – Km 13+468.1

Las coordenadas del Talud N° 01, son las siguientes:

Tabla 10 Coordenadas UTM del Talud N° 01 Tramo Km 13+200 – Km 13+468.1.

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	781389	9270153
FINAL	781619	9270214

a. Descripción del Talud

Este talud de suelo según la clasificación SUCS tipo CL (Arcillas inorgánicas de plasticidad baja, con grava, arcillas), levemente meteorizado con alto contenido de humedad; con características de inestabilidad debido a procesos de geodinámica externa al haber flujo lento de detritos y lodo. Hacia el final de éste tramo la carretera está siendo erosionado por el río Rosas. El peligro se intensifica en los meses de diciembre a abril la presencia de las lluvias.



Figura 16 Talud N° 01 (E: 781505, N: 9270195)

Tabla 11 Geometría del Talud N° 01

Altura del Talud.	3.5 m
Longitud del Pie.	5 m
Pendiente del Talud.	42°
Pendiente del Pie del Talud.	4°
Pendiente de la Cabecera del Talud.	6°

b. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del criterio equivalente Mohr-Coulomb utilizado para suelos utilizamos el Software RocData (ver anexo 3) y del estudio de mecánica de suelos (ver anexo 1).

Tabla 12 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 01 (obtenidos del estudio de mecánica de suelos y del Software RocDataV5)

	Cohesión (MPa)	0.022
Criterio Mohr-Coulomb	Angulo de fricción (°)	13.2
	Esfuerzo tensional (MPa)	0.5
	UCS (MPa)	0.055514
Peso Unitario	0.0174 MN/m ³	

FLUJO DE DETRITOS EN SANTA ROSA

Al inicio del tramo de estudio, en la comunidad de Santa Rosa el talud está siendo afectado por movimiento de masas al haber flujo de detritos que tiene una corona de 50m. aproximados y altura de escarpe de 2.5m., un ancho de 60m. y largo de 200m. La composición de la masa en movimiento consta de bloques y cantos de arenisca en una matriz soportada de arena y arcilla que favorece la infiltración del agua en la temporada de lluvias en los meses de diciembre a abril, cuya saturación y aumento de la presión intersticial del suelo activa el movimiento de masas.

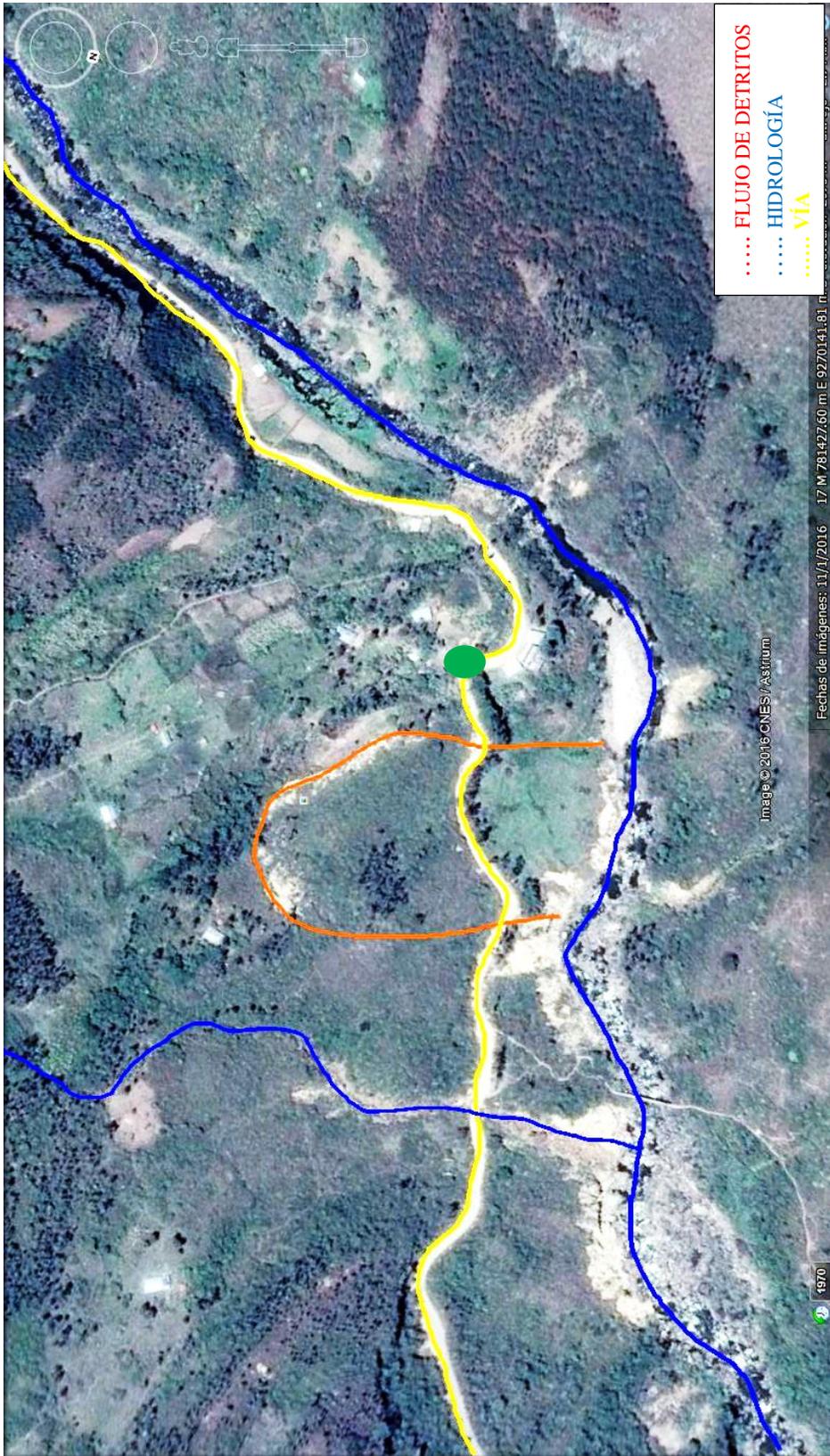


Figura 17 Flujo de detritos en la comunidad de Santa Rosa (E: 781444, N: 9270164) (Google Earth-2016)



Figura 18 Vista de escarpe principal y cuerpo del flujo de detritos.

B. Talud N° 02: Tramo Km 13+569.63 – Km 13+716.8

Las coordenadas del Talud N° 02, son las siguientes:

Tabla 13 Coordenadas UTM del Talud N° 02 Tramo Km 13+569.3– Km 13+716.8.

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	781718	9270204
FINAL	781840	9270284

a. Descripción del Talud

Talud de suelos con cierta estabilidad, según la clasificación SUCS el suelo es de un tipo CL (arcillas inorgánicas de plasticidad baja con arena, gravas y limos), teniendo como basamento

a rocas areniscas del Grupo Goyllarisquizga. Está siendo erosionado por el flujo del agua en la cara del talud, la vegetación en la cabecera del talud lo protege de la erosión hídrica.



Figura 19 Talud N° 02 (E: 781773, N: 9270236)

Tabla 14 Geometría del Talud N° 02

Altura del Talud.	7.5 m
Longitud del Pie.	5 m
Pendiente del Talud.	69°
Pendiente del Pie del Talud.	5°
Pendiente de la cabecera del Talud.	25°

b. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del criterio equivalente Mohr-Coulomb utilizado para suelos utilizamos el Software RocDataV5 (ver anexo 3) y el estudio de mecánica de suelos (ver anexo 1).

Tabla 15 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 02 (obtenidos de Estudio de mecánica de suelos y Software RocDataV5).

	Cohesión (MPa)	0.022
Criterio Mohr-Coulomb	Angulo de fricción (°)	13.2
	Esfuerzo tensional (MPa)	0.5
	UCS (MPa)	0.055514
Peso Unitario	0.01862 MN/m ³	

C. Talud N° 03: Tramo Km 13+832.26 – Km 13+976.46

a. Descripción del Talud

Las coordenadas del Talud N° 03, son las siguientes:

Tabla 16 Coordenadas UTM de Talud N° 03 Tramo Km 13+832.26–Km 13+976.46

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	781863	9270391
FINAL	781957	9270464

Este talud está en condiciones inestables, litológicamente está conformado por areniscas con alto grado de fracturamiento en bloques tabulares y angulares formado por 4 familias de discontinuidades, las discontinuidades tiene un superficie ligeramente rugosas con una leve meteorización, sobre las arenisca suprayace depósitos de suelos coluviales, con bloques y gravas de areniscas en una matriz arenosa. Geodinámicamente, el fracturamiento del macizo rocoso y la disturbación por la apertura de la carretera generan la caída de rocas y el flujo de suelo hacia la plataforma de la carretera, teniendo como agente detonante al agua producido por las precipitaciones y la sismicidad por el tránsito de vehículos.



Figura 20 Talud N° 03 en macizo rocos de areniscas (E: 781899, N: 9270450).

Tabla 17 Geometría del Talud N° 03

Altura del Talud.	22 m
Longitud del pie.	4 m
Pendiente del Talud.	81°
Pendiente del pie del Talud.	5°
Pendiente de la cabecera del Talud.	21°

b. Asignación GSI del macizo rocoso

Rock Type: <input type="text" value="General"/>		SURFACE CONDITIONS				
GSI Selection: <input type="text" value="50"/> <input type="button" value="OK"/>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					20
						10
		N/A	N/A			

Tabla 18 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 03.

c. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del equivalente Mohr-Coulomb, Criterio Hoek-Brown y los Parámetros del Macizo Rocosos se utiliza el Software RocDataV5.

Tabla 19 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 03 (Software RocDataV5)

Propiedad	Valor
Módulo de Young (MPa)	2212.7
Coefficiente de Poisson	0.3
Peso específico (MN/m ³)	0.026
Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa)	75
GSI/ GSI _{res}	50/40
Parámetro de la roca intacta, mi	17
Factor de disturbancia, D	0.7
Parámetro m _b	1.090
Parámetro s	0.0007
Parámetro a	0.506
Parámetro mb _{res}	0.629
Parámetro s _{res}	0.0002
Parámetro a _{res}	0.511

En la parte superior del macizo rocoso, en la cabecera del talud hay un depósito coluvial de un suelo según la clasificación SUCS del tipo SP (Mezcla de arena y grava con pocos finos) tiene los siguientes parámetros.

Tabla 20 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 03 (Software RocDataV5)

Criterio Mohr- Coulomb	Cohesión (MPa)	0.003
	Angulo de fricción (°)	28
	Esfuerzo tensional (MPa)	0.0
	UCS (MPa)	0.009986
Peso Unitario	0.0167 MN/m ³	

d. Propiedades de la roca intacta y las discontinuidades

Para el análisis mediante elementos finitos con el software Phase2, introducimos las familias de discontinuidades más críticas, la familia C1 (estratificación) interseca al talud y la familia C2 interseca a la familia C1.

Tabla 21 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 03 (Obtenidos del Software RocDataV5)

MATERIAL	PROPIEDADES
ROCA INTACTA	Módulo de Young (MPa) = 2212.7
	Coefficiente de Poisson = 0.3
	Peso específico (MN/m ³) = 0.026
	Resistencia a la tracción = 0 MPa
	Cohesión = 0.253 Mpa
	Angulo de fricción = 49.31
	Angulo de dilatancia = 0
DISCONTINUIDADES	Buzamiento de Familia C1 = 31°
	Buzamiento de Familia C2 = 87°
	Dip Direction de la Familia C1 = 155
	Dip Direction de la Familia C2 = 210
	Espaciamiento prom. Fam. C1 = 0.5m
	Espaciamiento prom. Fam. C2 = 0.8m
	Angulo de fricción = 43°
Cohesión = 0 Mpa	

D. Talud N° 04: Tramo Km 14+869 – Km 14+961

Las coordenadas del Talud N° 04, son las siguientes:

Tabla 22 Coordenadas UTM del Talud N° 04 Tramo Km 14+869 – Km 14+961

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	782357	9271210
FINAL	782374	9271124

a. Descripción del Talud



Figura 21 Talud N° 04 (E: 782375, N: 9271166)

Talud de suelos que según la clasificación SUC es un suelo del tipo CL (Arcillas inorgánicas de plasticidad media con arena gruesa a fina), con coloración rojiza debido a la influencia de los óxidos de hierro de las areniscas; con características de inestabilidad debido a procesos de geodinámica externa (flujo de suelo) debido a la erosión hídrica del suelo y la alta

pendiente de la cara del talud. La vegetación existente en la cabecera del talud protege de la acción de los agentes atmosféricos.

Tabla 23 Geometría del Talud N° 04.

Altura del talud.	4.7 m
Longitud del pie.	6.4 m
Pendiente del talud.	84°
Pendiente del pie del talud.	4°
Pendiente de la cabecera del Talud.	30°

b. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del equivalente Mohr-Coulomb criterio utilizado para suelos utilizamos el Software RocData (ver anexo 3) y los parámetros obtenidos de la calicata 02 del estudio de mecánica de suelos (ver anexo 1)

Tabla 24 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 04 (Software RocDataV5 y Estudio de mecánica de suelos)

	Cohesión (MPa)	0.022
Criterio Mohr-Coulomb	Angulo de fricción (°)	13.2
	Esfuerzo tensional (MPa)	0.005
	UCS (MPa)	0.05551
Peso Unitario	0.0174 MN/m ³	

E. Talud N° 05: Tramo Km 15+13.7 – Km 15+79.5

Las coordenadas del Talud N° 05, son las siguientes:

Tabla 25 Coordenadas UTM del Talud N° 05 Tramo Km 15+13.7 – Km 15+79.5

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	782354	9271267
FINAL	782325	9271324

a. Descripción del Talud

Talud compuesto litológicamente de areniscas de grano medio, con un estrato de 20 cm de carbón al inicio del talud con indicios de inestabilidad, con fracturamiento en bloques cúbicos y angulares con 4 familias de discontinuidades dominantes. Las discontinuidades tienen superficie moderadamente meteorizadas, las superficies de las discontinuidades del carbón son suaves. Geodinámicamente, la alteración de la estabilidad original del macizo rocoso por la apertura de la carretera, la pendiente de la cara del talud con la inclinación de los estratos a favor de la pendiente y la alteración de las superficies de las familias de las discontinuidades producen la caída de rocas, afectando a la plataforma de la carretera.



Figura 22 Talud N° 05 (E: 782352, N: 9271284).

Tabla 26 Geometría del Talud N° 05.

Altura del Talud.	7.2 m
Longitud del pie.	6 m
Pendiente del talud.	62°
Pendiente del pie del talud.	8°
Pendiente de la cabecera del talud.	70°

b. Caracterización del Macizo Rocosó (GSI)

Rock Type: <input type="text" value="General"/>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="48"/> <input type="button" value="OK"/>		DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets			60	48	
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50	40	
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Tabla 27 Asignación del GSI del macizo rocosó del Talud N° 05.

c. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del equivalente Mohr-Coulomb, Criterio Hoek-Brown y los Parámetros del Macizo Rocoso se utiliza el Software RocDataV5 (ver anexo 3)

Tabla 28 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 05 (obtenidos de RocDataV5)

Propiedad	Valor
Módulo de Young (MPa)	1228.29
Coefficiente de Poisson	0.3
Peso específico (MN/m ³)	0.026
Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa)	75
GSI/ GSI _{res}	48/38
Parámetro de la roca intacta, mi	17
Factor de disturbancia, D	1
Parámetro m _b	0.414
Parámetro s	0.0002
Parámetro a	0.507
Parámetro m _{bres}	0.203
Parámetro s _{res}	3.25305e-005
Parámetro a _{res}	0.513

d. Propiedades de la roca intacta y las discontinuidades

Para el análisis mediante elementos finitos con el software Phase2, introducimos dos de las familias de discontinuidades más críticas, la familia E1 (estratificación) paralela a la cara del talud y la familia E2 interseca a la familia E1.

Tabla 29 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 05 (obtenidos de RocData V5)

MATERIAL	PROPIEDADES
ROCA INTACTA	Módulo de Young (MPa) = 1228.29 Coeficiente de Poisson = 0.3 Peso específico (MN/m ³) = 0.026 Resistencia a la tracción = 0 MPa Cohesión = 0.146 Mpa Angulo de fricción = 55.28 Angulo de dilatación = 0
DISCONTINUIDADES	Buzamiento de Familia E1 = 61° Buzamiento de Familia E2 = 86° Dip Direction de la Familia E1 = 260 Dip Direction de la Familia ED2 = 340 Espaciamiento prom. Fam. E1 = 0.7m Espaciamiento prom. Fam. E2 = 1.0m Angulo de fricción = 43° Cohesión = 0 Mpa

F. Talud N° 06: Tramo Km 15+194.4 – Km 15+275.1

Las coordenadas del Talud N° 06, son las siguientes:

Tabla 30 Coordenadas UTM del Talud N° 06 Tramo Km 15+194.4 – Km 15+275.1

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	782318	9271341
FINAL	782305	9271418

a. Descripción del Talud

Talud litológicamente compuesto por areniscas de grano medio con indicios de inestabilidad, con fracturamiento en bloques tabulares y angulares con 4 familias dominantes de discontinuidades. Las superficies de las discontinuidades están moderadamente

meteorizadas. Geodinámicamente, la alteración de la estabilidad original del macizo rocoso por la apertura de la carretera, la alta pendiente de la cara del talud con la inclinación de los estratos a favor de la pendiente y la alteración de las superficies de las familias de las discontinuidades producen la caída de rocas, afectando a la plataforma de la carretera de Bambamarca-Tuco bajo, carretera Bambamarca-La Paccha, viviendas y cultivos ubicadas pendiente abajo.



Figura 23 Talud N° 06 (E: 782308, N: 9271398)

Tabla 31 Geometría del Talud N° 06.

Altura del talud.	15 m
Longitud del pie.	6 m
Pendiente del talud.	75°
Pendiente del pie del talud.	8°
Pendiente de la cabecera del Talud.	78°

b. Caracterización del Macizo Rocoso (GSI)

Rock Type: <input type="text" value="General"/> <input type="button" value="OK"/>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="49"/>		DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			60		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				50	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					40
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					30
						20
						10
		N/A	N/A			

Tabla 32 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 06.

c. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del equivalente Mohr-Coulomb, Criterio Hoek-Brown y los Parámetros del Macizo Rocoso se utiliza el Software RocDataV5.

Tabla 33 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 06 (Obtenidos del Software RocDataV5)

Propiedad	Valor
Módulo de Young (MPa)	1299.25
Coefficiente de Poisson	0.3
Peso específico (MN/m ³)	0.026
Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa)	75
GSI/ GSI _{res}	49/39
Parámetro de la roca intacta, mi	17
Factor de disturbancia, D	1
Parámetro m _b	0.445
Parámetro s	0.0002
Parámetro a	0.506
Parámetro mb _{res}	0.218
Parámetro s _{res}	3.84302e-005
Parámetro a _{res}	0.512

d. Propiedades de la roca intacta y las discontinuidades

Para el análisis mediante elementos finitos con el software Phase2 introducimos las familias de las discontinuidades más críticas, la familia F1 (estratificación) paralela a la cara del talud y la familia F2 interseca a la familia F1.

Tabla 34 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 06 obtenidos del software RocData.

MATERIAL	PROPIEDADES
ROCA INTACTA	Módulo de Young (MPa) = 1299.25
	Coefficiente de Poisson = 0.3
	Peso específico (MN/m ³) = 0.026
	Resistencia a la tracción = 0 MPa
	Cohesión = 0.204 Mpa
	Angulo de fricción = 51.32
	Angulo de dilatancia = 0

	PROPIEDADES
DISCONTINUIDADES	Buzamiento de Familia F1 = 57°
	Buzamiento de Familia F2 = 86°
	Dip Direction de la Familia F1 = 265
	Dip Direction de la Familia F2 = 340
	Espaciamiento prom. Fam. F1 = 0.8m
	Espaciamiento prom. Fam. F2 = 3.0m
	Angulo de fricción = 43°
	Cohesión = 0 Mpa

G. Talud N° 07: Tramo Km 15+541.8 – Km 15+617.4

Las coordenadas del Talud N° 07, son las siguientes:

Tabla 35 Coordenadas UTM del Talud N° 07 Tramo Km 15+541.8 – Km 15+617.4

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	782269	9271678
FINAL	782322	9271721

a. Descripción del Talud

Éste talud está compuesto litológicamente de areniscas de grano medio y estratos delgados de lutitas al inicio del talud, muy fracturado con 5 familias de discontinuidades dominantes. Las discontinuidades tienen superficies moderadamente meteorizadas y ligeramente suaves. Geodinámicamente, la alteración de la estabilidad original del macizo rocoso por la apertura de la carretera, el alto fracturamiento (con más notoriedad en la parte superior de la cara del talud) y la alteración de las superficies de las familias de las discontinuidades producen la caída de rocas, afectando a la plataforma de la carretera.



Figura 24 Talud N° 07 (E: 782305, N: 9271698).

Tabla 36 Geometría del Talud N° 07

Altura del talud.	8 m
Longitud del pie.	6 m
Pendiente del talud.	77°
Pendiente del pie del talud.	4°
Pendiente de la cabecera del Talud.	23°

b. Caracterización del Macizo Rocoso (GSI)

Rock Type: <input type="text" value="General"/>		SURFACE CONDITIONS				
GSI Selection: <input type="text" value="42"/> <input type="button" value="OK"/>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes				20	
		N/A	N/A			10

Tabla 37 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 07.

c. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del equivalente Mohr-Coulomb, Criterio Hoek-Brown y los Parámetros del Macizo Rocoso se utiliza el Software RocDataV5.

Tabla 38 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 07 (obtenidos del software RocDataV5).

Propiedad	Valor
Módulo de Young (MPa)	1347.26
Coefficiente de Poisson	0.3
Peso específico (MN/m ³)	0.026
Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa)	75
GSI/ GSI _{res}	42/32
Parámetro de la roca intacta, mi	17
Factor de disturbancia, D	0.7
Parámetro m _b	0.702
Parámetro s	0.0002
Parámetro a	0.510
Parámetro mb _{res}	0.132
Parámetro s _{res}	1.19673e-005
Parámetro a _{res}	0.520

d. Propiedades de la roca intacta y las discontinuidades

Para el análisis mediante elementos finitos con el software Phase2 introducimos las familias de las discontinuidades más críticas, la familia G1 (estratificación) paralela a la cara del talud, la familia G2 que interseca a la familia G1 y a la falla Piñipata 5.

Tabla 39 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 07 (obtenidos del software RocData).

MATERIAL	PROPIEDADES
ROCA INTACTA	Módulo de Young (MPa) = 1347.26
	Coefficiente de Poisson = 0.3
	Peso específico (MN/m ³) = 0.026
	Resistencia a la tracción = 0 MPa
	Cohesión = 0.159 Mpa
	Angulo de fricción = 58.35
	Angulo de dilatancia = 0

PROPIEDADES	
DISCONTINUIDADES	Buzamiento de Familia G1 = 45°
	Buzamiento de Familia G2 = 51°
	Dip Direction de la Familia G1 = 267
	Dip Direction de la Familia G2 = 42
	Espaciamiento prom. Fam. G1 = 0.2m
	Espaciamiento prom. Fam. G2 = 1.0m
	Dip de Falla Piñipata 5 = 55°
	Dip Direction de Falla Piñipata 5 = 256
	Angulo de fricción = 43°
	Cohesión = 0 Mpa

H. Talud N° 08: Tramo Km 15+699.8– Km 16+084.6.

Las coordenadas del Talud N° 08, son las siguientes:

Tabla 40 Coordenadas UTM del Talud N° 08 Tramo Km 15+699.8– Km 16+084.6

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	782319	9271801
FINAL	782495	9271487

a. Descripción del Talud

Talud compuesto litológicamente solo de areniscas al inicio del tramo pero hacia la mitad y final del tramo los estratos de areniscas van adelgazando (pasando de 20 cm a 10cm) con intercalación de lutitas de 25 cm de grosor en ciertos tramos. El grado de fracturamiento es alto debido a la acción de la falla local Tuco 1, las discontinuidades tienen superficies moderadamente meteorizadas y muy lisas, siendo baja la resistencia del macizo rocoso.



Figura 25 Talud N° 08 (E: 782356, N: 9271747).

Geodinámicamente, la alteración de la estabilidad original del macizo rocoso por la apertura de la carretera, la pendiente de la cara del talud y la alteración de las superficies de las discontinuidades por la acción del agua disminuyen la resistencia del macizo rocoso, produciéndose la caída de rocas y suelos afectando la plataforma de la carretera.

Tabla 41 Geometría del Talud N° 08.

Altura del talud.	21.0 m
Longitud del Pie.	6.4 m
Pendiente del talud.	54°
Pendiente del pie del talud.	9°
Pendiente de la cabecera del talud.	44°

b. Caracterización del Macizo Rocoso (GSI)

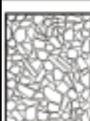
Rock Type: <input type="text" value="General"/>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="41"/> <input type="button" value="OK"/>						
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					20
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Tabla 42 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 08, en el tramo compuesto solo por areniscas.

Rock Type: <input type="text" value="Flysch"/> GSI Selection: <input type="text" value="37"/> <input type="button" value="OK"/>		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES				
COMPOSITION AND STRUCTURE		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
	A. Thick bedded, very blocky sandstone The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.	70	60			
	B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone		50			
	C. Sandstone and siltstone in similar amounts		40			
	D. Siltstone or silty shale with sandstone layers					
	E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers					
C, D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.						
	F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure			30		
	G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers					
	H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.					10
→ : Means deformation after tectonic disturbance						

Tabla 43 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 08, en el tramo compuesto por intercalación de areniscas y lutitas.

c. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del equivalente Mohr-Coulomb, Criterio Hoek-Brown y los Parámetros del Macizo Rocosos se utiliza el Software RocDataV5.

Tabla 44 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 08, en el tramo compuesto por areniscas (obtenidos del Software RocDataV5).

Propiedad	Valor
Módulo de Young (MPa)	860.93
Coeficiente de Poisson	0.3
Peso específico (MN/m ³)	0.026
Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa)	75
GSI/ GSI _{res}	41/31
Parámetro de la roca intacta, mi	17
Factor de disturbancia, D	0.7
Parámetro m _b	0.702
Parámetro s	2.236e-004

Propiedad	Valor
Parámetro a	0.511
Parámetro $m_{b_{res}}$	0.123
Parámetro s_{res}	1.01301e-005
Parámetro a_{res}	0.521

Tabla 45 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 08, en el tramo compuesto por areniscas y lutitas (Obtenido del Software RocDataV5).

Propiedad	Valor
Módulo de Young (MPa)	1483.3
Coefficiente de Poisson	0.3
Peso específico (MN/m ³)	0.025
Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa)	60
GSI/ GSI _{res}	37/27
Parámetro de la roca intacta, mi	10
Factor de disturbancia, D	1.00
Parámetro $m_b/m_{b_{res}}$	0.111/0.054
Parámetro s	2.75364e-005
Parámetro a	0.514
Parámetro s_{res}	5.201e-006
Parámetro a_{res}	0.527

d. Propiedades de la roca intacta y las discontinuidades

Para el análisis mediante elementos finitos con el software Phase2 introducimos las familias de las discontinuidades más críticas, la familia H1 (estratificación) paralela a la cara del talud, la familia H2 que interseca a la familia H1 y a la falla Tuco 1.

Tabla 46 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 08 (Obtenidos del Software RocdataV5).

MATERIAL	PROPIEDADES
ROCA INTACTA	Módulo de Young (MPa) = 860.9 / 1483.3
	Coefficiente de Poisson = 0.3
	Peso específico (MN/m ³) = 0.026 / 0.025
	Resistencia a la tracción = 0 MPa
	Cohesión = 0.170 / 0.113 Mpa
	Angulo de fricción = 44.42 / 35.86
	Angulo de dilatación = 0
DISCONTINUIDADES	Buzamiento de Familia H1 = 54°
	Buzamiento de Familia H2 = 52°
	Dip Direction de la Familia H1 = 174
	Dip Direction de la Familia H2 = 324
	Espaciamiento prom. Fam. H1 = 0.4 / 0.2 m
	Espaciamiento prom. Fam. H2 = 1.0 / 0.2 m
	Dip de Falla Tuco 1 = 59°
	Dip Direction de Falla Tuco 1 = 24
	Angulo de fricción = 43°
	Cohesión = 0 Mpa

I. Talud N° 09: Tramo Km 16+084.6 – Km 16+443.0

Las coordenadas del Talud N° 09, son las siguientes:

Tabla 47 Coordenadas UTM del Talud N° 09 Tramo Km 15+768.0 – Km 16+443.0

PUNTO	ESTE	NORTE
INICIAL	782496	9271487
FINAL	782813	9271393

a. Descripción del Talud

Talud de suelo y roca, el tipo de suelo según la clasificación SUCS es ML (Limo inorgánico de plasticidad media con arena fina a gruesa) en un deposito coluvial infrayaciendo areniscas del Grupo Goyllarisquizga, parte del tramo tiene características de inestabilidad debido al movimiento de masas al haber un deslizamiento del tipo rotacional que afecta a la cabecera y plataforma de la carretera, las condiciones de inestabilidad se incrementa en la temporada de lluvias.



Figura 26 Talud N° 09 (E: 782718, N: 9271427).

Tabla 48 Geometría del Talud N° 09.

Altura del Talud.	3.5 m
Longitud del pie.	6.0 m
Pendiente del talud.	62°
Pendiente del pie del talud.	7°
Pendiente de la cabecera del talud.	13°

b. Asignación GSI del macizo rocoso

Rock Type: <input type="text" value="General"/>		SURFACE CONDITIONS				
GSI Selection: <input type="text" value="40"/> <input type="button" value="OK"/>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Tabla 49 Asignación del GSI del macizo rocoso del Talud N° 09.

c. Parámetros obtenidos en el Programa RocData.

Para la obtención de los parámetros del equivalente Mohr-Coulomb, Criterio Hoek-Brown y los Parámetros del Macizo Rocosos se utiliza el Software RocData (ver anexo 3)

Tabla 50 Propiedades del macizo rocoso del Talud N° 09 (Obtenidos del Software RocDataV5).

Propiedad	Valor
Módulo de Young (MPa)	768.611
Coefficiente de Poisson	0.3
Peso específico (MN/m ³)	0.026
Resistencia a la compresión Uniaxial (MPa)	70
GSI/ GSI _{res}	40/30
Parámetro de la roca intacta, mi	17
Factor de disturbancia, D	1
Parámetro m _b	0.234
Parámetro s	4.53999e-005
Parámetro a	0.511
Parámetro mb _{res}	0.115
Parámetro s _{res}	8.5749e-006
Parámetro a _{res}	0.522

En la parte superior del macizo rocoso, la presencia de un metro de profundidad de depósito coluvial de limo inorgánico y arena (ML en el sistema de clasificación de suelos SUCS, obtenido de la calicata 3 del estudio de mecánica de suelos) tiene los siguientes parámetros.

Tabla 51 Parámetros del depósito coluvial del Talud N° 09 (Obtenidos del Software RocDataV5 y del estudio de mecánica de suelos)

	Cohesión (MPa)	0.022
Criterio Mohr-Coulomb	Angulo de fricción (°)	27.5
	Esfuerzo tensional (MPa)	0.003
	UCS (MPa)	0.07251
Peso Unitario	0.01862 MN/m ³	

d. Propiedades de la roca intacta y las discontinuidades

Para el análisis mediante elementos finitos con el software Phase2, introducimos las familias de discontinuidades más críticas, la familia I1 (estratificación) interseca al talud y la familia I2 interseca a la familia I1.

Tabla 52 Propiedades de la roca intacta y de las discontinuidades en Talud N° 09 (Obtenido del Software RocDataV5)

MATERIAL	PROPIEDADES
ROCA INTACTA	Módulo de Young (MPa) = 754.64 Coeficiente de Poisson = 0.3 Peso específico (MN/m ³) = 0.026 Resistencia a la tracción = 0 MPa Cohesión = 0.065 Mpa Angulo de fricción = 58.65 Angulo de dilatancia = 0
DISCONTINUIDADES	Buzamiento de Familia I1 = 54° Buzamiento de Familia I2 = 84° Dip Direction de la Familia I1 = 174 Dip Direction de la Familia I2 = 237 Espaciamiento prom. Fam. I1 = 0.2 m Espaciamiento prom. Fam. I2 = 0.4 m Angulo de fricción = 43° Cohesión = 0 Mpa

DESLIZAMIENTO EN TUCO BAJO

Hacia el final del tramo de estudio, en la comunidad de Tuco Bajo el talud está siendo afectado en una longitud de 80m. por movimiento de masas al haber un deslizamiento rotacional que tiene una corona de 50m. aproximados y la altura del escarpe de 1.5m., tiene un ancho de 70m. y un largo de 210m. La composición de la masa en movimiento consta de bloques y cantos de areniscas en una matriz soportada de arena y limo cuya saturación y aumento de la presión intersticial del suelo en las temporadas de lluvias activa el movimiento de masas.



Figura 27 Deslizamiento rotacional en la comunidad de Tuco Bajo (E: 782721 N: 9271430)
(Google Earth - 2016)

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Los resultados de la investigación se han dado con la obtención de los factores de seguridad mediante los métodos de equilibrio (Software SlideV7) y elementos finitos (software Phase2) de los taludes de suelo y roca, que presentan condiciones de inestabilidad a lo largo del tramo Santa Rosa – Tuco Bajo de la carretera de Bambamarca hacia Centro Poblado de Tuco. Donde prescindiblemente se determinó la composición litomorfoestructural que ha permitido realizar el análisis del comportamiento del talud frente a las fuerzas de corte que actúan para desestabilizar el talud. Las fuerzas de corte aumentan por el drenaje y las condiciones sísmicas a causa de cargas oscilatorias que generan deformaciones cíclicas, o debido a la generación de presiones altas de poros tienden a producir una disminución general de la estabilidad (Suárez, 1998)

Se realizó un estudio de mecánica de suelos de tres calicatas, ubicadas en los Taludes N° 01, 04 y 09 (ver anexo 1). Los suelos se han clasificado de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS.), bajo la Norma ASTM. D 2487.

El área de estudio se ubica en la zona sísmica 2, por lo cual para el análisis pseudo estático de los taludes se considera un coeficiente sísmico de 0.25gal (Modificatoria del decreto supremo de la Norma Técnica E. 030 “Diseño Sismorresiste”- DS-003-2016 MV).

Los factores de seguridad obtenidos de los taludes representativos de cada tramo se describen a continuación:

A. TALUD N° 01: TRAMO KM 13+200 – KM 13+468.1

El talud N° 01 tiene una altura promedio de 3.5 m y una pendiente de 42°, está compuesto por un depósito coluvial. De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), se clasifica al suelo del Tipo CL (arcilla inorgánica de mediana plasticidad), de color marrón oscuro, mezclada con 14.63% de arena gruesa a fina y 16.91% de fragmentos rocosos de tamaño máximo de 3/4", con bajo grado de compacidad y alto contenido de humedad, el suelo tiene una cohesión de 0.0022 Mpa y un Ángulo de fricción de 13.2°. Geomorfológicamente está ubicado en una lomada con una pendiente de 16° aproximadamente; la quebrada Santa Rosa fluye por la izquierda del talud y por la derecha el río Rosas, aumentando el caudal en temporada de diciembre a abril que junto al drenaje superficial e infiltración producen la inestabilización de este tramo de la carretera.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr – Coulomb mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price en condiciones drenadas y no drenadas, en ambos casos teniendo un análisis pseudo estático. En los tres métodos se obtuvo valores similares por debajo de la unidad, con diferencias centesimales, indicando alta inestabilidad.

TALUD 01 - PROGRESIVAS Km 13+200 – Km 13+468.1			
	MÉTODO	FS-DRENADO	FS-NO DRENADAS
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Bishop Simplificado</i>	0.921	0.860
	<i>Spencer</i>	0.947	0.871
	<i>Morgenstern y Price</i>	0.916	0.867

Tabla 53 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 01

La predicción del mecanismo de rotura (superficie de deslizamiento) en el software Slide muestra que es la típica rotura rotacional semicircular producida por tensiones de corte obtenida en suelos (Ver anexo 4-talud 01).

B. TALUD N° 02: TRAMO KM 13+569.63 – KM 13+716.8

El talud N° 02 tiene una altura promedio de 7.5 m y una pendiente de 69°, está compuesto por un depósito coluvial. De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), se clasifica al suelo del Tipo CL de arcillas inorgánicas de baja plasticidad con la presencia de bloques monomicticos de areniscas de hasta 1.5 metros de largo, con bajo grado de compacidad y alto contenido de humedad, el suelo tiene una cohesión de 0.0022 Mpa y un ángulo de fricción de 13.2°. Geomorfológicamente está ubicado en una ladera con una pendiente de 35° aproximadamente, el aumento de las precipitaciones en la temporada de diciembre a abril que drena superficialmente e infiltra produce la inestabilización de este tramo de la carretera.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr – Coulomb mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price en condiciones drenadas y no drenadas (en las condiciones no drenadas el factor de seguridad disminuye notablemente), en ambos casos teniendo un análisis pseudo estático. En los tres métodos se obtuvo valores similares por debajo de la unidad, con diferencias centesimales, indicando alta inestabilidad.

La predicción del mecanismo de rotura (superficie de deslizamiento) es la típica rotura rotacional semicircular en suelos (ver anexo 4-talud 02)

TALUD 02 - PROGRESIVAS Km 13+569.63 – Km 13+716.8			
MÉTODO		FS-DRENADAS	FS-NO DRENADAS
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Bishop Simplificado</i>	0.637	0.475
	<i>Spencer</i>	0.634	0.485
	<i>Morgenstern y Price</i>	0.642	0.478

Tabla 54 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 02

C. TALUD N° 03: TRAMO KM 13+832.26 – KM 13+976.46

El talud N° 03 tiene una altura máxima de 22 m y una pendiente de 81°, compuesto por un macizo de rocoso de areniscas y en la parte superior del talud de un depósito coluvial. El macizo rocoso tiene una Resistencia a la Compresión Uniaxial ~ 75 Mpa, la calidad del macizo de acuerdo al GSI ~50 con una estructura muy blocosa del macizo rocoso y las condiciones de las discontinuidades regulares, la cohesión ~ 0.253 Mpa y un ángulo de fricción ~ 49.31°, el depósito coluvial de gravas en una matriz arenosa tiene una cohesión ~ 0.003 Mpa y un ángulo de fricción ~ 28°. Geomorfológicamente está ubicado en una ladera con una pendiente de 45° aproximadamente; el aumento de las precipitaciones en la temporada de diciembre a abril que drena superficialmente e infiltra produce la inestabilización de este tramo de la carretera.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr - Coulomb y Hoek – Brown y mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price en condiciones drenadas y no drenadas (en las condiciones no drenadas el factor de seguridad disminuye notablemente) y elementos finitos, en ambos casos teniendo un análisis pseudo estático.

TALUD 03 - PROGRESIVAS Km 13+832.26 – Km 13+976.46			
	MÉTODO	FS- DRENADAS	FS-NO DRENADAS
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Bishop Simplificado</i>	1.335	0.91
	<i>Spencer</i>	1.340	0.937
	<i>Morgenstern y Price</i>	1.337	0.986
ELEMENTOS FINITOS		FS: 2.59	

Tabla 55 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 03

En el método de equilibrio límite analiza la inestabilidad en la cabeza del talud parte de la cual está compuesta por suelo, en condiciones drenadas los valores del factor de seguridad están ligeramente por encima de la unidad, indicando estabilidad relativa; pero al realizar el análisis en condiciones no drenadas, el factor de seguridad tiende a disminuir a 0.9 indicando el fallamiento del talud. La predicción del mecanismo de rotura (superficie de deslizamiento) es la típica rotura rotacional producida por tensiones de corte en los suelos (ver anexo 4- Talud 03).

El mecanismo de rotura obtenido por el análisis de Elementos Finitos se muestra los contornos de deformación por tensiones de corte máximas en las discontinuidades en el pie del talud y lo largo de la plataforma de la carretera. El análisis obtuvo un factor de seguridad de 2.59 indicando que el talud está estable. El mecanismo de rotura crítico calculado combina el deslizamiento a lo largo de las discontinuidades con rotura por corte a través de roca intacta (ver anexo 5 – Talud 03).

D. TALUD N° 04: TRAMO KM 14+869 – KM 14+961

El talud N° 04 tiene una altura promedio de 4.7 m y una pendiente de 84°, está compuesto por un depósito coluvial. De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), se clasifica al suelo del Tipo CL estrato constituido por arcilla inorgánica de mediana plasticidad, de color amarillento, mezclada con 10.20% de arena gruesa a fina y exenta de fragmentos rocosos. Se encuentra, con bajo grado de compactación y regular contenido de humedad, el suelo tiene una cohesión de 0.0022 Mpa y un Ángulo de fricción de 13.2°. Geomorfológicamente está ubicado en una ladera con una pendiente de 45° aproximadamente, en los meses de diciembre a abril el aumento de lluvia inestabiliza, provocando el colapso de parte de la cara del talud.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr – Coulomb mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price en condiciones drenadas y no drenadas, en ambos casos teniendo un análisis pseudo estático. En los tres métodos se obtuvo valores similares por debajo de la unidad, indicando muy alta inestabilidad.

TALUD 04 - PROGRESIVAS Km 14+869 – Km 14+961			
MÉTODO		FS- DRENADAS	FS- NO DRENADAS
<i>Bishop Simplificado</i>		0.767	0.628
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Spencer</i>	0.763	0.639
	<i>Morgenstern y Price</i>	0.763	0.691

Tabla 56 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 04

La predicción del mecanismo de rotura (superficie de deslizamiento) es la típica rotura rotacional semicircular en la cabecera del talud producida por tensiones de corte obtenida en suelos (ver anexo 4 – Talud 5).

E. TALUD N° 05: TRAMO KM 15+13.7 – KM 15+79.5

El talud N° 05 tiene una altura de 7.2 y una pendiente de 62°, el macizo rocoso del talud está compuesto por areniscas de grano medio, con Resistencia a la Compresión Uniaxial ~75 Mpa tiene un GSI ~ 48 con una estructura blocosa y con condiciones regulares de las discontinuidades, con cohesión ~0.146 y ángulo de fricción ~55.28°. Geomorfológicamente está ubicado en una ladera con una pendiente de 48° aproximadamente; el aumento de las precipitaciones en la temporada de diciembre a abril afecta la estabilidad del talud.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr - Coulomb y Hoek – Brown y mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price y el análisis mediante elementos finitos, en ambos casos considerando condiciones pseudo estáticas, drenadas y no drenadas.

TALUD 05 - PROGRESIVAS Km 14+869 – Km 14+961			
	MÉTODO	FS-DRENADAS	FS-DRENADAS
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Bishop Simplificado</i>	2.359	1.853
	<i>Spencer</i>	2.551	1.891
	<i>Morgenstern y Price</i>	2.391	1.879
ELEMENTOS FINITOS		FS: 3.93	

Tabla 57 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 05

Comparando los dos métodos el factor de seguridad obtenido son parecidos, estando los taludes en condiciones estables. El mecanismo de rotura en el análisis de Elementos Finitos, los contornos de deformación por tensiones de corte máximas están en las discontinuidades en el pie del talud y en la plataforma de la carretera. El mecanismo de rotura crítico calculado combina el deslizamiento a lo largo de las discontinuidades, con tendencia a tener una rotura plana (ver anexo 5-Talud 05)

F. TALUD N° 06: TRAMO KM 15+194.4 – KM 15+275.1

El talud N° 06 tiene una altura de 15 y una pendiente de 75°, el macizo rocoso del talud está compuesto por areniscas de grano medio, con Resistencia a la Compresión Uniaxial ~75 Mpa tiene un GSI ~ 49 con una estructura blocosa y con condiciones regulares de las discontinuidades, con cohesión ~0.204 y ángulo de fricción ~51.32°. Geomorfológicamente está ubicado en una ladera con una pendiente de 50° aproximadamente; el aumento de las precipitaciones en la temporada de diciembre a abril afecta la estabilidad del talud.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr - Coulomb y Hoek – Brown y mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price y el análisis mediante elementos finitos, en ambos casos considerando condiciones pseudo estáticas y drenadas y no drenadas (en la condiciones no drenas el factor de seguridad disminuye en gran proporción).

TALUD 06 - PROGRESIVAS Km 15+194.4 – Km 15+275.1			
	MÉTODO	FS- DRENADAS	FS-NO DRENADAS
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Bishop Simplificado</i>	1.803	0.709
	<i>Spencer</i>	2.053	0.748
	<i>Morgenstern y Price</i>	2.049	0.748
ELEMENTOS FINITOS		FS: 0.86	

Tabla 58 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 06

Comparando los dos métodos el factor de seguridad, en el método de equilibrio límite en condiciones drenadas para un tipo de falla rotacional el talud está estable pero en las condiciones no drenadas el talud fallaría (ver anexo 4 – Talud 06). El mecanismo de rotura obtenido por el análisis de Elementos Finitos se presenta los contornos de deformación por tensiones de corte máximas en las discontinuidades en la base del talud, cabeza y en menor intensidad en la plataforma de la carretera. El mecanismo de rotura crítico calculado combina el deslizamiento a lo largo de las discontinuidades, con tendencia a tener una rotura plana en la cabeza del talud produciendo caída de rocas y en la base del talud con una tendencia a un deslizamiento traslacional (ver anexo 5-Talud 06).

G. TALUD N° 07: TRAMO KM 15+541.8 – KM 15+617.4

El talud N° 07 tiene una altura de 8m y una pendiente de 77°, el macizo rocoso del talud está compuesto por areniscas de grano medio, con Resistencia a la Compresión Uniaxial ~75 Mpa tiene un GSI ~ 42 con una estructura muy blocosa y con condiciones regulares de las discontinuidades, con cohesión ~0.159 y ángulo de fricción ~58.35°. Geomorfológicamente está ubicado en una lomada con una pendiente de 12° aproximadamente, el aumento de las precipitaciones en la temporada de diciembre a abril afecta la estabilidad del talud.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr - Coulomb y Hoek – Brown y mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price y el análisis mediante elementos finitos, en ambos casos considerando condiciones pseudo estáticas y drenadas y no drenadas (en la condiciones no drenas el factor de seguridad cerca de una unidad).

TALUD 07 - PROGRESIVAS Km 15+541.8 – Km 15+617.4			
	MÉTODO	FS- DRENADAS	FS-NO DRENADAS
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Bishop Simplificado</i>	2.316	1.306
	<i>Spencer</i>	2.33	1.302
	<i>Morgenstern y Price</i>	2.332	1.26
ELEMENTOS FINITOS		FS: 0.99	

Tabla 59 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 07

Comparando los dos métodos el factor de seguridad, en el método de equilibrio límite en condiciones drenadas y no drenadas para un tipo de falla rotacional el talud está estable (ver anexo 4). El mecanismo de rotura obtenido por el análisis de Elementos Finitos, presenta los contornos de deformación por tensiones de corte máximas en las discontinuidades en la cara, cabecera del talud y en la plataforma de la carretera. El mecanismo de rotura crítico calculado combina el deslizamiento a lo largo de las discontinuidades teniendo incidencia la falla Piñipata 2 y roca intacta, con tendencia a tener una rotura semi circular. El factor de seguridad de 0.99, indica que el talud está en condiciones de inestabilidad muy alta (ver anexo 5-Talud 07)

H. TALUD N° 08: TRAMO KM 15+699.8– KM 16+084.6.

El talud N° 08 tiene una altura de 21m y una pendiente de 54°, el macizo rocoso del talud está compuesto por estratos de areniscas y lutitas intercaladas con areniscas, la resistencia a la compresión Uniaxial de las areniscas es de ~75 Mpa con un GSI ~ 41 con una estructura muy blocosa y con condiciones regulares de las discontinuidades, con cohesión ~0.170 y ángulo de fricción de ~42.44°, las lutitas y areniscas tienen resistencia a la compresión Uniaxial ~ 60 Mpa con GSI ~ 37 con condiciones regulares de las discontinuidades, con cohesión ~0.113 Mpa y ángulo de fricción de ~35.86. Geomorfológicamente está ubicado en una ladera; al aumentar las precipitaciones en los meses de diciembre a abril afecta la estabilidad del talud.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr - Coulomb y Hoek – Brown y mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price y el análisis mediante elementos finitos, en ambos casos considerando condiciones pseudo estáticas, drenadas y no drenadas (en la condiciones no drenas el factor de seguridad disminuye notablemente).

TALUD 08 - PROGRESIVAS Km 15+699.8 – Km 16+084.6			
	MÉTODO	FS- DRENADAS	FS-NO DRENADAS
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Bishop Simplificado</i>	1.644	0.127
	<i>Spencer</i>	1.70	0.364
	<i>Morgenstern y Price</i>	1.66	0.932
ELEMENTOS FINITOS		FS: 0.99	

Tabla 60 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 08

Comparando los dos métodos el factor de seguridad, en el método de equilibrio límite en condiciones drenadas para un tipo de falla rotacional el talud está estable pero en las condiciones no drenadas el talud fallaría (ver anexo 4-Tallud 08). El mecanismo de rotura obtenido por el análisis de Elementos Finitos, presenta los contornos de deformación por tensiones de corte máximas en las discontinuidades. El mecanismo de rotura crítico calculado combina el deslizamiento a lo largo de las discontinuidades teniendo incidencia la falla Tuco. El factor de seguridad de 0.99, indica que el talud está en condiciones de inestabilidad muy

alta, la altura, pendiente, agua y ondas sísmicas juegan un rol muy importante en la inestabilidad del talud (ver anexo 5 – Talud 08).

I. TALUD N° 09: TRAMO KM 16+084.6 – KM 16+443.0

El talud N° 09 tiene una altura máxima de 3.5m y una pendiente de 65°, compuesto por un macizo de rocoso de areniscas y en la parte superior del talud de un deposito coluvial. El macizo rocoso tiene una Resistencia a la Compresión Uniaxial ~ 70 Mpa, la calidad del macizo de acuerdo al GSI ~40 con una estructura muy blocosa del macizo rocoso y las condiciones de las discontinuidades regulares, la cohesión ~ 0.065 Mpa y un ángulo de fricción ~ 56.05°, el depósito coluvial está por suelo tipo ML (en el sistema de clasificación de suelos U.S.C.S) constituido por limo inorgánico de baja compresibilidad, de color amarillento, mezclado con 43.40% de arena fina a gruesa y exento de fragmentos rocosos, se encuentra con bajo grado de compacidad y alto contenido de humedad. Con cohesión de ~ 0.022 Mpa y ángulo de fricción ~ 27.5°. Geomorfológicamente está ubicado en una lomada con pendiente de 12° aproximadamente, el aumento de las precipitaciones en la temporada de diciembre a abril que drena superficialmente e infiltra produce el fallamiento del talud.

En la siguiente tabla se muestra el factor de seguridad obtenido por los criterios de Mohr - Coulomb y Hoek – Brown y mediante el método de equilibrio límite de Bishop Simplificado, Spencer y Morgenstern y Price en condiciones drenadas y no drenadas (en las condiciones no drenadas el factor de seguridad disminuye en cuatro unidades) y elementos finitos, en ambos casos teniendo un análisis pseudo estático

TALUD 09 - PROGRESIVAS Km 16+084.6 – Km 16+443.0			
	MÉTODO	FS-DRENADAS	FS-NO DRENADAS
EQUILIBRIO LÍMITE	<i>Bishop Simplificado</i>	1.132	0.716
	<i>Spencer</i>	1.13	0.715
	<i>Morgenstern y Price</i>	1.131	0.716
ELEMENTOS FINITOS		FS: 8.21	

Tabla 61 Comparación entre los factores de seguridad del talud N° 09.

Comparando los dos métodos el factor de seguridad, en el método de equilibrio límite en condiciones drenadas para un tipo de falla rotacional el talud está relativamente estable pero en las condiciones no drenadas el talud llega a fallar en la cabecera del talud (ver anexo 4 – Talud 09). El mecanismo de rotura obtenido por el análisis de Elementos Finitos, presenta los contornos de deformación por tensiones de corte máximas en las discontinuidades y en el contacto de la roca y suelo. El mecanismo de rotura crítico calculado combina el deslizamiento a lo largo de las discontinuidades, con mayor concentración en el pie de la plataforma de la carretera. El factor de seguridad de 8.21, indica que el talud está estable (ver anexo 5-Talud 09).

J. CUADRO RESUMEN DE LOS RESULTADOS

En el siguiente cuadro resumen se muestran los resultados de los 09 taludes analizados mediante los métodos de equilibrio límite y elementos finitos.

	EQUILIBRIO LIMITE						ELEMENTOS FINITOS
	CONDICIONES DRENADAS			CONDICIONES NO DRENADAS			
	BISHOP	SPENCER	M & P	BISHOP	SPENCER	M & P	
TALUD 01	0.921	0.947	0.916	0.86	0.871	0.867	-
TALUD 02	0.637	0.634	0.642	0.475	0.485	0.478	-
TALUD 03	1.335	1.34	1.337	0.91	0.937	0.936	2.59
TALUD 04	0.767	0.763	0.763	0.628	0.639	0.691	-
TALUD 05	2.359	2.551	2.391	1.853	1.891	1.879	3.93
TALUD 06	1.83	2.053	2.049	0.709	0.748	0.748	0.86
TALUD 07	2.316	2.33	2.332	1.306	1.302	1.26	0.99
TALUD 08	1.644	1.7	1.66	0.127	0.364	0.932	0.99
TALUD 09	1.132	1.13	1.131	0.716	0.715	0.716	8.21

Tabla 62 Cuadro resumen de los factores de seguridad de los taludes analizados.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.2.1 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES LITOMORFOESTRUCTURALES EN LA INESTABILIDAD

En los Taludes N° 01, 02 y 04, compuestos por suelo del tipo CL (Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, con grava, arcillas) son los taludes que tienen más bajo factor de seguridad en condiciones drenadas en comparación con los taludes de roca.

	TALUD 01	TALUD 02	TALUD 04
TIPO DE SUELO	CL (Arcillas inorgánicas de plasticidad baja, con grava, arcillas)	CL (Arcillas inorgánicas de plasticidad baja con arena, gravas y limos)	CL (Arcillas inorgánicas de plasticidad media con arena gruesa a fina)
FS-EQUILIBRIO LIMITE (promedio)	0.928 (Condiciones Drenadas) 0.866 (Condiciones no Drenadas)	0.638 (Condiciones Drenadas) 0.479 (Condiciones no Drenadas)	0.764 (Condiciones Drenadas) 0.653 (Condiciones no Drenadas)

Tabla 63 Factor de seguridad de los Taludes N° 01, 02 y 03 mediante equilibrio limite.

La aplicación de los elementos finitos y equilibrio limite no tienen una diferencia significativa (Khadija, 2012) pero si el mecanismo de falla de estos dos métodos se da en la misma parte del talud y no se tienen en cuenta el comportamiento de las discontinuidades. En los Talud N° 03 y 09 compuesto de areniscas en la base y suelos en la cabecera, la diferencia en el factor de seguridad mediante equilibrio límite y elementos finitos (con representación explícita de las discontinuidades), es debido a que en el método de equilibrio limite los taludes fallan en la cabecera (en lo suelos) mientras que en el método de elementos finitos tienen mayor incidencia las discontinuidades tiende a fallar en el cuerpo del talud a través de las discontinuidades del macizo rocoso.

	TALUD 03	TALUD 09
TIPO DE MATERIAL	- SUELO SP (Mezcla de arena y grava con pocos finos) - ARENISCA del Grupo Goyllarisquizga	- SUELO ML (Limo inorgánico de plasticidad media con arena fina a gruesa) - ARENISCA del Grupo Goyllarisquizga
FS-EQUILIBRIO LIMITE (promedio)	1.34 (Condiciones Drenadas) 0.93 (Condiciones no Drenadas)	1.13 (Condiciones Drenadas) 0.72 (Condiciones no Drenadas)
FS-ELEMENTOS FINITOS	2.59	8.21
LUGAR DE FALLA	Equilibrio límite: Cabecera del talud Elementos finitos: Cuerpo del talud	Equilibrio límite: Cabecera del talud Elementos finitos: Cuerpo del talud

Tabla 64 Comparación de lugar de falla del Talud N03 y Talud 09 mediante equilibrio limite y elementos finitos.

En los Taludes N° 05 y 09 está compuesto por areniscas del Grupo Goyllarisquizga con propiedades geomecánicas similares, pero al realizar el método con elementos finitos se obtiene factores de seguridad muy diferentes debido a las condiciones de las discontinuidades con mayor espaciamiento en el talud N° 06.

	TALUD 05	TALUD 06
GSI	48	49
C (Mpa)	0.1460.93	0.204
Ángulo fricción	55.28	51.32
UCS (Mpa)	75	75
Peso Unitario	0.026	0.026
mi	17	17
D	1	1
Young (MPa)	1228.29	1299.25
Poisson	0.3	0.3
Espaciamiento de las discontinuidades	E1: 0.7 m E2: 1.0 m	F1: 0.8 m F2: 3.0 m
FS- ELEMENTOS FINITOS	3.93	0.86

Tabla 65 Comparación de la influencia de las discontinuidades en el factor de seguridad de los Taludes N° 05 y 09.

En el Talud N° 07 está compuesto por areniscas y el Talud N° 08 compuesto de areniscas y/o lutitas del Grupo Goyllarisquizga, al realizar el análisis mediante el método de elementos finitos con la representación de las discontinuidades (diaclasas y fallas) el factor de seguridad indica que el talud s muy inestables debido a las discontinuidades y en el método de equilibrio

en condiciones drenadas los taludes están estables pero el talud N° 08 en condiciones no drenadas el talud fallaría, debido a la composición litológica y ubicación geomorfológica.

	TALUD 07	TALUD 08
TIPO DE ROCA	Areniscas	Areniscas y Lutitas
FALLA GEOFORMA	Piñipata 2 Lomada	Tuco 1 Ladera
FS-EQUILIBRIO LIMITE (promedio)	2.326 (Condiciones Drenadas) 1.289 (Condiciones no Drenadas)	1.668 (Condiciones Drenadas) 0.474 (Condiciones no Drenadas)
FS-ELEMENTOS FINITOS	0.99	0.99

Tabla 66 Comparación de la influencia de la composición litológica, estructural y geomorfológica en el factor de seguridad de los Taludes N° 07 y 08.

5.2.2 ZONIFICACIÓN DE INESTABILIDAD

En taludes permanentes se debe trabajar con un factor de seguridad de 1.5 (Rico & Castillo, 1974) para que los taludes estén estables, al comparar los factores de seguridad obtenidos mediante los métodos de equilibrio limite y elementos finitos determinamos el grado de inestabilidad de los taludes de suelo y roca.

En el siguiente cuadro se muestra la zonificación del área estudiada.

ZONIFICACIÓN	TALUDES	COMENTARIO
TALUDES ESTABLES	Tramos no han sido analizados en esta investigación.	Taludes sin indicios de inestabilidad debido a sus características geomorfológicas, baja pendiente y no superar los 2.5m. de altura.
INESTABILIDAD BAJA	Talud N° 05	Al tener un factor de seguridad mayor a 1.5.
INESTABILIDAD ALTA	Talud N° 03	Tiene un factor de seguridad de 1.34, por lo tanto está dentro del rango de factor de seguridad de 1.0 a 1.5 (taludes de inestabilidad alta)
INESTABILIDAD MUY ALTA	Taludes N° 01, 02, 04, 06, 07, 08, 09.	A los Taludes N° 01 y 09 están afectados por movimiento de masa, los Taludes N° 06, 07 y 08 hay fallamiento del talud al tener roturas críticas a través de las discontinuidades.

Tabla 67 Zonificación de inestabilidad del tramo de estudio.

4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.

La inestabilidad de los taludes en el tramo Santa Rosa – Tuco Bajo de la carretera de Bambamarca hacia Centro Poblado de Tuco está condicionado por la litología que consta de areniscas, lutitas y depósitos coluviales de suelos tipo CL (arcillas inorgánicas de plasticidad baja, con grava y arena), ML (Limo inorgánico de plasticidad media con arena fina a gruesa) y SP (Mezcla de arena y grava con pocos finos) según la clasificación SUCS que están expuestos a la meteorización y erosión por los agentes geodinámicas externos que disminuyen la calidad de las propiedades geomecánicas y geotécnicas de rocas y suelos. La porosidad, alto diaclasamiento y el fallamiento favorece la infiltración del agua producto de la precipitación (con mayor intensidad en los meses de diciembre a abril) y escorrentía superficial, satura e incrementa la presión intersticial los suelos y rocas; lo que ha conllevado que debido al aumento del peso de los suelos y rocas, las unidades geomorfológicas críticas para la ubicación del talud (lomadas, laderas y escarpes) y las ondas sísmicas aumentan los esfuerzos de corte, haciendo de los taludes de baja, alta y muy inestabilidad.

Por lo que la hipótesis planteada ha sido contrastada y verificada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El tramo Santa Rosa a Tuco Bajo de la carretera Bambamarca – Centro Poblado Tuco, litológicamente está constituido por lutitas violáceas y areniscas ferruginosas, blanquecinas y negruzcas del grupo Goyllarisquizga y suelos coluviales, coluvio aluviales y fluviales; geomorfológicamente por planicies en una extensión de 4.67%, lomadas el 49.50%, laderas el 45.58% y escarpes el 0.24%. en cuya modelación han tenido incidencia los ríos Llaucano y Rosas y las quebradas Santa Rosa, y El Amarillo y las fallas que tienen mayor incidencia en la inestabilidad de taludes son la Falla Tuco 01 y Piñipata 5.
- Los Taludes N° 01, 02 y 04 están constituidos por suelos del tipo CL (arcillas inorgánicas de plasticidad baja, con grava y arena), en la cabecera de los Taludes N° 03 por suelo tipo SP (Mezcla de arena y grava con pocos finos) y del talud N° 09 por suelo ML (Limo inorgánico de plasticidad media con arena fina a gruesa) según la clasificación SUCS; los taludes N° 03, 05, 06, 07 y 09 esta compuestos de areniscas de grano medio y el Talud N° 08 por intercalación de areniscas y lutitas.
- Las características geomecánicas de los taludes de rocas está dado por un GSI que varía de 40 a 50, la resistencia uniaxial a la compresión de 70 a 75 MPa, peso unitario de 0.026 MN/m³ y ángulo de fricción de 51 a 58°; los taludes de suelos del tipo CL

tiene cohesión de 0.22 Kg/cm², ángulo de fricción 13.2° y peso específico húmedo 1.74 gr/cm³.

- El Método de Elementos Finitos con representación explícita de las discontinuidades en el análisis de los macizos rocosos de los Taludes N° 03, 05, 06, 07, 08 y 09 se dedujo que las discontinuidades son más influyentes que las propiedades de la roca intacta, y la rotura está controlada por los sistemas de discontinuidades debido a que su espaciamiento y persistencia son del mismo orden de magnitud que las dimensiones del talud.
- El análisis de inestabilidad de los taludes mediante equilibrio límite y elementos finitos desde el tramo del Km 13+200 en la comunidad de Santa Rosa hasta el Km 16+826 de la comunidad de Tuco Bajo, demostró que el 32.25 % son taludes con una estabilidad muy alta, el 4.27% son taludes con inestabilidad alta, el 1.95% son taludes de inestabilidad baja y el 61.54% son taludes estables.

5.2 RECOMENDACIONES

- En la presente investigación se han usado estimaciones del comportamiento geomecánico de los taludes de rocas con propósitos de diseño preliminar; sin embargo, para diseños de detalle se deberían desarrollar ensayos en laboratorio de mecánica de rocas para obtener valores más confiables.
- La Municipalidad Provincial de Hualgayoc-Bambamarca mediante el Instituto Vial Provincial debería realizar las siguientes acciones: aperturar cunetas de coronación en el Talud N° 01 y en la cabeza del movimientos de masas en Santa Rosa (ver mapa 06) para evitar deterioro de la plataforma de la carretera; reducir la pendiente de los Taludes N° 02 y 04, ampliar la plataforma de la carretera en el Talud N° 03 y notificar a los responsables de la extracción de carbón en la parte alta del talud para que eviten drenar el agua hacia el talud y desquinchar las rocas sueltas del Talud N° 05 y 06 para prevenir accidentes.
- El Instituto Vial Provincial de la Municipalidad de Bambamarca debe monitorear los taludes de forma continua para seguir evaluando su inestabilidad debido a que las condiciones del suelo y/o roca y las condiciones detonantes están en constante cambio, y así tomar las medidas de seguridad para prevenir pérdidas humanas y económicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bobet, A. (2010). Numerical Methods in Geomechanics. The Arabian Journal for Science and Engineering, 35(1B), 27–48.
- Carter, J.P., Desai, C.S., Potts, D.M., Schweiger, H.F. y Sloan, S.W.(2001). “Computing and Computer Modelling in Geotechnical Engineering”. pp.1 – 96.
- Dávila, J. (1992). Diccionario geológico, INGEMMET, Edit. Arth Altuna, Edición 2011.
- Fellenius W. (1922). Statens Jarnjvagens Geotekniska Commission, Stockholm, Sweden”
- González, L; Ferrer, M; Ortuño L; Oteo, C. (2004) Ingeniería geológica. Madrid: Pearson Education. 2 Ed.
- Granados A. (2006). Estabilización del talud de la costa verde en la zona del distrito de Barranco (Tesis de pregrado). Lima-Perú.
- Grifths, D. V. & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique 49, No. 3, 387-403
- Hoek & Brown (1997) Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 34, No 8 , pages 1165-1186. Canadá.
- Hoek, E. (2009) Factor of safety and probability of failure. Practical Rock Engineering, Canada.
- Hoyos, F. (2012). Geotecnia diccionario básico. 1st ed. Medellín
- Jing L, Hudson J.A. (2002) Numerical methods in rock mechanics. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 39 409–427.
- Khadija Baba, Lahcen Bahi, Latifa Ouadif, Ahmed Akhssas (2012) Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods Applied to a Railway in the Moroccan Rif. Scientific Research. Pags. 27-32.
- Lambe, T. y Whitman R. (1991). Mecánica de suelos. Massachusetts: Limusa.

- Marinos, P; Hoek, E. 2000 GSI: A Geologically Friendly tool for rock Mass Strength Estimation.
- Ocon V. (2015) Evaluación geotécnica de inestabilidad de taludes en la carretera Hualgayoc – Apan Alto (tesis de grado). Universidad nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Pablo A. Beneyto, Guillermo J. Gutierrez, Javier L. Mroginski, Héctor A. Di Rado y Armando M. Awruch. (Noviembre 2011). Análisis de estabilidad de taludes mediante técnicas de optimización heurística. Asociación Argentina de mecánica Computacional, Vol XXX, 2001-2014.
- Pantelidis, L. (2009). Rock slope stability assessment through rock mass classification system International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46 315–325.
- Pantoja, H. (2013, Mayo) Boletín hidrometeorológico del SENAMHI Lambayeque. Boletín del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 10.
- Peter L. (2006). Engineering Dictionary. USA: Cambridge.
- Pozo R. (2014). Análisis numérico del mecanismo de falla en macizos rocosos fracturados considerando el efecto escala. Tesis de grado Universidad Nacional Ingeniería, Lima-Perú. 176 págs.
- R. E. Hammah, John H. Curran, Thamer Yacoub, Brent Corkum (2004). Stability Analysis of Rock Slopes using the Finite Element Method. EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium. Schubert (ed.).
- R.E. Hammah and T. Yacoub (2008). Variation of Failure Mechanisms of Slopes in Jointed Rock Masses with Changing Scale. Rocscience Inc., Toronto, Canada.
- Rico A, A. y Castillo, H. (1998). La ingeniería de suelos en las vías terrestres (1st ed.). México: Limusa.
- Scheldt T. (2002). Comparison of Continuous and Discontinuous Modelling for Computational Rock Mechanics. Department of Geology and Mineral Resources Engineering Norwegian University of Science and Technolog.

- Suarez J. (1998). Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en zonas tropicales. Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suarez J. (2009). Deslizamientos: Análisis Geotécnico: U.I.S. Escuela de filosofía.
- Wu T.H. (1996), Soil strength properties and their measurement. Landslides Investigation and mitigation Special Report 247 Transportation research Board, pp.319- 336. Washington.
- Zavala, B; Rosado, M. (2011). Riesgo geológico en la región Cajamarca, (Boletín N° 44 de la Serie C). Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET. Editorial: Lima-Perú.

ANEXOS

ANEXO N° 01: ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS.....	95-115
ANEXO N° 02: FORMATOS DE CARACTERIZACIÓN DE MACIZO ROCOSO.....	116-120
ANEXO N° 03: ANÁLISIS CON EL SOFTWARE ROCDATA V5.....	121-131
ANEXO N° 04: RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE V7.....	132-149
ANEXO N° 05: RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE PHASE2.....	150-155
ANEXO N° 06: PLANOS.....	156-161
PLANO N° 01: UBICACIÓN.	
PLANO N° 02: TOPOGRÁFICO - SATELITAL.	
PLANO N° 03: GEOMORFOLÓGICO.	
PLANO N° 04: GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL.	
PLANO N° 05: GEOMECÁNICO	
PLANO N° 06: ZONIFICACIÓN DE INESTABILIDAD.	