

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS GEOLOGÍA Y CIVIL**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**TESIS:**

**Estudio comparativo del método de equilibrio límite  
tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de  
taludes del Tajo Checocollo de la Mina Pucamarca, 2024**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO DE MINAS**

PRESENTADO POR:

**Bach. Grover Saul SULCA ÑAUPAS**

ASESOR:

**MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2024**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico a mis abuelos, que desde el cielo me guían y dan valor cada día, a mis padres Pedro Sulca y Yolanda Ñaupas por todo el apoyo incondicional en cada momento de mi vida, a mis hermanos y demás familiares por el apoyo económico y moral durante toda mi etapa universitaria.

***Grover Sulca***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecido en primer lugar con mi familia por el apoyo incondicional recibido durante todos mis años de estudio.

Toda mi gratitud a los docentes de la escuela profesional de ingeniería de minas de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por su dedicación y compartir sus conocimientos durante los cinco años de estudio, cuyos valores impartidos llevaré durante esta nueva etapa de mi vida.

Agradecido con la mina Pucamarca, por darme la oportunidad de realizar mis prácticas profesionales para desarrollarme como persona e iniciar mi vida profesional en el sector minero. Agradecido con los ingenieros del área de geotecnia y planeamiento de la unidad minera por su apoyo y confianza.

## RESUMEN

En las minas peruanas se viene realizando el análisis de estabilidad de taludes usando métodos de equilibrio límite y softwares bidimensionales, sin embargo, debido a la evolución tecnológica y científica en la actualidad existen métodos y softwares de análisis tridimensionales los cuales en comparación a su contraparte bidimensional podrían ofrecernos mayores oportunidades de mejora en relación a la optimización de taludes en minas a cielo abierto. En el tajo Checocollo de la mina Pucamarca la pared del lado Este posee actualmente un diseño final el cual se realizó en base a estudios de estabilidad bidimensionales, razón por la cual se planteó como objetivo realizar la comparación de resultados realizando un análisis de estabilidad tridimensional del sector, como objetivos específicos se tuvo la comparación de los factores de seguridad estático y pseudoestático, cuyos valores obtenidos por el método tridimensional se plantea sean mejores a los valores bidimensionales. El presente trabajo usa una metodología de tipo aplicativa ya que se busca poner en práctica los conocimientos teóricos de los métodos tridimensionales en el análisis de estabilidad del tajo Checocollo, el nivel de investigación utilizado fue el descriptivo - correlacional porque primero se buscó especificar las propiedades y características de las litologías que influirán en los cálculos de análisis de estabilidad, y correlacional porque posteriormente se comparó a través de una regresión potencial los resultados bidimensionales y tridimensionales concluyendo en cual constituye el mejor método. El trabajo tiene como variable independiente los métodos de equilibrio límite tridimensional y bidimensional y como variable dependiente el resultado del análisis de estabilidad cuyos indicadores serán los factores de seguridad estático y pseudoestático. Los instrumentos utilizados para el análisis fueron el software Slide2 9.0 y Slide3 3.0, así también la información recopilada que comprendió estudios hidrogeológicos, propiedades geomecánicas de resistencia, mapeo geomecánico. Para estudiar las fallas controladas por las condiciones estructurales se usó como instrumento el programa Dips 8.0, Swedge 7.0 y RocPlane 4.0. De los resultados se pudo concluir que las fallas tipo cuña y planares no tendrán ninguna influencia en la estabilidad global de tajo ya que los valores de factores de seguridad oscilan por encima de 3.0. El estudio tridimensional comprendido la creación de un modelo de sólidos utilizando la información del modelo de alteraciones de la mina y el diseño final de la pared Este, el instrumento utilizado fue el software Mineplan 15.4 y AutoCAD 2024. La simulación y análisis de estabilidad realizados con el software Slide2 y Slide3 indican que los valores de factor de seguridad por el método de equilibrio límite de Spencer y Morgenstern Price tridimensionales dieron como valor 1.56 y 1.55 para el caso estático y 1.07 - 1.05 para el caso pseudoestático, estos resultados fueron superiores a los valores de factores de seguridad bidimensionales cuyo resultado para el método de Spencer y Morgenstern Price fue de 1.29 – 1.27 caso estático y 0.93 – 0.92 caso pseudoestático en las secciones más críticas. En ambos casos se considera estable llegando a la conclusión de que la aplicación del método de equilibrio límite tridimensional si optimiza los resultados del análisis de estabilidad en el tajo Checocollo de la mina Pucamarca.

**Palabras clave:** Estabilidad de taludes, método de equilibrio límite, método Spencer, método de Morgenstern Price, factor de seguridad estático y pseudoestático, Slide2 y 3.

## ABSTRAC

In Peruvian mines, slope stability analysis has been carried out using limit equilibrium methods and two-dimensional software. However, due to technological and scientific evolution, there are currently three-dimensional analysis methods and software which, compared to their two-dimensional counterpart, we could offer ourselves greater opportunities for improvement in relation to the optimization of slopes in open pit mines. In the Checocollo pit of the Pucamarca mine, the east side wall currently has a final design which was carried out based on two-dimensional stability studies, which is why the objective was to compare the results by carrying out a three-dimensional stability analysis of the sector, as specific objectives the comparison of the static and pseudostatic safety factors was had, whose values obtained by the three-dimensional method are proposed to be better than the two-dimensional values. The present work uses an application-type methodology since it seeks to put into practice the theoretical knowledge of three-dimensional methods in the stability analysis of the Checocollo pit, the level of research used was descriptive - correlational because it first sought to specify the properties and characteristics of the lithologies that will influence the stability analysis calculations, and correlational because the two-dimensional and three-dimensional results were subsequently compared through a potential regression, concluding which constitutes the best method. The work has as an independent variable the three-dimensional and two-dimensional limit equilibrium method and as a dependent variable the result of the stability analysis whose indicators will be the static and pseudostatic safety factors. The instruments used for the analysis were the Slide2 9.0 and Slide3 3.0 software, as well as the information collected that included hydrogeological studies, geomechanical resistance properties and geomechanical mapping. To study failures controlled by structural conditions, the Dips 8.0, Swedge 7.0 and RocPlane 4.0 programs were used as instruments. From the results it was concluded that wedge-type and flat faults will not have any influence on the global stability of the pit since the values of the safety factors oscillate above 3.0. The three-dimensional study included the creation of a solid model using information from the mine alterations model and the final design of the East wall, the instrument used was Mineplan 15.4 and AutoCAD 2024 software. The simulation and stability analysis carried out with the Slide2 and Slide3 software indicate that the safety factor values by the three-dimensional Spencer and Morgenstern Price limit equilibrium method gave values of 1.56 and 1.55 for the static case and 1.07 - 1.05 for the static case. pseudostatic, these results were higher than the values of two-dimensional safety factors whose result for the Spencer and Morgenstern Price method was 1.29 – 1.27 static case and 0.93 – 0.92 pseudostatic case in the most critical sections. In both cases it is considered stable, concluding that the application of the three-dimensional limit equilibrium method does optimize the results of the stability analysis in the Checocollo pit of the Pucamarca mine.

**Keywords:** Slope stability, limit equilibrium method, Spencer method, Morgenstern Price method, static and pseudostatic safety factor, Slide2 and 3.

## ÍNDICE

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| DEDICATORIA .....                           | i   |
| AGRADECIMIENTO .....                        | ii  |
| RESUMEN.....                                | iii |
| ÍNDICE .....                                | v   |
| LISTA DE FIGURAS .....                      | ix  |
| LISTA DE TABLAS .....                       | xii |
| CAPÍTULO I.....                             | 1   |
| 1.1. INTRODUCCIÓN .....                     | 1   |
| 1.1.1. Descripción del problema .....       | 1   |
| 1.1.2. Formulación del problema .....       | 3   |
| 1.1.2.1. Problema general.....              | 3   |
| 1.1.2.2. Problemas específicos .....        | 3   |
| 1.1.3. Objetivos de la investigación .....  | 3   |
| 1.1.3.1. Objetivo general .....             | 3   |
| 1.1.3.2. Objetivo específico.....           | 3   |
| 1.1.4. Justificación.....                   | 3   |
| 1.1.4.1. Justificación teórica.....         | 3   |
| 1.1.4.2. Justificación práctica.....        | 4   |
| 1.1.4.3. Justificación social .....         | 4   |
| 1.1.5. Importancia .....                    | 5   |
| 1.1.6. Alcances y limitaciones.....         | 5   |
| 1.1.7. Hipótesis.....                       | 5   |
| 1.1.7.1. Hipótesis general.....             | 5   |
| 1.1.7.2. Hipótesis específica.....          | 5   |
| 1.1.8. Variables e indicadores .....        | 6   |
| 1.1.8.1. Variable independiente.....        | 6   |
| 1.1.8.2. Variable dependiente.....          | 6   |
| 1.1.9. Operacionalización de variables..... | 7   |
| 1.1.10. Diseño de investigación. ....       | 8   |
| 1.1.10.1. Tipo de investigación .....       | 8   |
| 1.1.10.2. Nivel de investigación.....       | 8   |
| 1.1.10.3. Diseño de investigación .....     | 8   |
| 1.1.11. Población y muestra .....           | 9   |
| 1.1.11.1. Población.....                    | 9   |

|              |                                                                                |    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1.11.2.    | Muestra.....                                                                   | 9  |
| 1.1.12.      | Técnicas e instrumentos de toma de datos. ....                                 | 9  |
| 1.1.12.1.    | Técnicas de recolección de datos .....                                         | 9  |
| 1.1.12.2.    | Instrumentos de recolección de datos.....                                      | 9  |
| 1.1.12.3.    | Procedimiento de recolección de datos. ....                                    | 10 |
| 1.1.13.      | Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....                            | 10 |
| 1.1.13.1.    | Procesamiento de datos. ....                                                   | 10 |
| 1.1.13.2.    | Técnicas de análisis de datos.....                                             | 11 |
| CAPÍTULO II  | .....                                                                          | 12 |
| 2.1.         | MARCO TEÓRICO.....                                                             | 12 |
| 2.1.1.       | Antecedentes .....                                                             | 12 |
| 2.1.1.1.     | Antecedentes internacionales. ....                                             | 12 |
| 2.1.1.2.     | Antecedentes nacionales. ....                                                  | 16 |
| 2.1.2.       | Definición de taludes.....                                                     | 17 |
| 2.1.3.       | Estabilidad de taludes.....                                                    | 17 |
| 2.1.4.       | Tipos de falla de taludes.....                                                 | 18 |
| 2.1.5.       | Factor de seguridad .....                                                      | 20 |
| 2.1.6.       | Métodos de equilibrio limite .....                                             | 20 |
| 2.1.7.       | Método de las dovelas.....                                                     | 21 |
| 2.1.7.1.     | Método ordinario de Fellenius .....                                            | 21 |
| 2.1.7.2.     | Método de Bishop .....                                                         | 22 |
| 2.1.7.3.     | Método de Jambu .....                                                          | 22 |
| 2.1.7.4.     | Método de Spenser .....                                                        | 23 |
| 2.1.7.5.     | Método de Morgenstern Price .....                                              | 24 |
| 2.1.8.       | Análisis pseudoestático. ....                                                  | 26 |
| 2.1.9.       | Criterios de rotura. ....                                                      | 27 |
| 2.1.9.1.     | Criterio de rotura de Mohr – Coulomb.....                                      | 27 |
| 2.1.9.2.     | Criterio generalizado de Hoek – Brown.....                                     | 28 |
| 2.1.10.      | Método de equilibrio limite tridimensional.....                                | 29 |
| 2.1.10.1.    | Precisión y confiabilidad del método de equilibrio limite tridimensional ..... | 30 |
| CAPÍTULO III | .....                                                                          | 31 |
| 3.1.         | MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                     | 31 |
| 3.1.1.       | Ubicación .....                                                                | 31 |
| 3.1.2.       | Accesibilidad.....                                                             | 32 |
| 3.1.3.       | Geología .....                                                                 | 32 |
| 3.1.3.1.     | Geología Regional.....                                                         | 32 |
| 3.1.3.2.     | Geología Estructural.....                                                      | 32 |

|                   |                                              |    |
|-------------------|----------------------------------------------|----|
| 3.1.3.3.          | Geología local .....                         | 35 |
| 3.1.4.            | Tipo de yacimiento.....                      | 36 |
| 3.1.5.            | Mineralización.....                          | 37 |
| 3.2.              | RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS .....                | 38 |
| 3.2.1.            | Sismicidad en el área de influencia .....    | 38 |
| 3.2.1.1.          | Sismicidad histórica .....                   | 38 |
| 3.2.1.2.          | Sismicidad instrumental. ....                | 39 |
| 3.2.1.3.          | Peligro sísmico y aceleración de diseño..... | 40 |
| 3.2.1.4.          | Coeficiente sísmico .....                    | 41 |
| 3.2.2.            | Hidrogeología.....                           | 42 |
| 3.2.2.1.          | Mapeo Hidrogeológico.....                    | 44 |
| 3.2.3.            | Criterios de diseño.....                     | 44 |
| 3.2.4.            | Modelo goemecánico .....                     | 46 |
| 3.2.4.1.          | Determinación de secciones críticas .....    | 47 |
| 3.2.4.2.          | Evaluación geotécnica.....                   | 47 |
| 3.2.5.            | Parámetros geotécnicos .....                 | 47 |
| 3.2.5.2.          | Unidades Geotécnicas .....                   | 48 |
| 3.2.5.3.          | Resumen de parámetros geotécnicos.....       | 49 |
| 3.2.6.            | Análisis geotécnico .....                    | 51 |
| 3.2.6.1.          | Parámetros geométricos de diseño .....       | 51 |
| 3.2.7.            | Análisis estereográfico .....                | 53 |
| 3.2.8.            | Análisis cinemático .....                    | 55 |
| 3.2.8.1.          | Metodología de análisis.....                 | 55 |
| 3.2.8.2.          | Consideraciones de análisis.....             | 56 |
| 3.2.8.3.          | Resultados obtenidos.....                    | 56 |
| 3.2.9.            | Diseño de bancos.....                        | 61 |
| 3.2.9.1.          | Condiciones de análisis .....                | 61 |
| 3.2.10.1.         | Alteración Argílica Avanzada.....            | 65 |
| 3.2.10.2.         | Alteración Argílica intermedia.....          | 66 |
| 3.2.10.3.         | Alteración Vuggy .....                       | 67 |
| 3.2.10.6.         | Alteración Sílice Masiva .....               | 70 |
| 3.2.10.7.         | Alteración Sílice pulverulenta.....          | 71 |
| 3.3.              | Modelo de diseño de mina .....               | 73 |
| 3.3.1.            | Creación de modelos geotécnicos .....        | 80 |
| 3.3.1.1.          | Modelo geotécnico tridimensional .....       | 80 |
| 3.3.1.1.          | Modelo geotécnico bidimensional .....        | 85 |
| CAPÍTULO IV ..... |                                              | 88 |

|          |                                                                      |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.     | RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                          | 88  |
| 4.1.1.   | Resultados del análisis de estabilidad física en 3 dimensiones ..... | 88  |
| 4.1.1.1. | Caso condición estática 3D. ....                                     | 88  |
| 4.1.1.2. | Caso condición Pseudoestático 3D .....                               | 91  |
| 4.1.2.   | Resultados de análisis de estabilidad física en 2 dimensiones .....  | 93  |
| 4.1.2.1. | Caso condición estático 2D .....                                     | 93  |
| 4.1.2.2. | Caso condición Pseudoestático 2D .....                               | 96  |
| 4.1.3.   | Análisis comparativo.....                                            | 100 |
| 4.1.3.1. | Caso condición estático.....                                         | 100 |
| 4.1.3.2. | Caso condición pseudoestática.....                                   | 103 |
| 4.1.3.3. | Propuesta de optimización de talud.....                              | 106 |
| 4.1.4.   | Discusión de resultados.....                                         | 110 |
| 4.1.4.1. | Caso condición Estático .....                                        | 111 |
| 4.1.4.2. | Caso condición pseudoestático.....                                   | 112 |
| 4.1.5.   | Prueba de hipótesis.....                                             | 115 |
| 4.1.5.1. | Hipótesis específica 01.....                                         | 115 |
| 4.1.5.2. | Hipótesis específica 02.....                                         | 115 |
| 5.       | CONCLUSIONES .....                                                   | 117 |
| 6.       | RECOMENDACIONES .....                                                | 119 |
| 7.       | BIBLIOGRAFÍA .....                                                   | 120 |
| 8.       | LISTA DE ABREVIATURAS .....                                          | 122 |
| 9.       | ANEXOS .....                                                         | 123 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> Diseño de investigación.....                                                              | 8  |
| <b>Figura 2</b> (a)Condición estructural en rotura circular (b) Representación estereográfica .....       | 18 |
| <b>Figura 3</b> Condición estructural en un deslizamiento plano (b) Representación estereográfica .       | 19 |
| <b>Figura 4</b> Condición estructural en un deslizamiento en cuña (b) Representación estereográfica ..... | 19 |
| <b>Figura 5</b> (a) Condición estructural para toppling (b) Representación estereográfica.....            | 20 |
| <b>Figura 6</b> Esquema método ordinario o de Fellenius.....                                              | 21 |
| <b>Figura 7</b> Esquema del método Bishop .....                                                           | 23 |
| <b>Figura 8</b> Método de las dovelas .....                                                               | 25 |
| <b>Figura 9</b> Diferencias entre resultados de varios métodos.....                                       | 25 |
| <b>Figura 10</b> Criterio de rotura Mohr – Coulomb.....                                                   | 28 |
| <b>Figura 11</b> Columna de suelo 3D típica.....                                                          | 30 |
| <b>Figura 12.</b> Ubicación de la Unidad Minera - Pucamarca .....                                         | 31 |
| <b>Figura 13</b> Columna estratigráfica UM. Pucamarca.....                                                | 35 |
| <b>Figura 14</b> Sección vertical de alteraciones UM. Pucamarca.....                                      | 37 |
| <b>Figura 15</b> Parámetros geométricos de diseño.....                                                    | 51 |
| <b>Figura 16</b> Análisis estereográfico – Sector Este Pared Frontera.....                                | 54 |
| <b>Figura 17</b> Análisis cinemático de mecanismo de falla planar– Talud Dir. Buz: 280° .....             | 57 |
| <b>Figura 18</b> Análisis cinemático de mecanismo de falla planar – Talud Dir. Buz: 300.....              | 58 |
| <b>Figura 19</b> Análisis cinemático de mecanismo de falla tipo cuña– Talud Dir. Buz: 280° .....          | 59 |
| <b>Figura 20</b> Análisis cinemático de mecanismo de falla tipo cuña– Talud Dir. Buz: 300°.....           | 60 |
| <b>Figura 21</b> Análisis de estabilidad de fallas planares Talud Dir. Buz: 300 -280° .....               | 63 |
| <b>Figura 22</b> Análisis de estabilidad de fallas tipo cuña Talud Dir. Buz: 280° .....                   | 64 |
| <b>Figura 23</b> Alteración Argílica Avanzada – Vista en planta .....                                     | 65 |
| <b>Figura 24</b> Alteración Argílica Avanzada – Vista en Perfil .....                                     | 66 |
| <b>Figura 25</b> Alteración Argílica intermedia – Vista en planta .....                                   | 66 |
| <b>Figura 26</b> Alteración Argílica intermedia – Vista en Perfil .....                                   | 67 |
| <b>Figura 27</b> Alteración Vuggy – Vista en planta.....                                                  | 67 |
| <b>Figura 28</b> Alteración Vuggy – Vista en Perfil .....                                                 | 68 |
| <b>Figura 29</b> Alteración Morrenas – Vista en planta .....                                              | 68 |
| <b>Figura 30</b> Alteración Morrenas – Vista en Perfil.....                                               | 69 |
| <b>Figura 31</b> Alteración Sílice granular – Vista en planta.....                                        | 69 |
| <b>Figura 32</b> Alteración Sílice granular – Vista en Perfil.....                                        | 70 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 33</b> Alteración Sílice Masiva– Vista en planta.....                                                     | 70 |
| <b>Figura 34</b> Alteración Sílice Masiva– Vista en Perfil .....                                                    | 71 |
| <b>Figura 35</b> Alteración Sílice pulverulenta – Vista en planta .....                                             | 71 |
| <b>Figura 36</b> Alteración Sílice pulverulenta – Vista en Perfil .....                                             | 72 |
| <b>Figura 37</b> Vista en perfil de las alteraciones del cerro Checocollo .....                                     | 73 |
| <b>Figura 38</b> Vista en planta del diseño del tajo en líneas de toe y cresta .....                                | 74 |
| <b>Figura 39</b> Vista isométrica en superficie del diseño del tajo.....                                            | 75 |
| <b>Figura 40</b> Vista en planta de la condición actual del tajo Checocollo .....                                   | 75 |
| <b>Figura 41</b> Vista en planta de la superficie del diseño del tajo.....                                          | 76 |
| <b>Figura 42</b> Vista isométrica en superficie del sector este – pared frontera del tajo.....                      | 76 |
| <b>Figura 43</b> Vista isométrica en solido del sector este – pared frontera del tajo.....                          | 77 |
| <b>Figura 44</b> Vista en planta de las alteraciones del tajo Checocollo. ....                                      | 78 |
| <b>Figura 45</b> Vista en planta de las alteraciones de la pared sur y sureste (pared frontera) .....               | 78 |
| <b>Figura 46</b> Pared Este del tajo Checocollo actual.....                                                         | 79 |
| <b>Figura 47</b> Vista en isométrica de las alteraciones de la pared sur y sureste (pared frontera).....            | 80 |
| <b>Figura 48</b> Importe y corrección de errores de solido de diseño de mina .....                                  | 81 |
| <b>Figura 49</b> Sólido de diseño de mina importado y corregido. ....                                               | 81 |
| <b>Figura 50</b> Importe y corrección de errores de solido de alteraciones.....                                     | 82 |
| <b>Figura 51</b> Sólido de modelo de alteraciones importado y corregido.....                                        | 82 |
| <b>Figura 52</b> Diseño de mina y modelo de alteraciones importados y corregidos.....                               | 83 |
| <b>Figura 53</b> Asignación de colores a los sólidos del modelo de alteraciones .....                               | 84 |
| <b>Figura 54</b> Asignación de propiedades de los materiales .....                                                  | 84 |
| <b>Figura 55</b> Generación de secciones a partir del modelo tridimensional .....                                   | 85 |
| <b>Figura 56</b> Secciones generadas en el modelo tridimensional.....                                               | 86 |
| <b>Figura 57</b> Secciones generadas - vista en planta e isométrico. ....                                           | 86 |
| <b>Figura 58</b> Sección bidimensional culminada. ....                                                              | 87 |
| <b>Figura 59</b> Resultado factor de seguridad estático tridimensional – Spencer.....                               | 89 |
| <b>Figura 60</b> Vista en plata e isométrico de superficie de falla estático tridimensional – Spencer.....          | 89 |
| <b>Figura 61</b> Resultado factor de seguridad estático tridimensional –M.P.....                                    | 90 |
| <b>Figura 62</b> Vista en plata e isométrico de superficie de falla estático tridimensional – M.P. ....             | 90 |
| <b>Figura 63</b> Resultado factor de seguridad pseudoestático tridimensional – Spencer. ....                        | 91 |
| <b>Figura 64</b> Vista en plata e isométrico de superficie de falla pseudoestático tridimensional –<br>Spencer..... | 91 |
| <b>Figura 65</b> Resultado factor de seguridad pseudoestático tridimensional – M.P. ....                            | 92 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 66</b> Vista en plata e isométrico de superficie de falla pseudoestático tridimensional – M.P.....   | 92  |
| <b>Figura 67</b> Factores de seguridad estático por sección – Método Spencer Bidimensional .....               | 94  |
| <b>Figura 68</b> Sección crítica caso estático - Método Spencer Bidimensional .....                            | 95  |
| <b>Figura 69</b> Factores de seguridad estático por sección – Método Morgenstern Price Bidimensional .....     | 95  |
| <b>Figura 70</b> Sección crítica caso estático - Método Morgenstern Price Bidimensional.....                   | 96  |
| <b>Figura 71</b> Factores de seguridad pseudoestático por sección – Método Spencer Bidimensional .....         | 98  |
| <b>Figura 72</b> Sección crítica caso pseudoestático - Método Spencer Bidimensional .....                      | 98  |
| <b>Figura 73</b> Factores de seguridad pseudoestático por sección – Método Spencer M. ....                     | 99  |
| <b>Figura 74</b> Sección crítica caso pseudoestático - Método Morgenstern Price Bidimensional ....             | 99  |
| <b>Figura 75</b> Superficies de falla tridimensionales - Método de Spencer.....                                | 101 |
| <b>Figura 76</b> Superficies de falla tridimensionales - Método de Morgenstern Price .....                     | 101 |
| <b>Figura 77</b> Regresión potencial FS 2D y 3D – Estático, método de Spencer.....                             | 102 |
| <b>Figura 78</b> .....                                                                                         | 103 |
| <b>Figura 79</b> Superficies de falla tridimensionales - Método de Spencer Pseudoestático .....                | 104 |
| <b>Figura 80</b> Superficies de falla tridimensionales - Método de Morgenstern Price pseudoestático .....      | 104 |
| <b>Figura 81</b> Regresión potencial FS 2D y 3D – Estático, método de Spencer.....                             | 105 |
| <b>Figura 82</b> Regresión potencial FS 2D y 3D – Estático, método de Morgenstern Price .....                  | 105 |
| <b>Figura 83</b> Talud optimizado en sección más critica.....                                                  | 107 |
| <b>Figura 84</b> Parámetros nivel de banco optimizados .....                                                   | 107 |
| <b>Figura 85</b> Análisis bidimensional de talud optimizado – método de Spencer estático .....                 | 108 |
| <b>Figura 86</b> Análisis bidimensional de talud optimizado – método de MP, estático .....                     | 109 |
| <b>Figura 87</b> Análisis bidimensional de talud optimizado – método de Spencer pseudoestático .               | 109 |
| <b>Figura 88</b> Análisis bidimensional de talud optimizado – método de método de M.P pseudoestático .....     | 110 |
| <b>Figura 89</b> Resultado de factor de seguridad tridimensional y bidimensional estático – Spencer .....      | 111 |
| <b>Figura 90</b> Resultado de factor de seguridad tridimensional y bidimensional estático – M.P ..             | 112 |
| <b>Figura 91</b> Resultado de factor de seguridad tridimensional y bidimensional pseudoestático – Spencer..... | 113 |
| <b>Figura 92</b> Resultado de factor de seguridad tridimensional y bidimensional pseudoestático –              | 113 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....                                                      | 7   |
| <b>Tabla 2</b> Resultados de diferentes factores de seguridad según método.....                           | 26  |
| <b>Tabla 3</b> Resultados de diferentes factores de seguridad según método.....                           | 26  |
| <b>Tabla 4</b> Principales sismos históricos de subducción en el segmento sur del Perú.....               | 39  |
| <b>Tabla 5</b> Aceleraciones horizontales máximas en el terreno (PGA) – Roca .....                        | 41  |
| <b>Tabla 6</b> Coeficiente sísmico a utilizar según el periodo de retorno .....                           | 42  |
| <b>Tabla 7</b> Criterios de diseño.....                                                                   | 45  |
| <b>Tabla 8</b> Resumen de subdivisión de unidades geotécnicas .....                                       | 49  |
| <b>Tabla 9</b> Resumen de propiedades Hoek – Brown generalizado .....                                     | 50  |
| <b>Tabla 10</b> Resumen de parámetros de resistencia Mohr – Coulomb .....                                 | 50  |
| <b>Tabla 11</b> Envoltentes de resistencia no lineal para discontinuidades .....                          | 51  |
| <b>Tabla 12</b> Familias de discontinuidades por dominio estructural .....                                | 55  |
| <b>Tabla 13</b> Resumen de resultados del análisis cinemático.....                                        | 61  |
| <b>Tabla 14</b> Resultados de análisis de fallas planares obtenidos - sector este .....                   | 62  |
| <b>Tabla 15</b> Resultados de análisis de fallas tipo cuña obtenidos - sector este .....                  | 62  |
| <b>Tabla 16</b> Resultados de factores de seguridad por sección – Caso Estático Bidimensional. ....       | 93  |
| <b>Tabla 17</b> Resultados de factores de seguridad por sección – Caso Pseudoestático Bidimensional. .... | 97  |
| <b>Tabla 18</b> Factores de seguridad bidimensionales y tridimensionales estáticos.....                   | 100 |
| <b>Tabla 19</b> Factores de seguridad bidimensionales y tridimensionales pseudoestáticos.....             | 103 |
| <b>Tabla 20</b> Resultados de factores de seguridad tridimensionales y bidimensionales .....              | 114 |
| <b>Tabla 21</b> Prueba t de Student para Medias de los factores de seguridad estáticos .....              | 115 |
| <b>Tabla 22</b> Prueba t de Student para Medias de los factores de seguridad estáticos .....              | 116 |

## **CAPÍTULO I**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

#### **1.1.1. Descripción del problema**

El diseño de minas a tajo abierto contempla una serie de estudios que involucran diversas áreas como la geotecnia en el estudio de estabilidad física. La actividad sísmica, las actividades magmáticas internas de la tierra, las condiciones geológicas y estructurales, presencia de agua y demás factores generan como consecuencia efectos desestabilizadores en la superficie terrestre, un resultado notable de estos efectos son los deslizamientos y fallas en los taludes, estas superficies inclinadas que no solamente están presentes en minas a cielo abierto sino también en laderas aledañas a ciudades, carreteras, presas de relave y un sin fin de estructuras naturales y antrópicas. La diversidad de aplicaciones e importancia de estas superficies hace necesario llevar a cabo investigaciones que puedan mejorar los estudios de análisis de estabilidad de taludes con el propósito de prevenir y mitigar pérdidas de bienes materiales y vidas humanas.

Uno de los desafíos del ingeniero geotécnico minero ha sido el diseño y construcción de taludes sin riesgo a fallar, esto ha llevado a investigar una serie de métodos para realizar el análisis de estabilidad basándose en el cálculo de factores de seguridad y también a elaborar diversos softwares que puedan facilitar estos procesos, durante los últimos años el análisis de estabilidad física de taludes en el Perú y el mundo se ha realizado generalmente usando secciones geotécnicas críticas en dos dimensiones elegidas a criterio del evaluador, llegando a no ser representativa en algunos casos y dándonos resultados muy poco ajustados a la realidad, sin embargo, en la actualidad debido a la evolución científica y tecnológica ya se tiene la posibilidad de realizar el análisis de estabilidad basándose en modelos geotécnicos

tridimensionales que permiten representar de una manera más real la verdadera naturaleza de la realidad problemática respecto a los análisis bidimensionales.

Según Chakraborty y Goswami (2016), los métodos bidimensionales de estabilidad de taludes son los métodos más usados entre los ingenieros debido a su simplicidad, sin embargo, las suposiciones utilizadas por estos métodos son muy básicos, si se tienen geometrías muy complejas se tendría que reducir el problema a realizar un análisis 3D para una mayor precisión en los resultados.

En este contexto la mina Pucamarca en el 2023 ha realizado el diseño final del tajo Checocollo basándose en estudios de estabilidad bidimensionales, su proximidad al límite chileno por el lado Este del tajo representó una determinante para poder utilizar parámetros geométricos conservadores que puedan cumplir con los análisis bidimensionales del sector, asociado a ello la litología indica la presencia de materiales intemperizados con alta erosión por parte de los vientos propios de la zona lo que conllevaba a un monitoreo constante, el factor hidrogeológico es de poca influencia ya que los estudios indican que el nivel del agua se encuentra por debajo del diseño final de tajo. En estas condiciones el sector Este del tajo Checocollo al momento del estudio no ha tenido ningún evento de falla de taludes y los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos se encuentran dentro de los límites permitidos según los métodos de equilibrio límite bidimensionales usados en estudios previos, por ello se plantea que un análisis usando el método de equilibrio límite en tres dimensiones podría darnos nuevas perspectivas del estado de factores de seguridad en la zona. Estos resultados podrían ser fundamentales ya que si son favorables podrían ayudar a optimizar los parámetros geométricos del diseño de los taludes finales, logrando así una mayor recuperación de mineral, o por otra parte a tomar las precauciones necesarias en caso se tengan resultados poco favorables.

El estudio no solo conlleva a realizar una simple comparación para la evaluación de la estabilidad geotécnica un tajo ubicado al sur del Perú, sino también a fomentar el uso de métodos más científicos y tecnológicos del análisis de estabilidad de taludes, su implementación podría optimizar el diseño en diversas minas del Perú y del mundo.

Por lo tanto, considerando el método de equilibrio límite y la condición de análisis en dos y tres dimensiones mencionadas se propone investigar el: “Estudio comparativo del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad del Tajo Checocollo en la Mina Pucamarca”.

### **1.1.2. Formulación del problema**

#### **1.1.2.1. Problema general**

¿Cuál es la diferencia entre el método de equilibrio limite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024?

#### **1.1.2.2. Problemas específicos**

1. ¿Cuál es la diferencia entre el método de equilibrio limite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad **estática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024?
2. ¿Cuál es la diferencia entre el método de equilibrio limite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad **pseudoestática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024?

### **1.1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.1.3.1. Objetivo general**

Determinar la diferencia del método de equilibrio limite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.

#### **1.1.3.2. Objetivo específico**

1. Determinar la diferencia entre el método de equilibrio limite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad **estática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.
2. Determinar la diferencia entre el método de equilibrio limite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad **pseudoestática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.

### **1.1.4. Justificación**

#### **1.1.4.1. Justificación teórica**

El diseño y construcción de una mina de tajo abierto contempla la ejecución de taludes que profundizan con el objetivo de extraer minerales valiosos y útiles para cubrir las necesidades de la humanidad. Este diseño de taludes dentro de sus lineamientos requiere realizar un análisis de estabilidad rotacional debido a que el deslizamiento o falla constituye una de las principales preocupaciones y problemas para las empresas.

Por otro lado, el análisis de estabilidad de tajos mineros se ha venido realizando usando métodos y softwares tradicionales de 2 dimensiones, donde la evaluación se realiza identificando las secciones críticas del talud. El problema se presenta cuando se tienen modelos muy complejos donde la sección crítica se torna muy complicado, llegando al punto de elegir una sección que no sea representativa a la zona más inestable, por ello la elección de un método de análisis en tres dimensiones se hace indispensable.

Finalmente, al realizar un estudio de análisis estático y pseudoestático usando el método de equilibrio límite bidimensional y tridimensional, usando dos softwares que son los más comunes en el mercado permitirá realizar la comparación de ambos resultados para así poder recomendar la mejor herramienta y determinar cuáles son las mejoras del análisis con los métodos tridimensionales respecto a los métodos bidimensionales.

#### **1.1.4.2. Justificación práctica**

En la unidad minera Pucamarca, donde se realizará el estudio, se tiene el caso de que una de las paredes tajo se encuentra ubicado al límite de la frontera de Perú y Chile, por lo cual los parámetros geométricos de diseño del sector fueron muy conservadores para cumplir con los estudios de estabilidad bidimensionales previos, estos resultados indican que los factores de seguridad se encuentran dentro de los límites permitidos y se basan en el análisis de una sola sección crítica seleccionada por el evaluador que se encargó del análisis de estabilidad física, por lo tanto, la aplicación de un método de análisis tridimensional podrá darnos mejores perspectivas y nos permitirá correlacionar los valores obtenidos con los análisis bidimensionales. Si los resultados son favorables se podrá optimizar los parámetros geométricos del diseño aumentando los recursos explotables y la vida de la mina.

#### **1.1.4.3. Justificación social**

El propósito de esta investigación se centra en brindar a las empresas mineras consultoras y especialistas del área de geotecnia, que realizan trabajos de análisis de estabilidad de taludes de diferentes componentes mineros y fases de prefactibilidad, factibilidad u operación, el entendiendo de una nueva herramienta tridimensional de análisis. Los resultados obtenidos también proporcionarán un mayor conocimiento de las nuevas técnicas de análisis de estabilidad de taludes usados en otros países, esta información permitirá mantener actualizado los avances científicos, tecnológicos y métodos aplicados en el área de geotecnia.

#### 1.1.5. Importancia

La trascendencia de la presente investigación radica en la incesante necesidad de evitar el colapso, deslizamiento y fallos de taludes en minas a cielo abierto, carreteras o laderas aledañas a poblaciones y otros escenarios. También la importancia principal es evitar la pérdida de vidas humanas y daños materiales de gran significado. Además, la comparación y diferenciación de los métodos analizados, método de equilibrio límite bidimensional y tridimensional, nos permitirá identificar la mejor herramienta que nos ayude a realizar un estudio de análisis de estabilidad de taludes y mejorar la eficacia de la prevención de riesgos asociados a posibles deslizamientos de taludes.

Para el caso específico del estudio, la comparación de factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos bidimensionales y tridimensionales nos permitirá tener nuevas oportunidades de optimización de taludes en la unidad minera Pucamarca o de otra manera nos proporcionará la información necesaria para tomar las prevenciones del caso en las paredes críticas del tajo asociado al análisis.

#### 1.1.6. Alcances y limitaciones

La investigación está dentro del análisis estático y pseudoestática de la estabilidad de taludes en rocas y suelos del tajo Checocollo pared Este de la mina Pucamarca usando la información y propiedades del modelo de alteraciones manejada en mina y se limita a los métodos de análisis por equilibrio límite bidimensional y tridimensional de Spencer y Morgenstern Price usando los programas Slide2 y Slide3.

#### 1.1.7. Hipótesis

##### 1.1.7.1. Hipótesis general

El método de equilibrio límite tridimensional optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.

##### 1.1.7.2. Hipótesis específica

1. El método de equilibrio límite tridimensional optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad **estática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.
2. El método de equilibrio límite tridimensional optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad **pseudoestática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.

### **1.1.8. Variables e indicadores**

#### **1.1.8.1. Variable independiente**

Método de equilibrio límite bidimensional y tridimensional.

##### **Indicadores:**

- Propiedades físicas.
  - Peso específico.
  - Contenido de humedad.
  - Granulometría.
- Propiedades mecánicas.
  - Angulo de fricción ( $\phi$ )
  - Cohesión (C)
  - Índice de Resistencia Geológica (GSI)
  - Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)
  - Disturbancia (D)
  - Índice de la roca intacta ( $m_i$ )
- Modelo geométrico.

#### **1.1.8.2. Variable dependiente**

Análisis de estabilidad de taludes.

##### **Indicadores:**

- Factores de seguridad estático bidimensional.
- Factores de seguridad estático bidimensional
- Factores de seguridad estático bidimensional
- Factores de seguridad estático bidimensional

### 1.1.9. Operacionalización de variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

| Variable      | Definición Conceptual                                       | Definición Operacional                                                                                                                                                                                                                                                     | dimensión                                                                                                                                                                                                                     | indicador                                              |                                                                     |
|---------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Independiente | Método de equilibrio limite bidimensional y tridimensional. | Según Duncan & Wright (2005), el análisis bidimensional modela el talud como una sección transversal promedio, asumiendo deslizamientos simples y omitiendo variaciones tridimensionales, lo que lo hace práctico, pero menos preciso.                                     | Según Duncan & Wright (2005), el análisis 2D evalúa un perfil representativo del talud mediante métodos de equilibrio estático, asumiendo condiciones homogéneas y constantes.                                                | Método de equilibrio limite bidimensional              | Propiedades físicas<br>Propiedades mecánicas.<br>Modelo geométrico. |
|               |                                                             | Según Griffiths & Lane (1999), El análisis tridimensional considera variaciones en resistencia, geometría y cargas a lo largo del volumen del talud, siendo más preciso pero demandante en datos y recursos computacionales, ideal para condiciones geotécnicas complejas. | Según Griffiths & Lane (1999), el análisis 3D evalúa el talud como un cuerpo volumétrico completo, considerando variaciones espaciales y utilizando métodos avanzados para un análisis detallado de estabilidad.              | Método de equilibrio tridimensional                    | Propiedades físicas<br>Propiedades mecánicas.<br>Modelo geométrico. |
| Dependiente   | Análisis de estabilidad de taludes.                         | Según Duncan & Wright (2005), definen que el análisis de estabilidad de taludes es el estudio de las condiciones mecánicas y geométricas que determinan si un talud natural o artificial puede mantener su configuración sin experimentar deslizamientos o fallas.         | Según Griffiths & Lane (1999), el análisis de estabilidad de taludes es un procedimiento técnico que combina la recopilación de datos, el modelado geométrico y la evaluación mecánica para determinar si un talud es seguro. | Análisis de estabilidad estático bidimensional.        | Factor de seguridad estático bidimensional.                         |
|               |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                               | Análisis de estabilidad pseudoestático bidimensional   | Factor de seguridad pseudoestático bidimensional.                   |
|               |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                               | Análisis de estabilidad estático tridimensional        | Factor de seguridad estático tridimensional.                        |
|               |                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                               | Análisis de estabilidad pseudoestático tridimensional. | Factor de seguridad pseudoestático tridimensional.                  |

*Nota:* En la tabla se presenta la operacionalización de las variables Fuente: elaboración propia (2024)

### 1.1.10. Diseño de investigación.

#### 1.1.10.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación usado es el Aplicado, ya que el trabajo se caracteriza por su deseo de poner en práctica los conocimientos teóricos en una situación real y las consecuencias prácticas que salgan de ella. Así también se busca conocer para luego modificar, actuar sobre una realidad problemática. (Sanchez,1996).

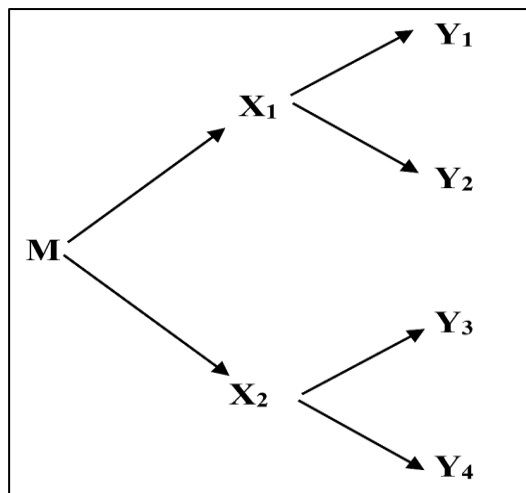
#### 1.1.10.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación que se utiliza es el Descriptivo – Correlacional por que se busca primero especificar las propiedades y características de objetos procesos que se someterán a análisis y con esta información posteriormente comparar dos procedentes de análisis diferentes para finalmente concluir cual constituye el mejor método. (Hernández et al., 2010)

#### 1.1.10.3. Diseño de investigación

El diseño de investigación usado es correlacional, transeccional. Correlacional por que describen relaciones entre dos o más variables en función de la causa y efecto. Transeccional porque los datos se van a recolectar en un solo momento y se va describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. (Hernández et al., 2010)

**Figura 1**  
*Diseño de investigación*



*Nota.* Elaboración propia

Donde:

M: Talud en análisis.

X1: Método de equilibrio limite tridimensional.

X1: Método de equilibrio límite bidimensional.

Y1: Análisis de estabilidad estática tridimensional.

Y2: Análisis de estabilidad pseudoestática tridimensional.

Y3: Análisis de estabilidad estática bidimensional.

Y4: Análisis de estabilidad pseudoestática bidimensional.

#### **1.1.11. Población y muestra**

De acuerdo a Carrasco 2006, que define que una población es un conjunto de la unidad de análisis y forma parte del sector en estudio; y la muestra es un subconjunto representativo cuyos valores y resultados se puedan extender a la población en análisis.

##### **1.1.11.1. Población**

Taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca 2024.

##### **1.1.11.2. Muestra**

Taludes del sector Este del tajo Checocollo de la mina Pucamarca 2024.

#### **1.1.12. Técnicas e instrumentos de toma de datos.**

##### **1.1.12.1. Técnicas de recolección de datos**

Las técnicas utilizadas para realizar la presente investigación fueron:

- Análisis de información documentaria: se revisaron libros, tesis, artículos y otra literatura para tener los conceptos básicos a tener en cuenta en la investigación.
- Análisis de datos de mina: se recopiló la información de las propiedades de los materiales, mapeo geomecánico, modelo geológico y geomecánico de alteraciones de la mina en base a las campañas de perforación y mapeo realizados anteriormente.
- Observación directa e indirecta: este recurso se utilizó para poder registrar la condición del terreno. Aquí también se tomó en cuenta el levantamiento topográfico del tajo y el mapeo geomecánico.
- Cursos especializados para desarrollar la tesis: análisis de estabilidad y taludes utilizando los programas Slide2 y Slide3.

##### **1.1.12.2. Instrumentos de recolección de datos.**

Los instrumentos que se utilizaron para la toma de datos durante el levantamiento topográfico y mapeo fueron (realizados por las empresas consultoras de la mina).

- Equipo GPS diferencial.

- Brújula
- Esclerómetro.
- Picota de geólogo
- Equipo de laboratorio para realizar el ensayo de compresión uniaxial y triaxial. (realizado por otro laboratorio)
- Equipos para medir el nivel freático a través de los piezómetros.

#### **1.1.12.3. Procedimiento de recolección de datos.**

El Procedimiento seguido para recolectar los datos de campo fue:

- Ubicación de lugar de trabajo, usando el Google Earth.
- Reconocimiento del terreno, identificación de la zona de análisis.
- Levantamiento topográfico, utilizando el instrumento de GPS diferencial, por el área de topografía.
- Mapeo del suelo y la roca, utilizando el método de línea de detalle y celdas.
- Toma de muestras y traslado al laboratorio, esto se realiza tanto para los suelos y las rocas presentes la condición de ambas debe ser lo más inalterado posible.
- Ensayos de laboratorio para la muestra del suelo y las rocas con esto se podrá obtener las propiedades físicas y mecánicas de la roca.
- Búsqueda y obtención de datos de aceleración sísmica.

#### **1.1.13. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

##### **1.1.13.1. Procesamiento de datos.**

- Procesamiento de datos obtenidos en campo, información topográfica de coordenadas, usando Excel 2023.
- Actualización de la topografía del tajo en base a la información recopilada en campo utilizando el programa Mineplan 15.6.
- Creación de los modelos geotécnicos en dos y tres dimensiones delimitando la zona de análisis e identificando las secciones críticas.
- Simulación de la estabilidad estática y pseudoestática bidimensional usando el software **Slide2**, se utiliza la información obtenida en campo y laboratorio (propiedades físicas y mecánicas).
- Simulación de la estabilidad estática y pseudoestática tridimensional en base a un modelo geotécnico 3D usando el software **Slide3**, se utiliza

la información obtenida en campo y laboratorio (propiedades físicas y mecánicas)

#### **1.1.13.2. Técnicas de análisis de datos.**

El análisis de resultados se basa en los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos obtenidos del programa Slide2 y Slide3; también se analiza la variación de estos valores en relación a las propiedades físicas y mecánicas ingresadas como datos. finalmente, las conclusiones y las recomendaciones.

## **CAPÍTULO II**

### **2.1. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1.1. Antecedentes**

##### **2.1.1.1. Antecedentes internacionales.**

Shirago y Dirate (2023), realizaron el estudio del análisis de estabilidad de taludes mediante la reducción de la resistencia tridimensional y equilibrio limite bidimensional, los parámetros de resistencia se determinaron a partir de pruebas de corte directo para suelos no cohesivos y pruebas triaxiales consolidadas no drenadas para suelos cohesivos. El FOS para LEM 2D se analiza mediante el software Slope/w y arrojó un FOS más alto que el análisis FDM 3D realizado por el software numérico FLAC3D. Para el análisis 2D, los FOS fueron 0,743 y 0,614 para los niveles de agua secos y máximos utilizando los métodos de Morgenstern-Price, mientras que el análisis 3D dio FOS 0,34 y 0,31 para los niveles de agua secos y máximos, respectivamente. La estabilidad no satisface el FOS recomendado sugerido por muchos investigadores debido a la inclinación del talud o debido a los parámetros de entrada de la pendiente que resultaron en el deslizamiento.

Sengani y Allopi (2022), hicieron la revisión de la precisión de los métodos de equilibrio limite bidimensional y su predicción de la estabilidad en taludes de carreteras homogéneas, en esta investigación se determinó el método de equilibrio limite LEM más apropiado que proporcione la solución más cercana a un método de reducción de esfuerzos. Con base en los seis estudios de casos considerados en este estudio, se encontró que las soluciones de estabilidad exactas producidas por los métodos Janbu simplificado y ordinario de equilibrio límite en la mayoría de los casos están dentro de un margen de error de precisión de 2 a 10 %. Sin embargo, estas condiciones de menor error de precisión se observaron en taludes de suelos de arena suelta, arena media, arena densa y arcilla rígida. Por lo tanto, se concluye que, en los casos del material de talud de suelo mencionado anteriormente, los métodos simplificado y ordinario de Janbu de equilibrio límite son los mejores para

implementar. Además, la comparación detallada de las soluciones con los métodos de equilibrio límite también ha demostrado que la predicción de los números de estabilidad por el método de Spencer y Morgenstern-Price son similares en todos los casos. Esto implica que no se requiere el uso simultáneo de estos dos métodos, ya que brindan soluciones similares.

Wines (2016), realizó la comparación del análisis de estabilidad de taludes en dos y tres dimensiones, en ella indica que basado en la revisión de la literatura y adicionales análisis realizados en algunas minas a cielo abierto la geometría puede tener una influencia significativa en la estabilidad de taludes, una pendiente cóncava será más estable que una pendiente recta. Por otro lado, la orientación, ubicación de las estructuras geológicas en relación al talud y la distribución de diferentes macizos rocosos son factores importantes que pueden afectar los resultados del análisis. Según el estudio para taludes largos y rectos de condiciones geológicas homogéneas el análisis 2D puede representar adecuadamente al problema, sin embargo, en muchos casos la incapacidad del análisis para representar la verdadera naturaleza del talud conducirá resultados poco realistas. En estos casos se requiere de un análisis 3D que representa mejor el modelo. Para el caso de una mina a cielo abierto al oeste de Australia cuyas paredes del tajo estaban dominadas por materiales que poseen una resistencia variable, según el análisis de estabilidad por métodos de equilibrio límite y métodos numéricos tridimensionales arrojó valores de factor de seguridad de aproximadamente 1.0, por otro lado los análisis bidimensionales obtuvieron valores de factores de seguridad 0.65 indicando que la geometría tridimensional tiene una influencia significativa en la estabilidad de una pared en especial en paredes donde los mecanismos de falla son estructuralmente controlados.

Chakraborty y Goswami (2016), sobre el análisis de estabilidad de taludes en tres dimensiones manifiesta la importancia del método, ya que aumenta considerablemente cuando la geometría es compleja lo que dificulta la selección de una sección típica para el análisis 2D. Desde los años 90 se ha desarrollado muchos métodos de análisis de taludes basados en equilibrio límite y elementos finitos. De estos estudios se revela que la mayoría de los métodos de equilibrio límite de taludes en 3D derivan de métodos de equilibrio límite en 2D. Sin embargo, el valor de factores de seguridad de los métodos 3D son superiores a los 2D. En este documento, se analizaron taludes utilizando el método de equilibrio límite 3D (LEM) utilizando el software Slide3 con diferentes geometrías y parámetros del suelo en sitios vulnerables Gawahati y sus áreas adyacentes, Assam, India. Se pudo demostrar que el factor de estabilidad de taludes se puede leer a partir de los gráficos de estabilidad sin necesidad de

iteraciones teniendo una fuerte correlación (93.61%) con los valores obtenidos por el método de equilibrio límite

Shamsoddin Saeed et al. (2015), realizó la comparación del análisis de estabilidad de taludes bidimensionales y tridimensionales para el talud final de la mina Miduk, depósito de pórfido de cobre que está ubicado en el área de Shahr-Babak en Kerman provincia, Irán. Este análisis se realizó bajo tres condiciones seco, drenado y húmedo. Se utilizó el criterio de falla de Morh- Coulomb y se consideró el macizo rocoso era permeable. Según los resultados el agua y la presión de poros en las fallas y juntas principales fueron los factores más importantes. Las diferencias de los factores de seguridad entre ambos son mayores cuando el nivel freático es bajo en comparación a aquellos de nivel freático alto. La diferencia entre los análisis de estabilidad de taludes 2D y 3D para el nivel freático más profundo de las paredes fue de menos del 7 %, para el caso se análisis de la pared Este del tajo obtuvo como resultados de Factor de seguridad 1.80 y 1. 47 para el caso 3D y 2D respectivamente. Finalmente concluye que los análisis de estabilidad de taludes en 3D funcionan y pueden incorporarse a diseños de taludes de rutina.

Kalatehjari et al. (2014), sobre la determinación única del deslizamiento de un análisis tridimensional de estabilidad de taludes, el estudio consistió en escribir un código escrito para generar un modelo tridimensional realista de taludes y realizar el análisis de estabilidad. La aplicación del método presentado se verificó volviendo a analizar dos problemas de estabilidad de taludes de referencia de la literatura. El estudio afirma que el método de análisis tridimensional y búsqueda de la dirección única de desplazamiento es adecuado para taludes geoméricamente complejas ya que no es necesario definir un plano simétrico para el talud. Además, el proceso automático del método presentado lo hace adecuado para su uso en búsqueda avanzada. Estos resultados pueden contribuir a gestionar los problemas de los análisis convencionales de estabilidad de taludes bidimensionales y tridimensionales en términos de complejos pendientes y resolver las deficiencias de los métodos anteriores para determinar la dirección de deslizamiento.

Zhang et al. (2013), sobre los efectos de las geometrías sobre la estabilidad tridimensional de taludes para un método de numérico (FDM) de diferencias finitas, las superficies de talud curvas, esquinas giratorias, arcos y formas influyen en el factor de seguridad y superficies de deslizamiento por corte, bajo diferentes condiciones de contorno (liso y rugoso). Estos resultados se pueden utilizar directamente para dar sugerencias para la preparación ante peligros de deslizamientos de tierras o medidas económicas y seguras de diseño de infraestructura. El estudio concluye que para taludes cuyas esquinas tienen un giro

convexo el efecto actúa como una restricción para posibles desplazamientos aumentando el factor de seguridad en un 7.5% en taludes suaves y 7% en taludes pronunciados.

Kalatehjari & Ali (2013), hicieron una revisión del análisis de tridimensional de la estabilidad de taludes basados en el método de equilibrio limite, menciona que generalmente en este campo se implementan análisis bidimensionales por su sencillez y eficacia. Dado que este método ignora las características de la tercera dimensión del talud, se ha desarrollado análisis tridimensionales para eliminar esta deficiencia, sin embargo, todavía existen algunas limitaciones en la aplicación de estos métodos, la mayoría suponen planos de simetría para el talud. Además, las fuerzas internas de masa deslizante se simplifican en gran medida o se ignoran en las ecuaciones de factor de seguridad.

Leong y Rahardjo (2012), escribieron sobre la reanálisis de la estabilidad es taludes tridimensionales y bidimensionales del talud Bukit Batok, un talud de suelo residual en Singapur que llegó a fallar en dos ocasiones (1989 y 1991). Para el análisis se utilizó el software SVSlope 3D y de los resultados se mostró que la superficie fallo en 1989 debido al aumento del nivel freático, la diferencia entre los factores de seguridad de 2D y 3D encontrados es menor al 10 % y la relación no es lineal sino varía de acuerdo a la variación del nivel freático.

Huang et al. (2002), escribió el artículo sobre el método generalizado para el análisis de estabilidad de taludes tridimensionales, este método de equilibrio limite considera la fuerza y momento en dos direcciones ortogonales para analizar la estabilidad de una masa que tiene potencial a fallar. Como resultado la dirección del deslizamiento o fuerza cortante resultante sobre las superficies de deslizamiento es parte de la solución analítica más que una suposición. Se eliminan los posibles errores asociados a asumir un plano simétrico para una masa deslizante. Este método fue validado utilizando superficies de falla 2D y 3D.

Arellano y Stark (2000), se centra en la importancia de análisis tridimensional de la estabilidad de taludes, indica que los programas de software de estabilidad de taludes en 3D disponibles comercialmente no tienen en cuenta la resistencia al corte a lo largo de los dos lados verticales de la masa deslizante que son paralelos a la dirección del movimiento al calcular el factor de seguridad en 3D. Se presenta un método para incorporar la resistencia al corte a lo largo de los dos lados de una masa deslizante que consiste en colocar una fuerza externa horizontal y vertical equivalente a la resistencia al corte debido a la presión de tierra en reposo que actúa en el centroide de los lados paralelos a la dirección del movimiento de la masa deslizante. En consecuencia, el valor de la relación del factor de seguridad 3D/2D en el análisis de estabilidad de taludes aumenta al disminuir la relación de W/H, es decir a medida

que disminuye el ancho el peso de la masa deslizante disminuye y la resistencia al corte a lo largo de los lados paralelos tienen mayor efecto sobre la estabilidad 3D.

#### **2.1.1.2. Antecedentes nacionales.**

López (2023), en su investigación realizó la propuesta del análisis de estabilidad del talud de la quebrada Jilari con una metodología en 3D con el software FLAC3D, en comparación a los métodos en 2D usados tradicionalmente por su sencillez y facilidad. Los resultados obtenidos fueron factores de seguridad de  $FS = 1.5$  para el caso 3D y  $FS = 1.426$  para el caso de análisis en 2D, de estos valores se puede concluir que el método bidimensional es más conservador con respecto a su contraparte tridimensional. En la misma investigación se recomienda realizar más investigaciones en relación al análisis estabilidad de taludes usando varios métodos y programas de cómputo en tres dimensiones.

Curasma y Quinto (2019), en su investigación de tesis analizó la estabilidad de una ladera comparando los métodos de análisis en estudio. Indica que el método de equilibrio límite es más sencillo de emplear en la práctica, pero posee ciertas falencias debido a que considera equilibrio/ estático en cada tramo de ladera, por otro lado, el método de elementos finitos es más preciso dividido a su método de discretización de masas.

Quispe Daniel y Zuñiga Ángel (2019), en su investigación de tesis indica que la presa N°9 Acchilla – Ccochaccasa – Angares- Huancavelica bajo condiciones estáticas es estable, pero si analizamos en condiciones pseudo estáticas la condición es inestable. por otro lado, afirma que las fuerzas sísmicas influyen considerablemente sobre la estabilidad de la presa.

Medina y Maday (2018), en su trabajo determino el comportamiento sísmico de los taludes usando el software Slide, llegando a la conclusión de que es muy necesario calcular el coeficiente sísmico a la hora de diseñar y construir taludes en minería. También determino la eficacia del software Slide para la obtención del factor de seguridad en la estabilidad de taludes.

Alcántara (2017), en su investigación de tesis hizo la comparación usando el software Slide v6 (Método de equilibrio limite), software RS2 V9 (Método de elementos finitos) y el software FLAC v8 (Método de diferencias finitas), del trabajo se obtuvo como resultado que el software Slide destaca por su velocidad de análisis y confiabilidad, pero requiere de un gran conocimiento del tema ya que posee una variedad de métodos de análisis: por otro lado el software RS2 V9 que también analiza taludes y laderas de manera rápida aunque los valores de factor de seguridad son muy sub- estimados en relación a los otros softwares. Finalmente,

el software FLAC también arrojo resultados válidos, pero obligó a hacer optimizaciones en la geometría y grillas.

### **2.1.2. Definición de taludes.**

Se comprende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra. No hay duda que el talud constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas, sin olvidar el papel básico que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio aceptable. Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son lados inclinados de los terraplenes. En ciertos trabajos de la Ingeniería civil es necesario utilizar el suelo en forma de talud como parte de la obra. Tal es el caso de terraplenes en caminos viales, en presas de tierra (como la presa retardadora del Ludeña, Rosario), canales, etc; donde se requiere estudiar la estabilidad del talud. En ciertos casos la estabilidad juega un papel muy importante en la obra, condicionando la existencia de la misma como puede verse en presas de tierra, donde un mal cálculo puede fracasar la obra. (Matteis, 2003, p. 03)

### **2.1.3. Estabilidad de taludes.**

En el estudio de la estabilidad de taludes se abordan fenómenos de estado último o de rotura de masas de suelo. El “agente” externo responsable de la inestabilidad es una fuerza de masa: el peso y eventualmente los efectos de filtración a los que debe añadirse, generalmente como factor secundario, posibles cargas externas. (Agreda, 2005, p. 01).

La preponderancia de las acciones gravitatorias condiciona, sobre todo, la definición de seguridad frente a rotura. En el caso de una cimentación superficial, el cálculo de la carga de hundimiento, para unas características dadas del terreno, tiene un sentido obvio. De acuerdo con él, la propuesta de un factor de seguridad como cociente entre carga de rotura y carga de servicio, parece una elección razonable. Sin embargo, en el caso de la estabilidad ligada a fuerzas de masa tiene quizá poco sentido el cálculo de la “fuerza de masa en rotura”. Existen por supuesto, alternativas, que se desarrollan en el capítulo, pero conviene apuntar aquí que la cuantificación de la seguridad de taludes

frente a rotura es 20 un problema difícil, con abundantes ambigüedades y lejos aún de alcanzar, en la práctica, un estatus satisfactorio. (Agreda, 2005, p. 01)

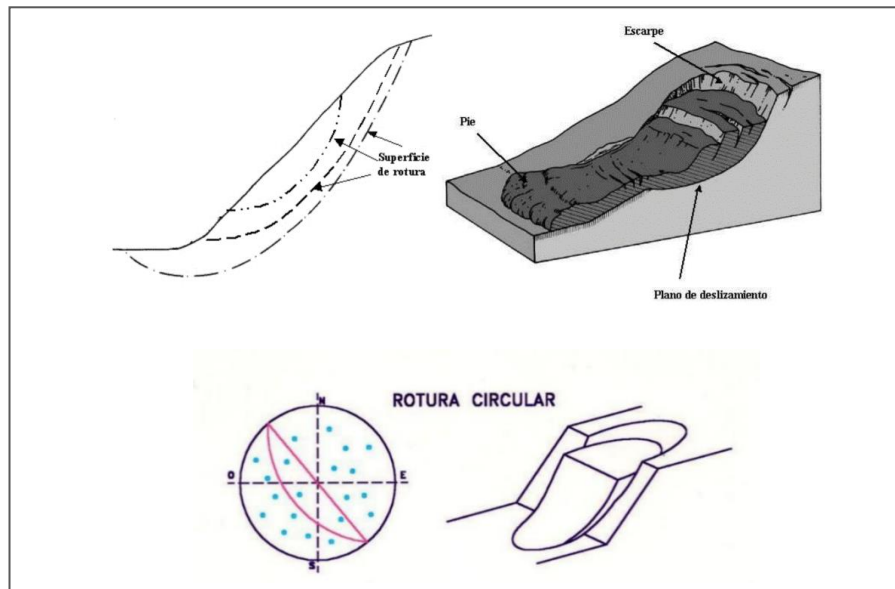
#### 2.1.4. Tipos de falla de taludes

##### 2.1.4.1. Rotura circular

Se produce en caso de suelos escombros y macizos rocosos de baja calidad muy alterados o meteorizados, la rotura se produce a través de la masa o el macizo (sin seguir discontinuidades) siguiendo la línea de menor resistencia. En el ámbito minero esta rotura es relativamente común en escombreras y presas estériles, y también en taludes de explotaciones de arcillas o arenas, carreteras y laderas naturales (Ramírez & Alejano, 2004)

**Figura 2**

*(a) Condición estructural en rotura circular (b) Representación estereográfica*



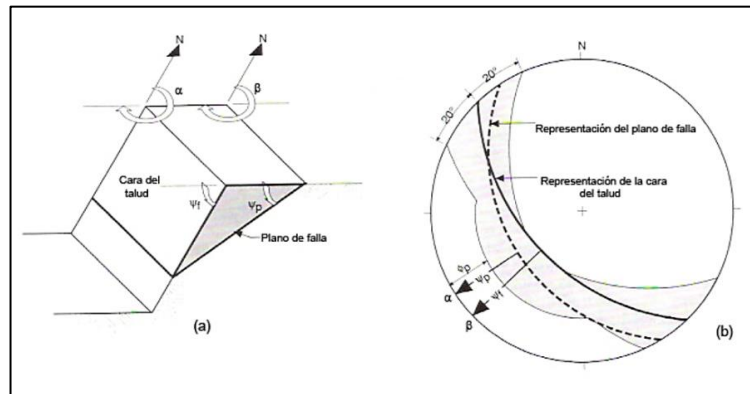
*Nota:* la figura muestra las condiciones de una rotura circular. Fuente: Centro Geotécnico Internacional (2020).

##### 2.1.4.2. Rotura planar

La rotura plana de taludes tiene lugar sobre todo en macizos rocosos constituidos por rocas de resistencia media o alta afectadas por fallas y diaclasas. Este tipo de rotura consiste en el deslizamiento de una masa de roca a lo largo de un plano de discontinuidad que ha quedado descalzado por la cara del talud. En la Figura se muestra esquemáticamente este tipo de rotura. (Ramírez & Alejano, 2004)

**Figura 3**

*Condición estructural en un deslizamiento plano (b) Representación estereográfica*



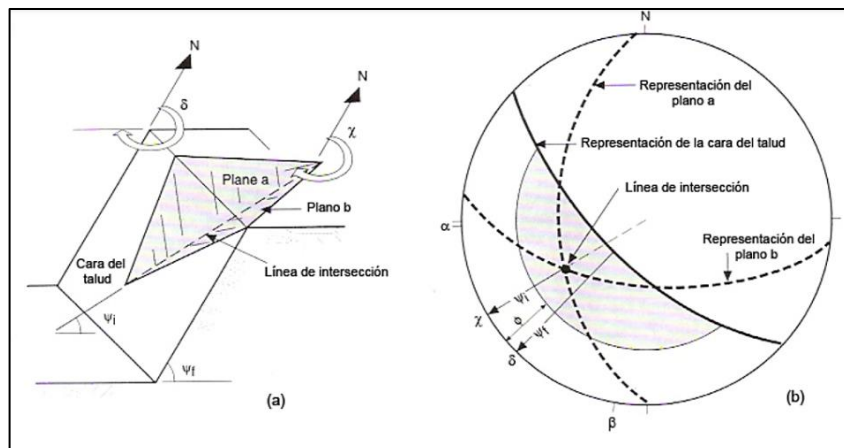
*Nota:* la figura muestra las comisiones de una rotura planar. Fuente: Centro Geotécnico Internacional (2020).

#### 2.1.4.3. Rotura en cuña

La rotura en cuña es un tipo de deslizamiento traslacional que está controlado por dos o más discontinuidades (estratificación, esquistosidad, diaclasas, fallas, etc). Este tipo de deslizamientos generalmente se dan en macizos rocosos resistentes, con discontinuidades bien marcadas. (Ramírez & Alejano, 2004)

**Figura 4**

*Condición estructural en un deslizamiento en cuña (b) Representación estereográfica*



*Nota:* condición estructural y estereográfica de la falla tipo cuña. Fuente: Centro Geotécnico Internacional (2020).

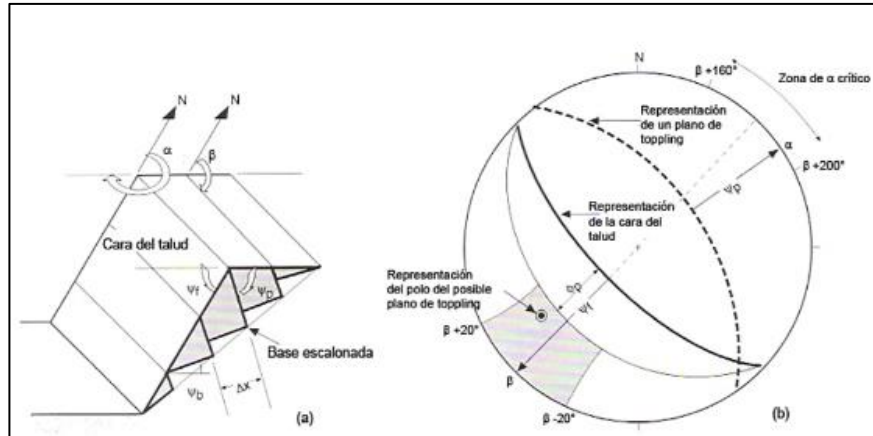
#### 2.1.4.4. Rotura en vuelco

Las roturas por vuelco de taludes aparecen principalmente cuando el rumbo del plano de discontinuidad: falla, estratificación, etc., coincide aproximadamente con el del plano del

talud y además tiene un fuerte buzamiento hacia el interior del macizo rocoso. (Ramírez & Alejano, 2004)

**Figura 5**

(a) Condición estructural para toppling (b) Representación estereográfica



Nota: condición estructural de la falla tipo vuelco. Fuente: Centro geotécnico internacional (2020).

### 2.1.5. Factor de seguridad

El factor de seguridad es una medida de la relación entre las fuerzas de resistencia (estabilizadoras) y fuerzas impulsoras (desestabilizadoras) que convergen en un sistema de análisis.

$$FoS = \frac{E}{D} \quad (1)$$

El criterio de diseño básico de aceptación de cualquier análisis de estabilidad en ingeniería es el factor de seguridad. La geotecnia se empezó a desarrollar como una disciplina independiente a mediados del siglo XX desde entonces cobro mayor importancia el concepto de factor de seguridad. Taylor lo definió como la división entre la resistencia al corte del material que representa el talud y el esfuerzo cortante a lo largo de la superficie de falla poten potencial. El equilibrio limite se cumple cuando el FoS es igual a 1.0. (Read et al., 2010)

### 2.1.6. Métodos de equilibrio limite

Los métodos de equilibrio límite son mucho más utilizados que los métodos de cálculo en deformaciones a pesar de que éstos proporcionan un análisis mucho más completo de la estabilidad del talud. Esto es debido a que los métodos de cálculo en deformaciones son mucho más largos y costosos en su ejecución y a que los métodos de equilibrio límite están ampliamente contrastados en la práctica y se conocen sus límites y grados de confianza (Ayala, 1986, p.188)

### 2.1.7. Método de las dovelas

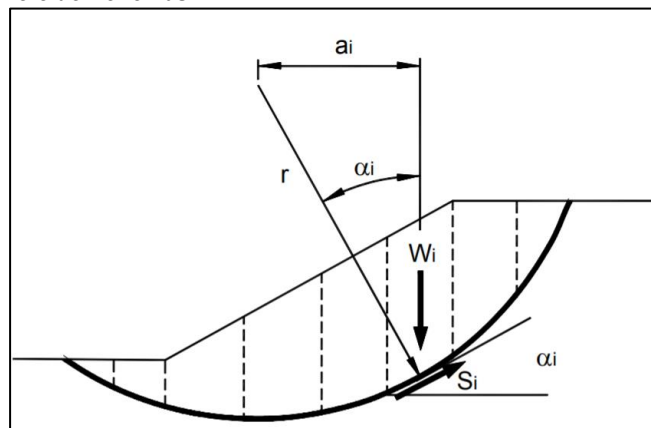
En la mayoría de los métodos con fallas curvas o circulares, la masa de la parte superior de la superficie de falla se divide en una serie de tajadas verticales. El número de tajadas depende de la geometría del talud y de la precisión requerida para el análisis. Entre mayor sea el número de tajadas, se supone que los resultados serán más precisos. En los procedimientos de análisis con tajadas, generalmente se considera el equilibrio de momentos con relación al centro del círculo para todas y cada una de las tajadas. Entre los diversos métodos que utilizan dovelas, hay diferencias, especialmente en lo referente a las fuerzas que actúan sobre las paredes laterales de las tajadas. El método ordinario o de Fellenius, no tiene en cuenta las fuerzas entre tajadas. El método simplificado de Bishop supone que las fuerzas laterales entre tajadas, son horizontales y desprecia las fuerzas de cortante y otros métodos más precisos como los de Morgenstern y Price, que utilizan una función para calcular las fuerzas entre dovelas. (Suárez, 2009, p. 153)

#### 2.1.7.1. Método ordinario de Fellenius

El método de Fellenius es conocido también como método Ordinario, método sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo (producidos por estas fuerzas) se obtiene el Factor de Seguridad. (Suárez, 2009, p. 153)

**Figura 6**

*Esquema método ordinario o de Fellenius*



*Nota:* Esquema de un sistema típico de análisis con tajadas o dovelas. Fuente: Duncan y Wright (2005).

### 2.1.7.2. Método de Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Bishop asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales, es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante. La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón, se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo con la ecuación (2):

$$F.S. = \frac{\sum \left[ \frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W' u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\sec \alpha \tan \phi') / FS} \right]}{\sum W \sec \alpha} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta l$  = longitud de arco de la base de la dovela

$W$  = Peso de cada dovela  $C'$ ,

$\phi$  = Parámetros de resistencia del suelo.

$u$  = Presión de poros en la base de cada dovela  $= \gamma_w \times h_w$

$\alpha$  = Angulo del radio y la vertical en cada dovela

El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario. Aunque existen métodos de mayor precisión que el método de Bishop, las diferencias de los factores de seguridad calculados, no son grandes. La principal restricción del método de Bishop simplificado, es que solamente considera las superficies circulares. (Suárez, 2009, p. 155)

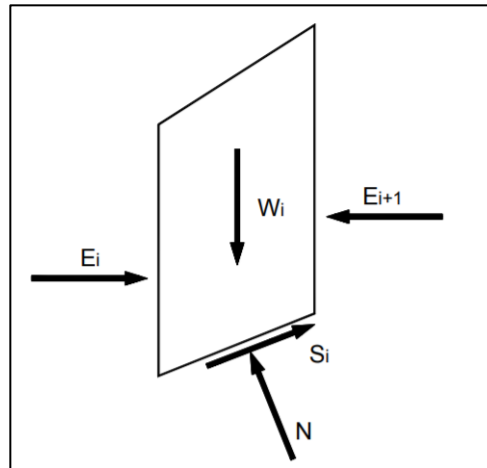
### 2.1.7.3. Método de Jambu

El método simplificado de Janbú se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante.

Janbú considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección  $f_0$ . El factor  $f_0$  depende de la curvatura de la superficie de falla. Estos factores de corrección son solamente aproximados y se basan en análisis de 30 a 40 casos.

En algunos casos, la suposición de  $f_0$  puede ser una fuente de inexactitud en el cálculo del factor de seguridad. Sin embargo, para algunos taludes la consideración de este factor de curvatura representa el mejoramiento del análisis. (Suárez, 2009, p. 155)

**Figura 7**  
*Esquema del método Bishop*



*Nota:* Esquema de fuerzas sobre una dovela en el método de Bishop simplificado. Fuente: Duncan y Wrigth (2005).

El método de Janbú solamente satisface el equilibrio de esfuerzos y no satisface el equilibrio de momentos. De acuerdo con Janbú, ecuación modificada (3):

$$F.S. = \frac{f_0 \sum \left\{ \left[ c'b + (W - ub) \tan \phi \right] \frac{1}{\cos \alpha \, ma} \right\}}{\sum (W \tan \alpha)} \quad (3)$$

#### 2.1.7.4. Método de Spenser

El método de Spenser es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spenser (1967) se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación.

La inclinación específica de estas fuerzas entre partículas, es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spenser inicialmente

propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares.

Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad  $F$  y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas  $\theta$ . (Suárez, 2009, p. 156)

Para resolver las ecuaciones  $F$  y  $\theta$ , se utiliza un sistema de ensayo y error donde se asumen los valores de estos factores hasta que se alcanza un nivel aceptable de error. (Suárez, 2009, p. 156)

Una vez se obtienen los valores de  $F$  y  $\theta$  se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad. (Duncan y Wright, 2005).

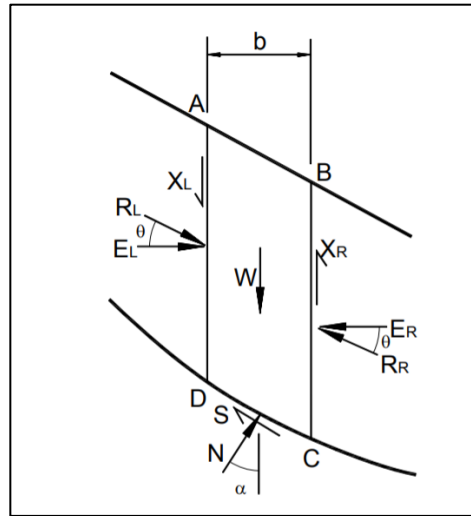
#### **2.1.7.5. Método de Morgenstern Price**

El método de Morgenstern y Price (1965) asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas.

Esta función puede considerarse constante, como en el caso del método de Spencer, o puede considerarse otro tipo de función. La posibilidad de suponer una determinada función para determinar los valores de las fuerzas entre dovelas, lo hace un método más riguroso que el de Spencer. Sin embargo, esta suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo de factor de seguridad cuando se satisface el equilibrio estático y hay muy poca diferencia entre los resultados del método de Spencer y el de Morgenstern y Price. El método de Morgenstern y Price, al igual que el de Spencer, es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo. (Suárez, 2009, p. 157)

**Figura 8**

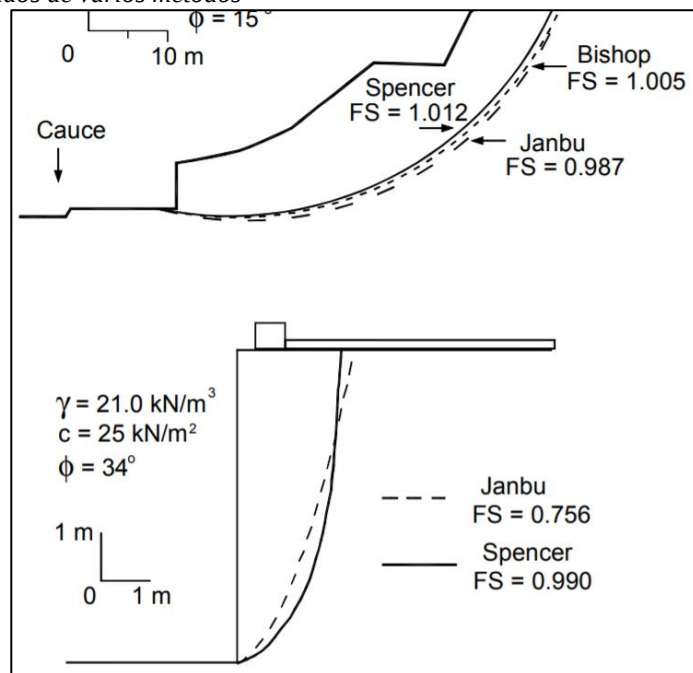
*Método de las dovelas*



*Nota:* Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método de Spencer. Fuente: Suárez (2009).

**Figura 9**

*Diferencias entre resultados de varios métodos*



*Nota:* Diferencias entre los resultados de varios métodos. ¿En cuál de los casos es fundamental saber cuál de los métodos es el que da el verdadero valor del Factor de Seguridad? Fuente: Dibujo de Payá.

**Tabla 2***Resultados de diferentes factores de seguridad según método*

| Talud                               | Factor de seguridad |         |       |                   |           |
|-------------------------------------|---------------------|---------|-------|-------------------|-----------|
|                                     | Bishop              | Spencer | Janbú | Morgenstern-Price | Ordinario |
| Talud 2H:1V                         | 2.08                | 2.07    | 2.04  | 2.08              | 1.93      |
| Talud sobre una capa de suelo débil | 1.38                | 1.37    | 1.45  | 1.38              | 1.29      |
| Talud con una línea Piezométrica    | 1.83                | 1.83    | 1.83  | 1.83              | 1.69      |
| Talud con dos líneas piezométricas  | 1.25                | 1.25    | 1.33  | 1.25              | 1.17      |

*Nota:* Comparación de los resultados del cálculo de factor de seguridad para varios métodos. Fuente: Fredlund y Krahn (1977).

En la tabla 03 se muestra las condiciones de equilibrio satisfechas por cada método de análisis, se puede observar que el método de Spencer y Morgenstern Price satisfacen la condición de equilibrio de fuerzas en Y, X y equilibrio de momentos, además constituyen métodos ampliamente usados por los ingenieros geotécnicos en las minas peruanas, razón por la cual el presente estudio hará uso de esos métodos.

**Tabla 3***Condiciones de equilibrio satisfecha por cada método de análisis*

| Método                  | Equilibrio de fuerzas |    | Equilibrio de momentos |
|-------------------------|-----------------------|----|------------------------|
|                         | x                     | y  |                        |
| Fellenius OMS           | No                    | No | Si                     |
| Bishop Simplificado     | Si                    | No | Si                     |
| Jambu Simplificado      | Si                    | Si | No                     |
| Us Cuerpo de Ingenieros | Si                    | Si | No                     |
| Lowe & Karafiath        | Si                    | Si | No                     |
| Morgenstern & Price     | Si                    | Si | Si                     |
| Spencer                 | Si                    | Si | Si                     |
| Sarma                   | Si                    | Si | Si                     |

*Nota:* Se muestra los resultados de cálculo de equilibrio de fuerzas y momentos por cada método usado. Fuente: Read y Stacey (2009).

### 2.1.8. Análisis pseudoestático.

Para evaluar la estabilidad de taludes sujetos a cargas sísmicas, ya sea considerando al suelo como bloque rígido o por medio del método de las dovelas también se puede utilizar “el método pseudo estático de equilibrio limite”. Este procedimiento considera que el efecto

del sismo (coeficiente sísmico) sobre el talud, puede ser representado a través de un set de fuerzas horizontales y/o verticales estáticos que actúan en el centro de gravedad de la masa del suelo potencialmente inestable. Sin embargo, esta metodología no proporciona información sobre las deformaciones y desplazamientos permanentes inducidos por fuerzas sísmicas. (Viejo, 2016)

#### **2.1.9. Criterios de rotura.**

Los Criterios de falla que más se utiliza en la geotecnia son el criterio de Hoek – Brown (1980) y Mohr Coulomb. Un criterio de rotura se define como la relación entre esfuerzos que permite predecir la resistencia de un macizo rocoso a un entorno tensional. Nos permite obtener la resistencia pico y resistencia residual. (Ramírez & Alejano, 2004)

##### **2.1.9.1. Criterio de rotura de Mohr – Coulomb.**

“Este criterio postula que la resistencia al corte de las rocas tiene dos componentes: Cohesión y fricción, siendo esta última dependiente de la tensión efectiva normal sobre el plano de rotura” (Ramírez & Alejano, 2004, p. 56)

“Según esta teoría la resistencia al corte puede desarrollar una roca en un plano que forma un ángulo  $\beta$  con tensión principal menor,  $\sigma_3$ , se puede expresar mediante la formula (3)”. (Ramírez & Alejano, 2004, p. 56)

$$\tau = c + \sigma'_n \tan \phi \quad (3)$$

Donde:

$\tau$  = Resistencia al corte

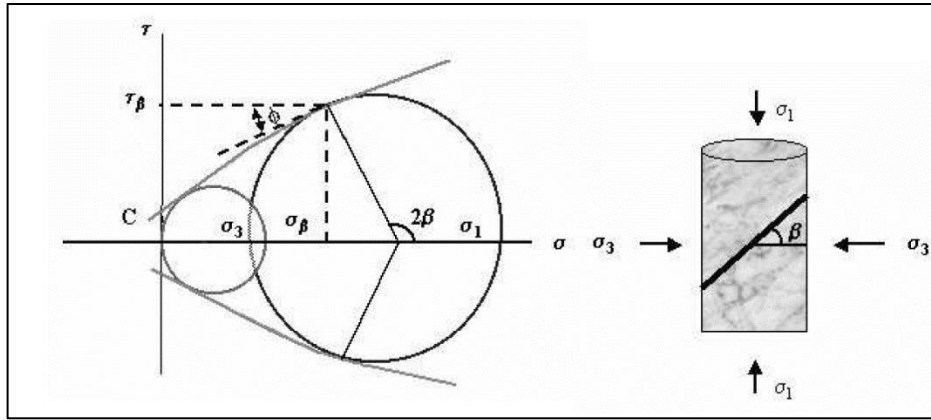
$c$  = Cohesión

$\sigma'_n$  = Tensión efectiva normal

$\phi$  = Angulo de fricción

**Figura 10**

*Criterio de rotura Mohr – Coulomb*



*Nota.* La figura muestra el esquema del criterio de Mohr- Columb. Fuente: Ramírez y Alejano (2004).

#### 2.1.9.2. Criterio generalizado de Hoek – Brown.

Hoek et al (2002) publicaron la versión actualizada del criterio de rotura propuesto en 1980, con el objetivo de esclarecer algunas incertidumbres y dudas que se tenían en el criterio en versiones anteriores, esto causo que los especialistas de la geotécnica y geomecánica tengan ciertos problemas en la aplicación de modelos numéricos y problemas, particularmente la dificultad de encontrar los valores adecuados de cohesión (C) y ángulo de fricción interno (Φ). De esta forma la versión más reciente del criterio se resume en la ecuación (4).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( \sigma_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

Donde las constantes  $m_b$ ,  $s$  y  $a$  son:

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (5)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (7)$$

El factor D depende del grado de perturbación del macizo rocoso producto de la voladura de rocas. El factor D tiene un rango de variación de 1 a 0, donde 1 es el valor que representa a los macizos altamente perturbados. Otro parámetro introducido por Hoek el al

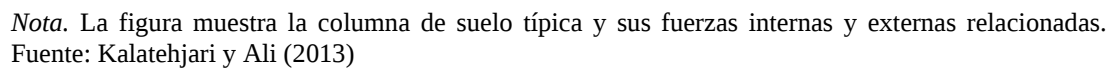
(1994) es el Índice de Resistencia Geológica (GSI) esto en sustitución del valor del RMR propuesto por Bieniawski debido a que esta clasificación no es adecuada para el análisis de macizos rocosos de mala calidad.

#### **2.1.10. Método de equilibrio límite tridimensional.**

Desde 1969 y las ultimas décadas se han presentado análisis de estabilidad tridimensionales de taludes, todos los métodos de equilibrio límite 3D existentes se dedujeron a partir de cortes en 2D, para ello con el fin de convertir los cortes de 2D en el análisis de taludes 3D es necesario cambiar las secciones en columnas agregando así una tercera dimensión. Por lo tanto, ahora las condiciones estáticas de límite ya deben satisfacer el equilibrio de columnas. Algunas definiciones nuevas solo se presentan en los métodos 3D debido a la tercera dimensión adicionada como por ejemplo la forma 3D de la superficie de deslizamiento, la forma simétrica de la pendiente la dirección de desplazamiento y las fuerzas entre columnas, estos nuevos conceptos en cada método 3D se puede simplificar o ignorar.(Kalatehjari y Ali, 2013.)

La figura 11 muestra una columna de suelo típica y sus fuerzas internas y externas relacionadas donde para la columna (i,j),  $W_{i,j}$  es peso del suelo,  $L_{z,i,j}$  es la carga vertical externa,  $L_{x,i,j}$  y  $L_{y,i,j}$  son respectivamente cargas horizontales externas en las direcciones x e y,  $F_{e v,i,j}$  es la fuerza vertical inducida por el terremoto,  $F_{e h x,i,j}$  y  $F_{e h y,i,j}$  son fuerza horizontal respectivamente inducida por un terremoto en las direcciones x e y,  $E_{x,i-1,j}$  y  $E_{x,i,j}$  son inter fuerzas normales de las columnas en la dirección x,  $E_{y,i,j-1}$  y  $E_{y,i,j}$  son fuerzas normales entre columnas en la dirección y,  $X_{x,i-1,j}$  y  $X_{x,i,j}$  son fuerzas cortantes verticales entre columnas en la dirección x,  $X_{y,i,j-1}$  y  $X_{y,i,j}$  son verticales fuerzas cortantes entre columnas en la dirección y,  $H_{x,i-1,j}$  y  $H_{x,i,j}$  son fuerzas cortantes horizontales entre columnas en dirección x,  $H_{y,i,j-1}$  y  $H_{y,i,j}$  y fuerzas cortantes horizontales entre columnas en dirección y,  $S_{i,j}$  son fuerzas cortantes fuerza de resistencia en la base de la columna, y  $N_{i,j}$  y  $U_{i,j}$  son, respectivamente, la fuerza normal total y la fuerza de poro. Fuerza del agua en la base de la columna. Algunas de estas fuerzas pueden ignorarse, simplificarse o asumirse en diferentes métodos. La siguiente sección describe las principales características y aplicaciones de Métodos 3D existentes basados en LEM.(Kalatehjari y Ali, 2013, p. 121)

*Columna de suelo 3D típica*



Según Wines en el 2016, la precisión, confiabilidad y factibilidad de la implementación de métodos de equilibrio límite y análisis tridimensionales aumentan al poder representar la verdadera naturaleza del problema de los taludes, así como simular geometrías complejas que ayudan a modelar de manera más realista las condiciones del terreno. Estos parámetros ayudan a tener también factores de seguridad más realistas respecto a los análisis bidimensionales que consideran taludes de longitudes homogéneas. No se puede definir un número exacto del valor de presión, consistencia y confiabilidad ya que esto varía de acuerdo a las condiciones geológico - geotécnicas de las diferentes minas y también debido a que no se tienen estudios enfocados en el tema, pero si se mencionan que la presión y confiabilidad aumenta debido a que se simula utilizando más parámetros geométricos en relación a los métodos de equilibrio límite bidimensionales.

## CAPÍTULO III

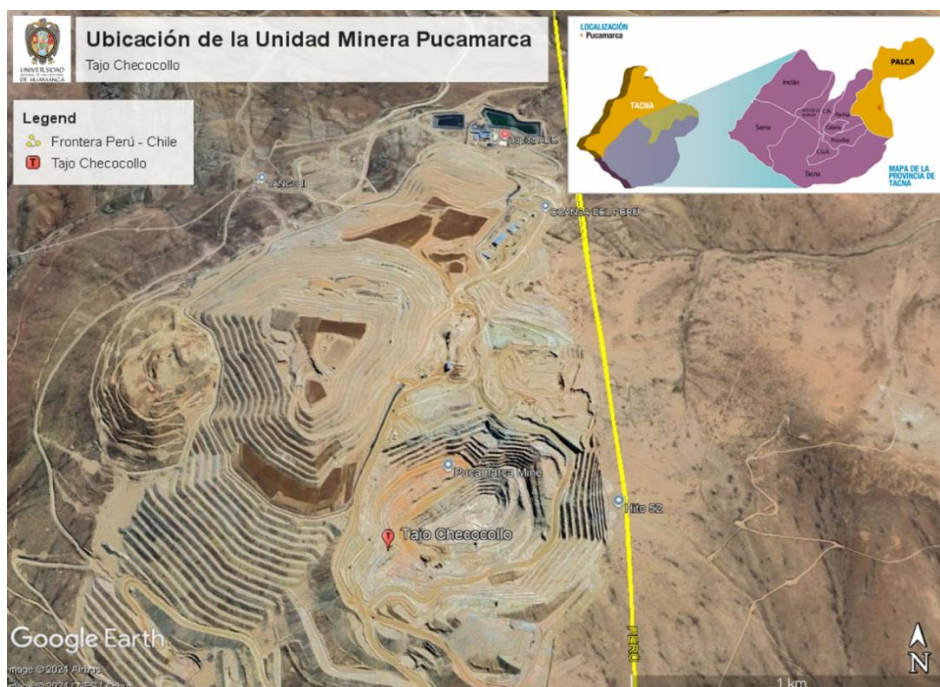
### 3.1. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1.1. Ubicación

La unidad minera Pucamarca se ubica al sur del Perú en el distrito del Palca, provincia y departamento de Tacna, el área del proyecto pertenece a la comunidad de Vila Vilani y el campamento de la unidad en el territorio de la comunidad de palca. Las coordenadas aproximadas son 41000E y 8030000 n (UTM, Zona 19). El tajo minero se encuentra en el cerro Checocollo al oeste de la frontera con el país vecino de Chile.

**Figura 12.**

*Ubicación de la Unidad Minera - Pucamarca*



*Nota:* la figura muestra que la unidad minera Pucamarca se encuentra el distrito de Palca Fuente: Google Earth (2024)

### **3.1.2. Accesibilidad**

**Vía aérea:** Desde la ciudad de Lima a Tacna con una duración de 1 hora con 35 minutos aproximadamente. Seguidamente con 3 horas a la unidad minera Pucamarca.

**Vía Terrestre.** Desde la ciudad de Lima Tacna con un recorrido de 1229 Km y una duración de 18h 49 min. Seguidamente con 3 horas a la unidad minera Pucamarca.

### **3.1.3. Geología**

#### **3.1.3.1. Geología Regional**

El entorno geológico regional de la mina Pucamarca, se sitúa dentro de un área que está constituida por presencia de rocas volcánicas del Cretácico superior y Terciario superior. La construcción del proyecto se hizo en esta misma zona. Como secesiones cercanas a estas se muestran secuencias sedimentarias de Jurásico y Cretácico, las cuales a su vez están cercadas por sucesiones volcánicas del Jurásico. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

#### **3.1.3.2. Geología Estructural**

##### **A. Precambriano**

**Complejo basal de la costa.** La estructura para este caso está vinculada a los gneis, esquistos, filitas, cuarcitas, filitas, cuarcitas y volcánicas. El gneis es un ortogneis granodiorítico de grano medio a grueso, con particiones de diferentes minerales compuesta de hornblenda, cuarzo y mica de feldespato. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

##### **B. Mesozoico**

###### **B.1. Triásico**

**Formación Machani.** La estructura para este caso está vinculada a lutitas, conglomerados y areniscas. Sucesión de areniscas, conglomerados y lutitas negras que sobreyacen al gneis del precámbrico con discordancia angular y subyacen a los volcánicos de la formación Junerata. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

###### **B.2. Jurásico inferior medio.**

**Formación Junerata.** La estructura para este caso está vinculada a derrames andesíticos. Está compuesta mayormente por bancos gruesos de andesita porfídica gris verdosa y rojiza con variaciones regionales a volcánicos ácidos de color claro; subyace a la formación pelado con discordancia paralela. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

**Formación Pelado.** La estructura para este caso está vinculada a calizas y lutitas. Alteración de calizas, lutitas calcáreas, limolitas calcáreas, calizas arenosas y

conglomerados de guijarros volcánicos, suele presentarse con discordancia paralela debajo de las rocas del grupo Yura del cretáceo inferior. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

### ***B.3. Jurásico medio.***

**Formación San Francisco.** La estructura para este caso está vinculada a calizas y lutitas. Unidad litológica consiste en areniscas, lutitas y calizas, correlacionable con la formación Socosani de Arequipa. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

### ***B.4. Jurásico Superior.***

**Formación Ataspaca.** La estructura para este caso está vinculada a pizarras y areniscas. Secuencia de areniscas y cuarcitas intercaladas con lutitas oscuras y calizas erráticas, el contacto con la formación Chachacumane sobreyacente no es muy claro dada su variación graduacional. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

### ***B.5. Cretáceo inferior***

**Formación Chachacumane.** La estructura para este caso está vinculada a las cuarcitas. Consistente de cuarcitas blancas en bancos gruesos intercalados con lutitas oscuras. Las cuarcitas muestran estratificación cruzada.

**Formación Chulluncane.** La estructura para este caso está vinculada a areniscas y conglomerados. Conformada por conglomerados y areniscas tufáceas. Esta formación sobreyacente a las cuarcitas blancas de la formación Chachacumane e subyace a los volcánicos de la formación Huilacollo teniendo en cuenta que sus relaciones estratigráficas son discordancias angulares. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

### ***B.6. Cretáceo superior.***

**Formación Toquepala.** Presenta una litológica variable, consiste de volcánicas intercalados con lentes de sedimentos. Los volcánicos varían en composición entre riolitas y andesitas, los sedimentos intercalados con conglomerados y areniscas feldespáticas. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

## **C. Cenozoico**

### ***C.1. Terciario paleoceno – eoceno.***

**Formación Tarata.** La estructura para este caso está vinculada monzonitas, dioritas, granodioritas, conglomerados, areniscas, tufos y brechas andesitas. Alternancia de conglomerados, areniscas tufáceas, brechas volcánicas, lutitas verdosas y derrames

andesíticos. Superyace a la formación Toquepala con discordancia angular. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

### ***C.2. Terciario eoceno – oligoceno.***

**Formación Huilacollo.** La mayor parte de la roca es de composición andesítica con algunas dacitas. Esta formación yace en discordancia paralela debajo de la formación Huaylillas e subyace localmente a la formación barroso con discordancia angular, es una unidad muy importante para el yacimiento de Pucamarca. Consiste en derrames y piroclásticos volcánicos, con un predominio de brechas, aglomerados y tufos de grano grueso. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

### ***C.3. Terciario – Mioceno.***

**Formación Moquegua.** La estructura para este caso está vinculada a conglomerados y areniscas. Compuesto en gran parte por conglomerados y cantidades menores de areniscas. Los conglomerados sin de fragmentos de rocas volcánicas con poco contenido de material sedimentario.

### ***C.4 Terciario – Plioceno.***

**Formación Huaylillas.** Unidad importante para el proyecto Pucamarca, pues tendrá relación con el intrusivo pórfido de cuarzo. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016)

### ***C.5. Cuaternario – pleistoceno.***

**Depósitos fluvio-glaciares.** La estructura para este caso está vinculada a cantos subangulares de roca volcánica en una matriz gredosa. Depósitos que influyen morrenas laterales y terminales, gravas y areniscas depositadas por las aguas provenientes de los glaciares. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

**Depósitos aluviales.** Integra terrazas fluviales, depósitos de derrumbes. Las terrazas fluviales consisten de conglomerados con una matriz de arena y lodo con una variedad litológica. Los depósitos de piedemonte consisten en conglomerados, grava y arena también de litología variada. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

### ***C.6. Cuaternario – Holoceno***

**Depósitos fluviales.** Depósitos de gravas y arenas en pleno proceso de transporte y deposición temporal en el fondo de los ríos.

**Depósitos de ceniza.** Litológicamente consiste en ceniza volcánica de color blanco o rosado con fragmentos de pómez blanca, su relación es desconocida.

**Figura 13**

*Columna estratigráfica UM. Pucamarca*

| ERA       | SISTEMA     | SERIE      | UNIDAD ESTRATIGRÁFICA     |                        | SECCIÓN | DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA                                                                          |                                                                                                                       |
|-----------|-------------|------------|---------------------------|------------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CENOZOICO | CUATERNARIO | HOLOCENO   | Depósitos Aluviales       |                        |         | Limos arenas grava redondeada sueltas a inmediatamente consolidada.                             |                                                                                                                       |
|           |             |            | Depósitos Coluviales      |                        |         | Mezcla caótica de gravas y bloques angulosos a subangulosos.                                    |                                                                                                                       |
|           |             | PLISTOCENO | Depósitos Fluvioglaciales |                        |         | Limos, arenas y grava fina con escasa selección.                                                |                                                                                                                       |
|           | TERCIARIO   | SUPERIOR   | Volcánicos Barroso        |                        |         | Derrames y piroclastos traquíticos, andesíticos.                                                |                                                                                                                       |
|           |             |            | Volcánicos Huaylillas     |                        |         | Tufos riolíticos de grano fino o grueso en bancos gruesos.                                      |                                                                                                                       |
|           |             | INFERIOR   | Volcánicos Huilacollo     |                        |         | Derrames lávicos, brechas, tufos andesíticos y dacíticos, mineralización aurífera epitermal.    |                                                                                                                       |
| MESOZOICO | CRETACEO    | SUPERIOR   | GRUPO TOQUEPALA           | Formación Toquepala    |         | Andesita o riolita con algunas intercalaciones de conglomerados por intrusivos granodioríticos. |                                                                                                                       |
|           |             |            |                           | Formación Chulluncane  |         | Conglomerado compacto en bancos gruesos, intersectado por intrusivos granodioríticos.           |                                                                                                                       |
|           |             | INFERIOR   | GRUPO YURA                | Formación Chachacumane |         | Cuarcitas blancas con intercalaciones de lutitas presencia de intrusivos granodioríticos.       |                                                                                                                       |
|           | JURÁSICO    | SUPERIOR   |                           | Formación Ataspaca     |         | Intercalaciones de areniscas y lutitas calcáreas en estratos delgados.                          |                                                                                                                       |
|           |             | INFERIOR   |                           | Formación Pelado       |         |                                                                                                 | Calizas grises en parte marmolizadas con intercalación de lutitas calcáreas, presencia de intrusivos granodioríticos. |
|           |             |            |                           | Volcánicos Junerata    |         |                                                                                                 | Riolita y andesita en bancos gruesos.                                                                                 |

*Nota:* La figura muestra la columna estratigráfica del cerro Checocollo. Fuente: Geología Minsur (2023).

### 3.1.3.3. Geología local

En la mina Pucamarca, exactamente en el cerro Checocollo, se ubican la sucesiones vulcano clásticas de las clases andesíticas – dacitas de la formación Huilacollo, instruida por un stock discontinuo de pórfidos cuarcíferos (cerro Checocollo).

También están presentes los volcánicos Hilacollo que se exhiben al norte, sur y este del cerro Checocollo. Su litología es constituida por la clase dacita – andesita y comprende,

brechas de flujo, piroclastos, aglomerados, tobas de grano grueso y derrames de lava. Para el lado izquierdo del canal Ushusma que es la parte externa del proyecto la unidad se presenta fuertemente cloritizada, producto de la interacción del pórfido feldespático con los volcánicos que afloran en la zona del cerro caldero. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

La geología de la mina Pucamarca y la zona del cerro Checocollo nos da a entender que inicialmente se produjo la una intrusión de un pórfido cuarcífero que atravesó los volcánicos Huilacollo, formando así diferentes unidades litológicas. Inicialmente se formó una brecha híbrida, a manera de un casquete en la parte superior del aparato volcánico, subsecuentemente a este evento se produjo un vulcanismo hipo abisal, el cual determino la formación de una diatrema, con alto contenido gaseoso en su avance, Debido a este proceso se produjo un sistema complejo de brechas de explosión (tufo brecha) a manera de diques, cuellos y pipas; brechas fragmentales, así como diques de tufisita. Todas estas unidades litológicas cruzan en diferentes direcciones todo el sistema. Dentro de la diatrema y en sus bordes periféricos, se ha hospedado una mineralización de tipo Epitermal de alta sulfuración de Au – Ag La mineralización se presenta a manera de fina disseminación de Au y Ag, dentro de las rocas y (o matriz que forman la diatrema. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

En profundidad, en base a los sondeos diamantinos, se ha identificado diques de andesitas porfídicas que atraviesan al pórfido feldespático, por lo cual han producido una brecha de contacto. Además, también puede haber servido como un límite litológico para la concentración de mineralización de oro y cobre. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

#### **3.1.4. Tipo de yacimiento**

El tipo de la mina Pucamarca constituye una alteración hidrotermal. Los tipos más comunes de alteración hidrotermal son una silificación intensa, argilización moderada y también una propilitización moderada dentro de la mina. Con los reportes recopilados de los logeos de las perforaciones diamantinas DDH, se concluye que han existido varios periodos de alteración con diversa intensidad. Se puede observar que la salificación en su grado máximo se encuentra en el cerro Checocollo. Realizando una sección imaginaria de la zona central de máxima alteración se puede observar variaciones gradacionales de menor a mayor intensidad. La silificación continuada y la actividad tectónica intermitente produjeron inicialmente, brechamiento o brechas y luego salificación de diferentes tipos como la sílice masiva y la sílice porosa (sílica vuggy). (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

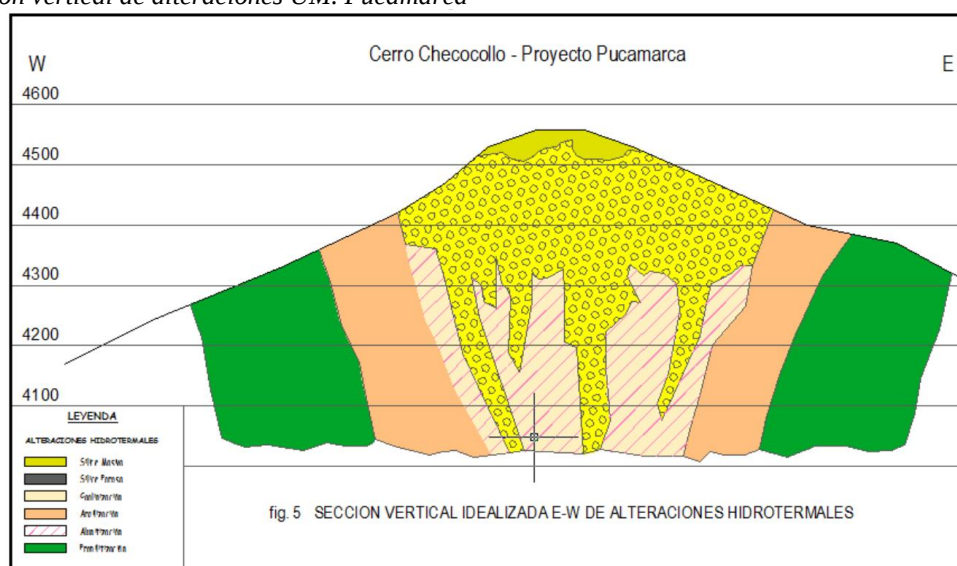
### 3.1.5. Mineralización

La mineralización encontrada dentro la unidad minera Pucamarca puede ser considerada de dos tipos: sulfuros y metales preciosos de Au – Ag en una fase de óxidos (HS). Dentro de la mina Pucamarca y el proyecto Checocollo, se ubica la mineralización de Au – Ag en una fase de óxidos (HS). Esta información en base al análisis se ha podido determinar que existe una correlación directa entre Au y Ag y elementos como As, Sb, Hg, y Te. Estos elementos son típicos del ambiente epitermal de alta sulfuración. La mineralización de metales preciosos como el oro (Au) y la plata (Ag), es de tipo diseminado y se caracteriza por la asociación de oro libre, oropimente – rejalgar – cinabrio – azufre. La plata parece recurrir como sulfosales o acantita, su relación con el oro, en algunos casos es directa pero también se presenta independientemente. Especialmente en zonas periféricas con valores de 60 ppm Ag. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

La actuación de los elementos traza es similar a los comportamientos establecidos en otros yacimientos epitermales de alta sulfuración. El antimonio, mercurio y azufre muestran un fuerte incremento cuando los valores de oro y plata son altos. El arsénico, siendo elemento importante del sistema epitermal, no guarda relación directa, sin embargo, es el elemento traza más característico y fácilmente visible. Este elemento nos determina un halo mineralizante en campo, que nos indica un cambio de leyes medias ( $>0.7$  ppm Au) a leyes altas que en promedio pueden llegar a 3 ppm Au, especialmente cuando se asocian azufre nativo más jarosita. (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016).

**Figura 14**

*Sección vertical de alteraciones UM. Pucamarca*



Nota: En la figura se muestran una sección vertical de las alteraciones hidrotermales del cerro Checocollo. Fuente: (Alberto Guzmán Sánchez et al., 2016)

### **3.2. RECOPIACIÓN DE ESTUDIOS**

La presente investigación se basó en los datos del estudio de factibilidad para la ampliación del tajo Checocollo hacia el lado chileno, investigación realizada en enero del 2021 y elaborado por Anddes Asociados SAC para Minsur SA, teniendo como autores a Castro et al. el cual se utilizó en las citas posteriores.

#### **3.2.1. Sismicidad en el área de influencia**

En general, la información detallada de la sismicidad de una determinada región se encuentra recopilada en registros históricos e instrumentales, siendo estos últimos los que presentan en su totalidad, una mejor precisión de la ubicación hipocentral y de la magnitud de los eventos sísmicos ocurridos. Castro et al. (2021).

La información sísmica histórica e instrumental juntamente con estudios geológicos y tectónicos permiten definir las fuentes sismogénicas de una determinada región y caracterizarlas a través de sus parámetros de recurrencia sísmica. La información recopilada para la zona de estudio se detalla continuación. Castro et al. (2021).

##### **3.2.1.1. Sismicidad histórica**

La recopilación de información sobre los registros de sismicidad histórica permite la determinación de intensidades máximas de la zona, estimar el epicentro y la magnitud del sismo. Además, dado que los registros históricos poseen información de la fecha en que ocurrió un sismo, pueden ser influenciados para evaluar la tasa de recurrencia sísmica y la sismicidad de una determinada área. Castro et al. (2021).

La sismicidad histórica en el Perú y las características morfológicas de la placa de nazca han llevado a dividir la zona de subducción peruana en tres segmentos principales: el segmento norte, el cual se extiende desde el golfo de guayaquil ( $3^{\circ}\text{S}$ ) hasta la fractura de mendaña ( $\sim 10^{\circ}\text{S}$ ); el segmento central, desde la fractura de Mendaña ( $\sim 10^{\circ}\text{S}$ ) hasta la dorsal de Nazca ( $\sim 15^{\circ}\text{S}$ ), y el segmento del sur, desde el dorsal de Nazca ( $\sim 15^{\circ}\text{S}$ ) hacia el sur. Pucamarca se encuentra en el segmento sur del Perú. Castro et al. (2021).

Los sismos históricos se compilaron a partir de los trabajos de SARA en el 2016, Silgado (1992), Dorbath et al (1990), Beck y Nishensko(1990), entre otros. En la Tabla 3 Se muestran los principales sismos históricos de subducción considerados para la caracterización de las fuentes sismogénicas. Castro et al. (2021).

**Tabla 4***Principales sismos históricos de subducción en el segmento sur del Perú.*

| <b>Año</b>  | <b>M</b>  | <b>Sismogénesis</b> | <b>Mecanismo focal</b>    | <b>Profundidad (km)</b> | <b>Longitud rotura mínima (km)</b> |
|-------------|-----------|---------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| <b>1582</b> | 7.5 - 8.0 | Interfase           | Inverso ( <i>Thrust</i> ) | 30                      | 80                                 |
| <b>1604</b> | 8.3       | Interfase           | Inverso ( <i>Thrust</i> ) | 80                      | 450                                |
| <b>1687</b> | 8         | Interfase           | Inverso ( <i>Thrust</i> ) | 28                      | 150                                |
| <b>1784</b> | 7.8       | Interfase           | Inverso ( <i>Thrust</i> ) | 70                      | 300                                |
| <b>1808</b> | 8.8-9.2   | Interfase           | Inverso ( <i>Thrust</i> ) | ND                      | 500-900                            |
| <b>1913</b> | 7.8       | Interfase           | Inverso ( <i>Thrust</i> ) | ND                      | ND                                 |
| <b>2001</b> | 8.4       | Interfase           | Inverso ( <i>Thrust</i> ) | 31                      | 210                                |
| <b>2007</b> | 8         | Interfase           | Inverso ( <i>Thrust</i> ) | 39                      | 190                                |

*Nota:* En la tabla se muestra los sismos históricos. Fuente: Castro et al. (2021).

#### **Abreviaturas:**

ND: No determinado

Notas:

- La profundidad de los sismos fue estimada de la base de datos de sismicidad del National Geodetic Data Center (NGDC)
- La longitud de rotura de los sismos fue estimada de Dorbath et al (1990)

#### **3.2.1.2. Sismicidad instrumental.**

Los registros instrumentales representan la mejor información disponible para la identificación y evaluación de las fuentes sismogénicas. Estos registros han sido obtenidos desde los inicios del siglo XX, es decir desde aproximadamente el año 1900; sin embargo, muchos de los que fueron registrados inicialmente se encuentran incompletos o no presentan una buena calidad. Castro et al. (2021).

La limitación más significativa de la sismicidad instrumental es el corto periodo de tiempo de observación y recopilación de los registros de eventos sísmicos, en comparación con los largos periodos de recurrencia de grandes sismos. Por otro lado, la localización instrumental del alineamiento de los epicentros o hipocentros indica la existencia de fuentes sismogénicas y demás el análisis de las réplicas de sismos puede ayudar significativamente en la delimitación de las fuentes. Castro et al. (2021).

La calidad de la información sísmica instrumental en el Perú ha mejorado notablemente a partir del año 1963 con la instalación de la red sismográfica mundial. En consecuencia, la información consignada en los catálogos sísmicos se agrupa en los siguientes tres periodos de obtención de datos sismológicos.

Antes de 1900 : Datos históricos descriptivos de sismos destructores

1900 a 1963 : Datos instrumentales aproximados.

1963 a la actualidad : Datos instrumentales más precisos.

El catálogo sísmico actualizado documenta los eventos sísmicos registrados por agencias locales (Instituto Geofísico del Perú) y globales (National Earthquake Information Center, NEIC) en un radio de 500 km alrededor de Pucamarca. La información sísmica registrada comprende desde el año 1963 hasta el año 2018.

El catálogo compilado resultante contine más de 15000 eventos sísmicos entre magnitudes momento de M 3.2 a 8.4. La distribución epicentral de la sismicidad del área de estudio, los sismos históricos alrededor de 500 km del sitio y a la distribución en profundidad mostrada en la sección transversal a la zona de estudio fueron presentadas por Anddes (2019). Castro et al. (2021).

#### **3.2.1.3. Peligro sísmico y aceleración de diseño**

Se realizó la actualización del estudio de peligro en el 2019 de la unidad minera Pucamarca. En dicho estudio se determinó la máxima aceleración sísmica del terreno para diferentes periodos de retorno mediante métodos probabilísticos y determinísticos. Castro et al. (2021).

La definición de las fuentes sismogénicas de interfase, interplaca y corteza, se realizó sobre la base de trabajos previos en el Perú y a la región Sudamericana (Gamarra y Aguilar, 2009 y SARA, 2016) y el modelo geométrico de la zona de subducción en Sudamérica publicados por el USGS Hayes et al. (2018), analizando de este modo las características de la sismicidad asociadas al proceso de subducción y a la deformación continental. De esta forma, en base a la tectónica, la distribución espacial de los sismos y datos disponibles de mecanismos focales, se han identificado zonas en la que se modifica el comportamiento de la sismicidad entre una y otra región. Castro et al. (2021).

En la evaluación del peligro sísmico, el factor que introduce mayor variabilidad en los resultados finales es la selección de la ley de atenuación utilizada en el análisis (Bommer, 2005, Toro, 2006). La influencia de la ley de atenuación se incrementa a medida que aumenta el periodo de retorno. En el Perú se hay desarrollado leyes de atenuación locales con suficiente cantidad de registros sísmicos en su base de datos, por lo cual su uso no es recomendado para una evaluación moderna del peligro sísmico, de acuerdo con los criterios de preselección de Cotton et al. (2006). La gran influencia de la selección de leyes de atenuación en la

evaluación del peligro sísmico ha conllevado al desarrollo de estudios sobre la aplicabilidad de leyes de atenuación en la región sudamericana. Castro et al. (2021).

Para sismos de subducción, Anddes selecciono las leyes de atenuación de Abrahamson et al. (2016), Zhao et al (2016) y Youngs et al (1997). La evaluación del peligro sísmico para Pucamarca también incluye una ley de atenuación de sismos de subducción de NGA West 2 (Abrahamson et al. 2014, Boore et al. 2014, Campbell y Bozorgnia, 2014 y Chiou y Ypungs 2014)) con igual ponderación cada una. Las leyes de atenuación de NGA West2 se desarrollaron para regiones de tectónica activa como la presente en la zona de estudio y toman en cuenta factores como tipo de falla (normal o inversa), ubicación del sitio respecto al techo o pie de falla (*Hanging wall* y *foot wall*), VS30 del sitio, entre otros. Castro et al. (2021).

Anddes (2019), con el propósito de obtener aceleraciones espectrales que tomen en cuenta el efecto conjunto de las leyes de atenuación utilizadas en este estudio para la clasificación de sitio B (roca), llevo a cabo una ponderación de los resultados de los resultados individuales de cada ley de atenuación. Los valores de ponderación fueron definidos en función de recomendaciones de Bommer (2012), los estudios sobre selección de leyes de atenuación desarrollados en la zona de subducción de Sudamérica (descritos en el informe de Anddes (2019) y los factores de ponderación propuestos por Charca et al (2019) para la zona de subducción del Perú. Castro et al. (2021). Castro et al. (2021).

En la tabla 5 se resume los valores de PGA (aceleración horizontal pico del terreno) esperadas en la unidad minera Pucamarca para un sitio tipo B (Roca), calculados mediante el método probabilístico.

**Tabla 5**

*Aceleraciones horizontales máximas en el terreno (PGA) – Roca*

| <b>Combinación de leyes de atenuación –<br/>Roca (Tipo B)</b> | <b>Periodo de retorno (Tr)/ Aceleración (g)</b> |            |             |             |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|-------------|-------------|
|                                                               | <b>100</b>                                      | <b>475</b> | <b>1000</b> | <b>2475</b> |
| <b>Ponderación mediante árbol lógico</b>                      | 0,21                                            | 0,40       | 0,52        | 0,70        |

*Nota:* En la figura se visualiza las aceleraciones horizontales máximas en el terreno

Abreviaturas:

Tr: Tiempo de retorno

(g). aceleración máxima.

#### **3.2.1.4. Coeficiente sísmico**

De acuerdo con la literatura técnica existente y ampliamente aceptada internacionalmente se recomienda que el coeficiente sísmico a ser utilizado en el análisis de

la condición pseudoestática de diseño de taludes, sea obtenido como una fracción que varía entre 1/3 a 1/2 de la máxima aceleración esperada en el terreno. Esta recomendación es consistente con las recomendaciones del cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (United States Army Corps of Engineers, USACE, Hynes-Griffin y Franklin, 1984, Federal Highway Administration, 1997) quienes sugieren el uso de un coeficiente sísmico igual al 50% de la aceleración pico de diseño. Castro et al. (2021)

También es importante mencionar que en la normativa peruana sobre taludes (E. 050 y C.E. 020), no se expresa recomendación alguna respecto a que fracción PGA corresponde el coeficiente sísmico a emplear en el análisis pseudoestático de estabilidad física de taludes. Sin embargo, es muy común en el medio utilizar el criterio del 50% del PGA. Castro et al. (2021).

A partir de las recomendaciones del USACE, al estudio de peligro sísmico realizado por Anddes y considerando la condición de cierre de la estructura, para el análisis de estabilidad en condición pseudoestática de los tajos Checocollo y Morrenas, conservadoramente se propone el coeficiente sísmico presentado en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Coeficiente sísmico a utilizar según el periodo de retorno*

| Zona            | Coeficiente sísmico                    |
|-----------------|----------------------------------------|
|                 | Cierre – Periodo de retorno = 475 años |
| Tajo Checocollo | 0.2                                    |

*Nota:* En la tabla se muestra el coeficiente sísmico que se usara para los análisis de estabilidad Fuente: Castro et al. (2021)

### 3.2.2. Hidrogeología

Minsur encargo a la empresa minería y construcciones MHW en el 2016 el desarrollo de un estudio hidrogeológico con el principal objetivo de establecer las condiciones del régimen de flujo subterráneo y posibles impactos debido a las filtraciones que pudieran comprometer las estructuras proyectadas de la unidad minera Pucamarca. la empresa minería y construcciones MHW indica que se realizaron perforaciones exploratorias distribuidas en los alrededores del cerro Checocollo, las cuales no interceptaron agua subterránea, es decir, las condiciones de perforación se dieron en un ambiente no saturado. Castro et al. (2021)

Para complementar el estudio de la empresa minería y construcciones MHW y para detectar anomalías de interés geológico – geotécnico (zonas saturadas y contactos geológicas específicamente en la zona del tajo morrenas), Minsur encargo a Pervol (2020) el desarrollo de un estudio geofísico por medio de ensayos de tomografía eléctrica 2D (resistividad) usando

la configuración polo-dipolo lo cual permitió detectar y localizar cuerpo y estructuras geológicas basándose en un contraste resistivo. Castro et al. (2021)

Los resultados un notable contraste de la zona de contacto del depósito morrénico y las rocas volcánicas presentes en el tajo Morrenas. El depósito morrénico presenta valores de resistividad bajas a muy bajas ( $<50 \text{ Ohm.m}$ ), siendo esto posiblemente correlacionado con materiales fino (Limo-arcillas). Estos depósitos morrénicos presentan una potencia que va desde la superficie hasta los 90 m de profundidad. Infrayaciendo a estos depósitos morrénicos, se presenta un basamento rocoso representado por resistividades mayores a  $500 \text{ Ohm.m}$ , comprendiendo a la roca volcánica del sector. Castro et al. (2021)

Como parte de la investigación y monitoreo de la condición hidrogeológica, en la zona del tajo Checocollo se instalaron dos piezómetros de cuerda vibrante denominados VWP – 003 y VWP-004 (Dentro de la campaña de Ausenco (2014)) cuyas profundidades llegaron hasta los 290 m sin registro de nivel freático. Debido a esto, se estimó que los niveles de agua se encontraran por debajo de la cota 4186.5 msnm, nivel por debajo de la cota de fondo del tajo propuesto 4225 m. Cabe indicar que a los piezómetros ya no se encuentran operativos.

De igual manera, perforaciones exploratorias realizadas durante el 2015 en los alrededores del tajo Checocollo, confirmaron la inexistencia de zonas saturadas por encima de la elevación 4078 msnm. Adicionalmente al estudio de la empresa MWH en el 2016, en diciembre del 2016 Minsur encargo a la empresa Pervol la ejecución de dos perforaciones en la zona sur del tajo Checocollo en las cuales se instalaron los piezómetros de cuerda vibrante VWP-009 y 010, Los cuales tampoco registran nivel freático. Por esto, se estima que las operaciones del tajo Checocollo y el tajo morrenas se realizan en un medio no saturado (no prevee condiciones de drenaje y despresurización, salvo las que se almacenan y escurran por precipitación).

Esta condición hidrogeológica es factible y característica de un medio volcánico que puede presentar niveles colgados de forma somera debido a las intercalaciones y discontinuidades en la acumulación de materiales volcánicos. Finalmente, la empresa MHW (2016), mediante simulación predictiva (considerando los piezómetros de toda la unidad minera que alcanzaron nivel freático y excluyendo a los que no registraban nivel freático o que registraban nivel piezométrico por aguas colgadas) y considerando un medio estacionario, estimo que el nivel de agua para el 2023 se encontraba en 4221 msnm, nivel por debajo de la cota fondo proyectada más profunda del tajo Checocollo (4225 msnm).

El cerro Checocollo, durante su proceso geológico, estuvo sometido a procesos de meteorización y erosión, lo cual origina zonas de alteración de 20 a 40 m de espesor. Posteriormente sobre estas en la época de glaciación se originaron depósitos morrénicos que sobreyacen a la zona de alteración y a la roca volcánica Huilacollo propiamente dicha. Esta configuración permite una conexión hidráulica entre los depósitos morrénicos y a la roca alterada, generando zonas de almacenamiento de agua colgadas y separadas del sistema subterráneo regional. Castro et al. (2021)

Dada la conceptualización del sistema volcánico y la presencia de caos intercaladas de material piroclástico y derrames andesíticos, la presencia de un nivel freático a una elevación de 4319.1 msnm (ING-04) y 4318.8 msnm (SH-04A) corresponde a un sistema volcánico somero colgado (contacto morrena y roca volcánica alterada) del sistema hidrogeológico volcánico profundo, que no ha sido considerado como un punto de calibración del modelo numérico MWH (2016). Del mismo modo los piezómetros VWP-03 y VWP-04 ubicados en la zona del tajo Checocollo, no registran valor de nivel piezométricos por encima de 4198.7 y 4186.5 msnm de elevación respectivamente, por tal motivo no fueron considerados para la calibración del modelo realizado por la empresa minería y construcciones MHW en el 2016.

#### **3.2.2.1. Mapeo Hidrogeológico**

El mapeo Hidrogeológico del área estuvo enfocado a la identificación y determinación de estructuras geológicas, manantiales, filtraciones y zonas con presencia de vegetación que indiquen zonas de descarga. Las características mapeadas dentro del área de estudio incluyeron:

Fallas, fisuras estratigrafía y otras características geológicas de importancia.

- Manantiales, filtraciones - caudal y calidad básica.
- Aguas superficiales (arroyos) – caudal y calidad básica.
- Niveles de agua en piezómetros existentes utilizando una sonda eléctrica.
- Ubicación de información recopilada mediante el uso de un posicionador geográfico satelital (GPS)

#### **3.2.3. Criterios de diseño**

El estudio considera los análisis geotécnicos de los taludes de la expansión del tajo Checocollo, el cual ha sido desarrollado con base en los criterios de diseño establecidos en el

presente documentos en coordinación con Minsur, y sobre datos de diseño que han sido calculados y establecidos por los estándares internacionales e ingeniería geotécnica y la industria minera.

Esta sección presenta la descripción de los criterios de diseño, la unidad de medida, criterios utilizados en este estudio y la fuente que proporcionó el criterio. Los criterios estándares de la industria minera son los que serán utilizados para el desarrollo de la ingeniería a excepción de los criterios proporcionados por Minsur y que son presentados en la tabla 7.

**Tabla 7**  
*Criterios de diseño*

| Descripción                                                                                           |                    | Unidad       | Criterio usado |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------|----------------|
| Modelo de análisis de estabilidad 2D (método de equilibrio limite)                                    |                    | Modelo       | Spencer        |
| Periodo de retorno del evento sísmico de diseño para cierre del tajo Checocollo                       |                    | Años         | 475            |
| Aceleración máxima del terreno (Tipo B) PGA ( <i>Peak ground acceleration</i> ) nota 01 para 475 años |                    | g            | 0.4            |
| Coeficiente sísmico de cierre (50% del PGA para 475)                                                  |                    | Adimensional | 0.2            |
| Estabilidad estática, banco, mínimo (operación)                                                       |                    | FS min       | 1,1            |
| Estabilidad talud interrampa                                                                          | Operación y cierre | FSE min      | 1.2/1.3        |
| Estabilidad de talud global                                                                           | Operación y cierre | FSE min      | 1.3/1.5        |
| Estabilidad de talud global e interrampa                                                              | Cierre             | FSP min      | 1,00           |
| <b>Parámetros geométricos Tajo Checocollo</b>                                                         |                    |              |                |
| Altura de banco simple y doble                                                                        |                    | m            | 7.5 y 15       |
| Ancho de Berma (banco doble)                                                                          |                    | m            | 8              |
| Angulo de cara de banco                                                                               |                    | °            | 52 - 65        |
| Angulo de talud interrampa                                                                            |                    | °            | 34 - 45        |
| <b>Parámetros geométricos Tajo Morrenas</b>                                                           |                    |              |                |
| Altura de banco simple                                                                                |                    | m            | 7.5            |
| Ancho de berma (banco doble)                                                                          |                    | m            | 5              |
| Angulo de cara de banco                                                                               |                    | °            | 39-66          |
| Angulo de talud interrampa                                                                            |                    | °            | 28-42          |

*Nota:* La máxima aceleración sísmica del terreno (PGA) se obtuvo del estudio de peligro sísmico desarrollado por Anddes (2019)

**Abreviaturas:**

FSEmin: Factor de seguridad estático mínimo

FSP: Factor de seguridad pseudoestático

#### 3.2.4. Modelo geomecánico

Anddes (2019) desarrollo un modelo geomecánico de bloques para el tajo Checocollo. La base para el desarrollo de este modelo geológico de alteraciones en 3D (proporcionado por Minsur) complementado con 95 perforaciones diamantinas con información geotécnica, que sirvió para elaborar el modelo geomecánico 3D. Las variables utilizadas y representadas en el modelo fueron; Alteración, Rock Quality Designation (RQD), Rock Mass Rating (RMR<sub>89</sub>) y resistencia compresiva de la roca intacta (UCS). Esta última variable fue estimada con el parámetro R proveniente del logueo geomecánico de las perforaciones, los resultados de laboratorio no se utilizan directamente para estimar el modelo de bloques de resistencia compresiva, pero si para reajustar el parámetro R tomado en campo en función de los ensayos de laboratorio en tramos donde se consideró necesario. Anddes (2019), en la base de datos enviada por Minsur, coloco una columna de UCS con los resultados de laboratorio para hacer notar que se tiene datos insuficientes para realizar la estimación, y para que sirva de referencia sobre la necesidad de mejorar la confiabilidad de la base de datos RCS del modelo de bloques, con mayor número de bloques, con mayor número de ensayos. El criterio de ajuste de los valores de dureza (R) registrados en los logueos de perforaciones fue básicamente usar ensayos usar los ensayos UCS y carga puntual para la validación y sustento de valores R en la corrida de donde se obtuvo la muestra ensayada, asimismo, también se hizo corridas adyacentes (únicamente anterior y posterior a la muestreada) en caso evidenciaban condiciones similares (litologías, tipo y grado de alteración, motorización, entre otras características geotécnicas). Además, en casos puntuales se usó este valor de UCS para corregir los valores de r en la corrida correspondiente. Con este ajuste finalmente se obtuvieron los valores usados como base de datos para la generación del modelo de bloques UCS. Castro et al. (2021).

En el presente estudio, el modelo geomecánico fue utilizado para distinguir y zonificar las paredes del tajo según el tipo de alteración y las características geomecánicas que puedan influir en la estabilidad física del tajo evaluado. Todos estos aspectos fueron integrados con el fin de tener una perspectiva geológico - geotecnia de los materiales de los materiales en el área del tajo Checocollo. Castro et al. (2021).

Esta perspectiva del modelo geológico es evaluada de maneja conjunta con los parámetros geotécnicos de los materiales presentes en el tajo, parámetros geométricos de la configuración del tajo a evaluar y ubicación de estructuras cercanas, para determinar las secciones críticas de análisis. Castro et al. (2021).

#### **3.2.4.1. Determinación de secciones críticas**

Para la determinación de las secciones críticas (Tajo Checocollo) se ha considerado los siguientes puntos:

- Visualización en perspectiva de la proyección de las unidades geológico – geotécnicas, en las paredes del tajo Checocollo.
- Las dimensiones de los taludes globales (mayor altura) y sectores con materiales de propiedades de resistencia más desfavorables.
- Se optó por realizar 23 secciones con la finalidad de encontrar el más crítico.

Considerando estos puntos, se seleccionó las ubicaciones de las secciones críticas, las cuales fueron utilizadas para los análisis geotécnicos respectivos.

Estos perfiles (modelo geotécnico 2D) se trabajaron manualmente para cada línea de sección de análisis definida. La construcción de modelo 2D está basada en el modelo geomecánico RMR<sub>89</sub> y el modelo de alteraciones (proporcionada por Minsur). Castro et al. (2021)

#### **3.2.4.2. Evaluación geotécnica**

Se observa que el factor que más incidencia tendrá en la estabilidad de los taludes del tajo Checocollo es la resistencia cortante del macizo rocoso (debido a la calidad presente) y no las posibles fallas gobernadas por las estructuras (típicas en macizo rocosos menos fracturados). Esto debido a la presencia masiva de suelos residuales y roca de muy mala calidad a mal calidad ( $RMR \leq 40$ ). Asimismo, el grado de fracturamiento existente con las rocas trituradas, extremadamente fracturadas y muy fracturadas en casi su totalidad ( $RQD = 0$ ,  $0 < RQD < 25\%$ ,  $25\% < RQD < 50\%$ , respectivamente), quedando únicamente una zona puntual marcada en el Este (zona de análisis). Castro et al. (2021)

#### **3.2.5. Parámetros geotécnicos**

##### **3.2.5.1. Generalidades**

En este capítulo se presenta la descripción de las propiedades de las propiedades geotécnicas de los materiales que fueron utilizados para los análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite del tajo Checocollo. Para la determinación de los parámetros de resistencia al corte se usó la información geotécnica disponible (investigaciones y ensayos de laboratorio) de los estudios anteriores (Ausenco (2014) y Anddes (2019), el modelo geomecánico (RMR, RQD y RCS) realizando por Anddes (2019), los ensayos de laboratorio

presentados por Anddes (2020), correlaciones empíricas sustentadas en la literatura existente y el criterio de nuestro equipo geotécnico basado en su experiencia en este tipo de proyectos. Castro et al. (2021)

Para el análisis de estabilidad gobernada por la resistencia del macizo rocoso, se usaron los criterios de rotura de Hoek – Brown Generalizado (rocas con  $RMR_{89} > 30$ ), y de Mohr – Coulomb (deposito morrénico, suelos residuales y rocas con  $RMR_{89} \leq 30$ ). Castro et al. (2021)

### **3.2.5.2.    Unidades Geotécnicas**

Minsur actualizó su modelo litológico hasta el año 2014 y posterior a ello todas las perforaciones que se realizaron se concentraron en incrementar la base de datos de su modelo de alteraciones el cual esta actualizada hasta enero de 2019 (alimentado con perforaciones geológicas hasta el 2018). Geológicamente el depósito en estudio está conformado principalmente por material volcánico tipo andesita, presentando distintos tipos de alteración correspondientes a la mineralización de alta sulfuración lo que conlleva a concentrarse en diferenciar las distintas alteraciones existentes para fines geotécnicos. Anddes considera que la zonificación por alteración en este caso permite una mejor zonificación geotécnica que la zonificación litológica. Castro et al. (2021)

Las unidades geotécnicas fueron definidas con base en el tipo de alteración y subdivididas en rangos de calidad del macizo rocoso ( $RMR_{89}$ ). Esto permitió considerar la heterogeneidad del macizo rocoso dentro de una misma unidad de alteración. Las calidades encontradas para los materiales se definieron en 04 unidades geotécnicas: unidad geotécnica I (deposito morrénico), Unidad geotécnica II (Suelos residuales), Unidades geotécnica III (basamento rocoso de muy mala a mala calidad) y unidad geotécnica IV (basamento rocoso de regular calidad). Para la obtención de propiedades de resistencia se subdividieron las unidades geotécnicas III y IV según la calidad del macizo existente. Castro et al. (2021)

En la tabla 8 se presenta la subdivisión realizada para la obtención de parámetros geotécnicos.

**Tabla 8***Resumen de subdivisión de unidades geotécnicas*

| <b>Material</b>                    | <b>Unidad Geotécnica</b> | <b>Calidad</b>     |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------|
| <b>Deposito morrénico (Arenas)</b> | I                        | Suelo              |
| <b>Deposito morrénico (Gravas)</b> | I                        | Suelo              |
| <b>Argílica avanzada</b>           | II                       | Suelo residual     |
|                                    | III                      | $RMR \leq 20$      |
|                                    | III                      | $20 < RMR \leq 30$ |
|                                    | III                      | $30 < RMR \leq 40$ |
|                                    | IV                       | $40 < RMR \leq 50$ |
|                                    | IV                       | $50 < RMR \leq 60$ |
| <b>Argílica</b>                    | II                       | Suelo residual     |
|                                    | III                      | $RMR \leq 20$      |
|                                    | III                      | $20 < RMR \leq 30$ |
|                                    | III                      | $30 < RMR \leq 40$ |
|                                    | IV                       | $40 < RMR \leq 50$ |
|                                    | IV                       | $50 < RMR \leq 60$ |
| <b>Vuggy</b>                       | II                       | Suelo residual     |
|                                    | III                      | $RMR \leq 20$      |
|                                    | III                      | $20 < RMR \leq 30$ |
|                                    | III                      | $30 < RMR \leq 40$ |
|                                    | IV                       | $40 < RMR \leq 50$ |
|                                    | IV                       | $50 < RMR \leq 60$ |
| <b>Sílice Granular</b>             | II                       | Suelo residual     |
|                                    | III                      | $RMR \leq 20$      |
|                                    | III                      | $20 < RMR \leq 30$ |
| <b>Propilítica</b>                 | III                      | $RMR \leq 20$      |

*Nota:* En la tabla se muestra las unidades geomecánicas que se usó para el estudio de estabilidad.  
Fuente: Castro et al. (2021)

Continuación se presentan los materiales incorporados en los análisis con sus respectivos parámetros:

### **3.2.5.3. Resumen de parámetros geotécnicos.**

Se presentaron en función del esfuerzo normal aplicado para las alteraciones vuggy, argílica intermedia y argílica avanzada, respectivamente. Estas envolventes representan a los materiales que estarán involucrados en el modelo geotécnico 2D y 3D que se generó para luego realizar los análisis de estabilidad.

En la tabla 9 se presenta el resumen de los parámetros de resistencia cortante de los materiales del tajo, que corresponden a cada roca.

**Tabla 9**  
Resumen de propiedades Hoek – Brown generalizado.

| Material                       | Calidad                   | $\gamma$ Total<br>(Kn/m3) | GSI | UCS (Mpa) |     |     | Mi  | D       |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----|-----------|-----|-----|-----|---------|
|                                |                           |                           |     | Promedio  | Min | Max |     |         |
| <b>Argílica<br/>Avanzada</b>   | $30 < \text{RMR} \leq 40$ | 20.5                      | 30  | 17        | -   | -   | 8.5 | 0.5/0.0 |
|                                | $40 < \text{RMR} \leq 50$ | 21.5                      | 40  | 17        | -   | -   | 8.5 | 0.5/0.0 |
|                                | $50 < \text{RMR} \leq 60$ | 21.5                      | 50  | 27.5      | -   | -   | 8.5 | 0.5/0.0 |
| <b>Argílica<br/>intermedia</b> | $30 < \text{RMR} \leq 40$ | 21                        | 30  | 11        | 5   | 25  | 8.5 | 0.5/0.0 |
|                                | $40 < \text{RMR} \leq 50$ | 22                        | 40  | 21        | 15  | 50  | 8.5 | 0.5/0.0 |
|                                | $50 < \text{RMR} \leq 60$ | 22                        | 50  | 32.5      | 25  | 65  | 8.5 | 0.5/0.0 |
| <b>Vuggy</b>                   | $30 < \text{RMR} \leq 40$ | 20                        | 30  | 9         | 5   | 25  | 8.5 | 0.5/0.0 |
|                                | $40 < \text{RMR} \leq 50$ | 21                        | 40  | 25        | 15  | 35  | 8.5 | 0.5/0.0 |
|                                | $50 < \text{RMR} \leq 60$ | 21                        | 50  | 32.5      | 25  | 65  | 8.5 | 0.5/0.0 |
| <b>Propilítica</b>             | $40 < \text{RMR} \leq 50$ | 21                        | 40  | 17        | -   | -   | 8.5 | 0.5/0.0 |

*Nota:* En la tabla muestra las propiedades geomecánicas de las alteraciones Fuente: Castro et al. (2021)

#### Abreviaturas:

$\gamma$  total: Peso específico total

UCS: compresión no confirmada

D: Factor de Disturbancia

GSI: Índice de resistencia geológica

Mi: Constante de roca intacta

En la tabla 10 se muestra los parámetros de resistencia el corte de los materiales caracterizados según el modelo constitutivo Mohr-Coulomb (para el depósito morrénico, suelos residuales y rocas con  $\text{RMR}_{89} \leq 30$ )

**Tabla 10**  
Resumen de parámetros de resistencia Mohr – Coulomb

| Material                               | Calidad | $\gamma$ Total<br>(Kn/m3) | Propiedades mecánicas |      |      |                        |      |      |
|----------------------------------------|---------|---------------------------|-----------------------|------|------|------------------------|------|------|
|                                        |         |                           | Cohesión (kPa)        |      |      | Angulo de fricción (°) |      |      |
|                                        |         |                           | Prom.                 | Min. | Max. | Prom.                  | Min. | Max. |
| <b>Deposito<br/>Morrénico (arenas)</b> | Suelo   | 18                        | 5                     | -    | -    | 32                     | -    | -    |
| <b>Deposito<br/>Morrénico (gravas)</b> | Suelo   | 19                        | 15                    | 7    | 24   | 35                     | 35   | 36   |

*Nota:* En la Tabla Fuente: Castro et al. (2021)

#### Abreviaturas:

$\gamma$  total: Peso específico total

En la Tabla 11 se presentan los parámetros de resistencia de las discontinuidades (obtenidos de las envolventes lineales de resistencia); sin embargo, cabe indicar que para las

evaluaciones cinemáticas (escala de banco) se consideró que las resistencias serían únicamente por fricción, despreciando la cohesión reportada (debido a la perforación y voladura cercana a las caras de bancos).

**Tabla 11**

*Envoltentes de resistencia no lineal para discontinuidades*

| Discontinuidad    | Morhr - Coulomb |        |        | $\phi$ (°) |
|-------------------|-----------------|--------|--------|------------|
|                   | Cohesión (Mpa)  |        |        |            |
|                   | Promedio        | Mínimo | Máximo |            |
| Argílica avanzada | 0.1064          | 0.01   | 0.2    | 27         |
| Argílica avanzada | 0.1023          | 0.05   | 0.17   | 28         |
| Vuggy             | 0.1215          | 0.03   | 0.24   | 28.2       |

*Nota:* Parámetros de las discontinuidades. Fuente: Castro et al. (2021)

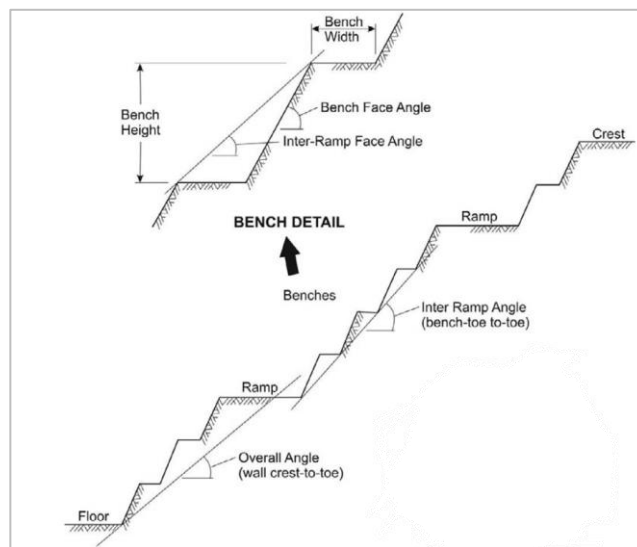
### 3.2.6. Análisis geotécnico

#### 3.2.6.1. Parámetros geométricos de diseño

En la figura 15 se presentan los parámetros geométricos de los taludes de banco e interrampa en un tajo abierto.

**Figura 15**

*Parámetros geométricos de diseño*



*Nota:* en la figura se muestra los parámetros geométricos de diseño de un talud minero. Fuente: Read and Stacey (2009)

#### 3.2.6.2. Angulo de talud de banco (BFA)

También conocido por sus siglas en inglés como BFA (Bench Face Angle). Este ángulo se mide desde la horizontal hasta la línea máxima pendiente que une el pie de un banco con la cresta de este.

El ángulo de cara de banco está definido por el equipo de carguío disponibles, por la condición estructural (principalmente en rocas competentes) e influenciado por las prácticas operacionales (tipo de voladura, etc)

#### **3.2.6.3. *Altura de banco (H)***

Definida usualmente por el equipo de carguío disponibles. Definida con base en criterios de contención de caída de rocas y operacionales (Altura de alcance de la excavadora).

#### **3.2.6.4. *Ancho de berma (B)***

El banco se diseña con un ancho de berma específico relativo a su altura de modo que las rocas que se pudieran desprender queden retenidas antes de alcanzar la berma inferior inmediata. Con esto las bermas cumplen con la finalidad de mantener seguro a personal y a la maquinaria de la caída de rocas durante la operación del tajo.

#### **3.2.6.5. *Perdida de cresta o distancia de sobre rotura.***

Este es un corte de banco en el talud de roca. La distancia de sobre rotura esta incorporada en el diseño del banco dado que la parte de la cresta del mismo podría caer desde su posición. El diseño del ancho de berma del banco receptor es entonces siempre más ancho que el requerido por seguridad.

#### **3.2.6.6. *Angulo de talud interrampa (IRA)***

Conocido por sus siglas en inglés como IRA (Inter -Ramp Angle). Es el angulo medido entre la horizontal con una línea que resulta de la unión del pie de dos bancos seguidos.

$$IRA = \tan^{-1} \left( \frac{H \tan(BFA)}{B(\tan(BFA) + H)} \right) \quad (8)$$

#### **3.2.6.7. *Altura de talud interrampa***

Se define como la altura de toda una secuencia ininterrumpida de bancos (altura entre dos rampas de acceso consecutivos o entre una rampa y el fondo del tajo)

#### **3.2.6.8. *Ancho de rampa.***

Cumple con la finalidad de permitir el transporte de camiones que cargan con el material obtenido de la voladura. Se define con base en al ancho de los camiones que transitaran (evaluando si será doble vía o vía simple), el espacio mínimo entre dos camiones al cruzarse y el ancho de la berma de seguridad.

### **3.2.6.9. Angulo de talud global (OSA)**

Conocido por sus siglas en ingles OSA (Overall Slope Angle). Es el ángulo medido entre la horizontal y una línea que resulta de la unión del pie del último banco (fondo) del tajo abierto y a la cresta del mismo.

### **3.2.7. Análisis estereográfico**

Se realizó el análisis estereográfico con el fin de determinar los dominios estructurales diferenciados que se puedan encontrar en el tajo y que puedan influir en la estabilidad del sector Este. En el sector este, sur y sureste del tajo Checocollo se observan sectores de roca fracturada con RQD 50-75%. Este grado de fracturamiento respecto a la escala de banco implica la necesidad de verificar la estabilidad de estos sectores debido a eventuales fallas estructurales, es decir fallas a través de las discontinuidades. Castro et al. (2021)

Para la evaluación estructural se trabajó con los datos obtenidos de las perforaciones geotécnicas (filtrando tramos que quedarían lejos de las paredes finales del tajo) y registros de mapeos superficiales tales como diaclasas y fallas (cercanas a la condición de expansión proyectada) colectados durante las campañas geotécnicas realizadas por Anddes (2019 y 2020). Castro et al. (2021)

Durante las inspecciones e investigaciones se ha observado que principalmente en los sectores Norte, Noreste y Oeste de Checocollo no se presentaban características típicas de un macizo con potenciales problemas estructurales al no identificarse sistemas estructurales predominantes debido a las calidades presentes y alto grado de fracturamiento. Castro et al. (2021)

Durante los mapeos realizados se confirmó que no existen fallas mayores presentes en el tajo Checocollo que podrían resultar desfavorables para estabilidades a escala interrampa y/o global. En las inspecciones y en los trabajos de campo se ha observado la presencia de fallas de poca persistencia, que no indican ser fallas mayores y no evidencian una condición desfavorable que genere la inestabilidad de una secuencia de bancos o talud global. Castro et al. (2021)

El análisis estereográfico identifica las familias de discontinuidades involucradas en los dominios estructurales del tajo Checocollo. La información estructural obtenida de la revisión de información ha sido procesada para la configuración del tajo con el apoyo del programa Dips 8.0 de Rocscience en el cual se hace ingreso de los valores de *dip* y *dip* dirección obtenidos por mapeo geomecánico.

Para el análisis estereográfico, se consideraron los siguientes criterios:

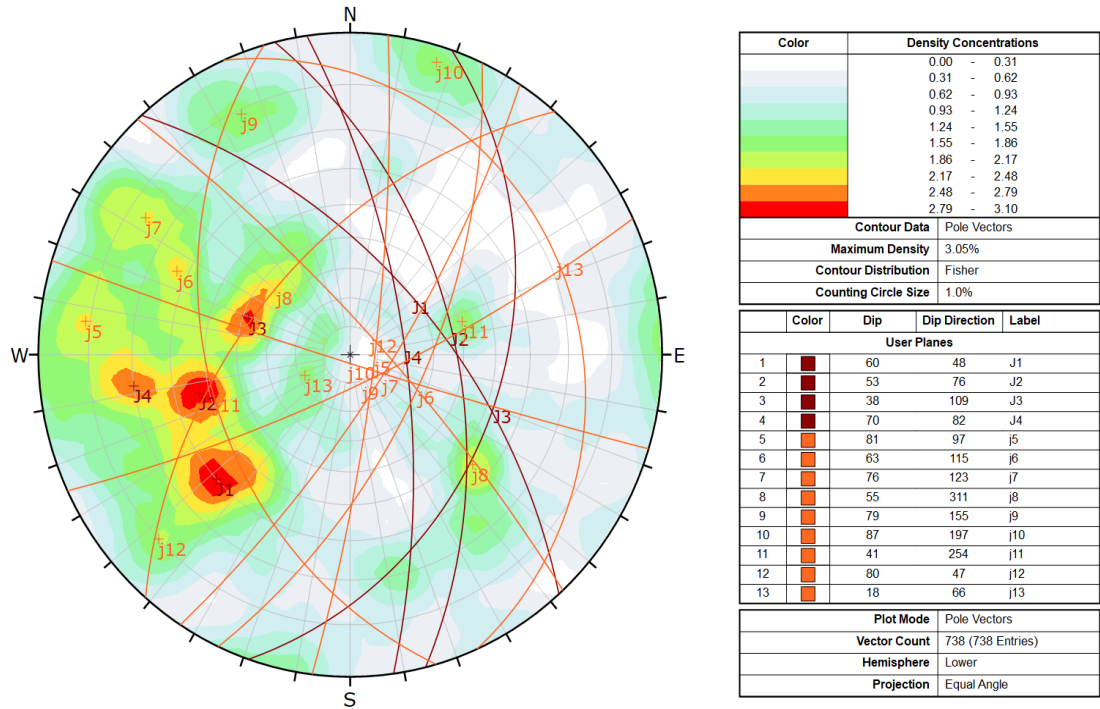
- Se tomó como base de datos toda la información estructural mapeada por Anddes (2019 y 2020) en la superficie actual de bancos.

Los dominios estructurales se presentan gráficamente y sus proyecciones estereográficas de planos y polos se muestran en la figura 16. En la Tabla 12, se lista la orientación promedio de las familias principales y secundarias de discontinuidades halladas para el sector Este. Cabe indicar que, según lo observado durante las campañas de campo y las constantes visitas técnicas realizadas, se observa que los dominios estructurales tendrán poca influencia en la estabilidad general del tajo, limitándose en algunos sectores a poder influir en la estabilidad a escala de banco, debido a la calidad mala a muy mala del macizo rocoso presente masivamente y donde la estabilidad gobernada por la matriz rocosa. Castro et al. (2021)

En la figura 16 los sectores pintados de rojo indican la acumulación de polos que representan la presencia de una mayor cantidad de familias de diaclasas que poseen esa orientación en común, esto ayuda a identificar las familias más condicionantes en la estabilidad de taludes del sector Este. Castro et al. (2021)

**Figura 16**

*Análisis estereográfico – Sector Este Pared Frontera*



*Nota:* Dominio estructural - Sector Este. Fuente: elaboración propia (2024)

**Tabla 12***Familias de discontinuidades por dominio estructural*

| Sector     | Dominio estructural |                |                             |
|------------|---------------------|----------------|-----------------------------|
|            | Familia             | Buzamiento (°) | Dirección de buzamiento (°) |
| Pared Este | J1                  | 60             | 48                          |
|            | J2                  | 53             | 76                          |
|            | J3                  | 38             | 109                         |
|            | J4                  | 70             | 82                          |
|            | j5                  | 81             | 97                          |
|            | j6                  | 63             | 115                         |
|            | j7                  | 76             | 123                         |
|            | j8                  | 55             | 311                         |
|            | j9                  | 79             | 155                         |
|            | j10                 | 87             | 197                         |
|            | j11                 | 41             | 254                         |
|            | j12                 | 80             | 47                          |
|            | j13                 | 18             | 66                          |

*Nota:* En tabla muestra las discontinuidades dominantes. Fuente: elaboración propia (2024)

### 3.2.8. Análisis cinemático

Estructuralmente los mecanismos de falla en la roca se producen como resultado del deslizamiento a lo largo de un plano pre-existente (discontinuidades). Los tres mecanismos básicos de fallas estructuralmente controladas en taludes de roca son los siguientes: falla planar, falla tipo cuña, y falla por vuelco, los cuales se describen a continuación.

#### 3.2.8.1. Metodología de análisis

Para el análisis cinemático actual, la resistencia al corte a lo largo de las familias se asume que está representada por un ángulo de fricción según el tipo de material encontrado y sin cohesión ( $c = 0$  MPa), basada en la evaluación empírica de la resistencia al corte a lo largo de las discontinuidades y en el concepto de cono de fricción, el cual no incluye valores de cohesión.

El mecanismo de falla del tipo planar se produce cuando una discontinuidad geológica emerge en el talud con un ángulo menor que el de la cara del talud y a su vez, su buzamiento es mayor que su ángulo de fricción. La falla planar por lo general se desarrolla si la diferencia de azimut entre la discontinuidad geológica y cara del talud no es mayor a  $20^\circ$ .

El mecanismo de falla tipo cuña ocurre cuando dos discontinuidades geológicas se cruzan para formar una cuña inestable. Para que se produzca esta falla, la línea de intersección de la cuña debe tener una inclinación favorable con respecto a la inclinación de la pendiente, pero más empinada que el ángulo efectivo de fricción a lo largo de las discontinuidades.

El mecanismo de falla tipo vuelco se desarrolla cuando el macizo de roca contiene paralelismo entre fracturas, buzamiento de estructuras geológicas continuas (estratificación y/o foliación), y el buzamiento de las discontinuidades es de dirección opuesta a la del talud.

La magnitud y la frecuencia de los mecanismos de falla estructuralmente controlados están directamente relacionadas con la continuidad y el espaciamiento de las estructuras a lo largo de los cuales pueda existir ocurrencia de deslizamiento. La estabilidad de estos mecanismos se ve seriamente afectada por las presiones de agua dentro de la discontinuidad.

#### **3.2.8.2. Consideraciones de análisis**

Para el análisis cinemático se tomó en consideración lo siguiente:

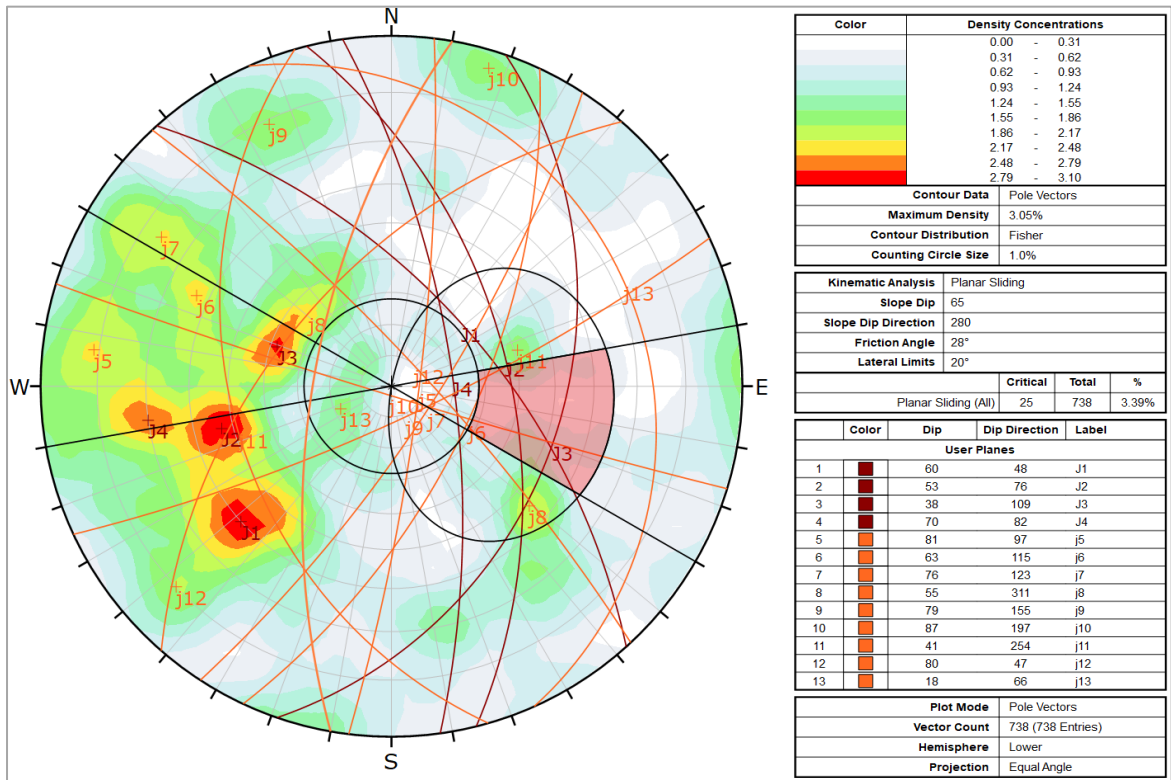
- Se realizó esta evaluación únicamente en sectores con potencial cinemático identificados durante las inspecciones en el tajo Checocollo (Este). Asimismo, en el tajo Morrenas no se presentará condiciones que requieran esta evaluación (no es motivo del estudio).
- Como ángulo de fricción residual de las discontinuidades se empleó el valor de 27° para la argílica avanzada y 28° para la argílica intermedia y vuggy. Estos valores son los obtenidos para las 3 principales alteraciones luego de realizar el ajuste lineal de los resultados de laboratorio de corte directo en discontinuidades simuladas.

#### **3.2.8.3. Resultados obtenidos**

Los resultados de la evaluación cinemática se presentan en los Anexos 3 y 4 en los cuales se presentan los análisis cinemáticos para los mecanismos de falla planar y cuña, respectivamente. Para estos análisis se ha considerado la orientación de los taludes de los sectores este, sureste y sur del tajo final que podrían presentar algún mecanismo de falla estructural por lo que se consideraron los sectores menos fracturados ( $RQD > 50 \%$ , basado en las inspecciones realizadas). En la Tabla 13 se presentan los resultados del análisis cinemático, mostrando las familias de discontinuidades que generarían potenciales mecanismos de falla. La figura 17 - 20 muestran las proyecciones estereográficas y el análisis cinemático de mecanismo de falla planares y tipo cuña en sector Este del tajo.

**Figura 17**

*Análisis cinemático de mecanismo de falla planar– Talud Dir. Buz: 280°*

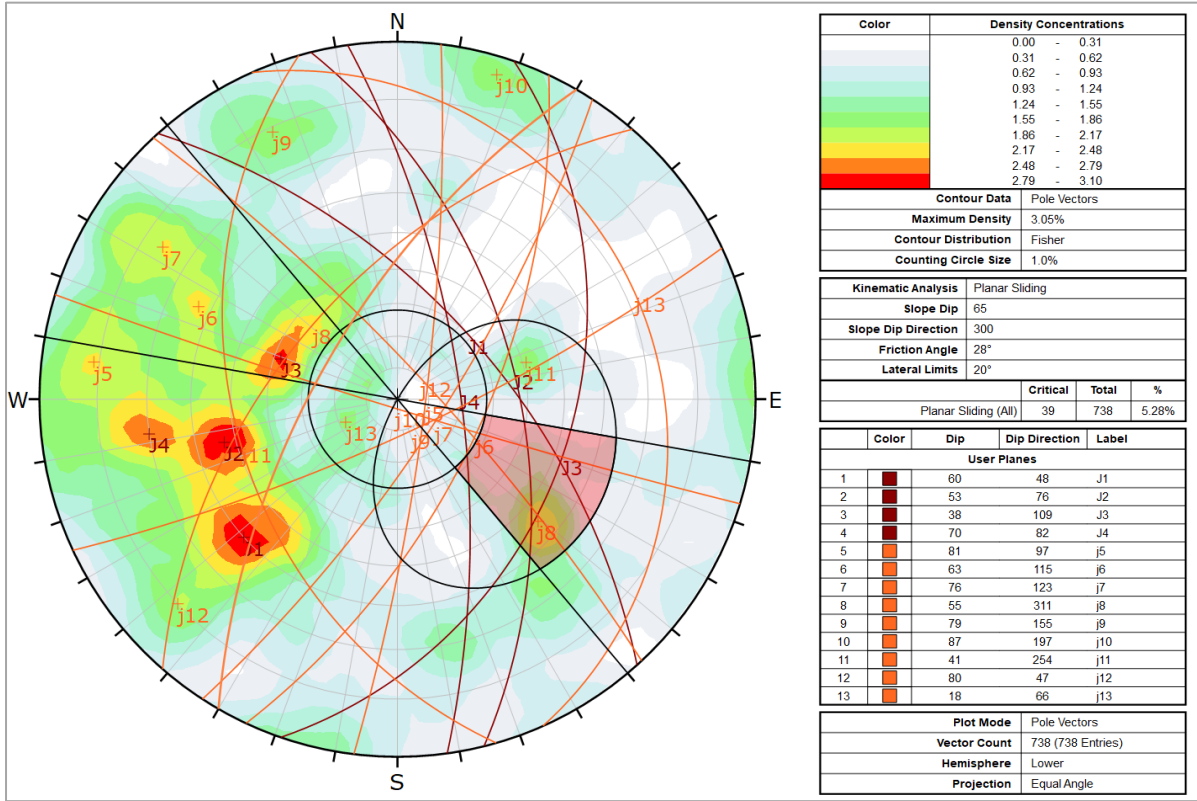


*Nota:* Sector Este, Dominio estructural (Buz: 65°, Dir. Buz: 280°). Alteración vuggy y argílica intermedia. La familia de diaclasas j8 y j11 presenta condiciones para mecanismo de falla planar. Fuente: elaboración propia (2024).

En la figura 17 se puede observar el análisis cinemático del sistema de familias de diaclasas en el programa Dips, por medio de este análisis para un talud con dirección de buzamiento de 280°y buzamiento de 65°, se evaluó el sector pintado de color rojo el cual encierra a las familias cuyos planos podrían ocasionar mecanismos de fallas planares. Según los resultados la familia j8 y j11 constituyen las más críticas debido a que poseen buzamientos y direcciones de buzamiento de similares a los del talud en análisis teniendo altas posibilidades de generar fallas planares.

Figura 18

Análisis cinemático de mecanismo de falla planar – Talud Dir. Buz: 300°

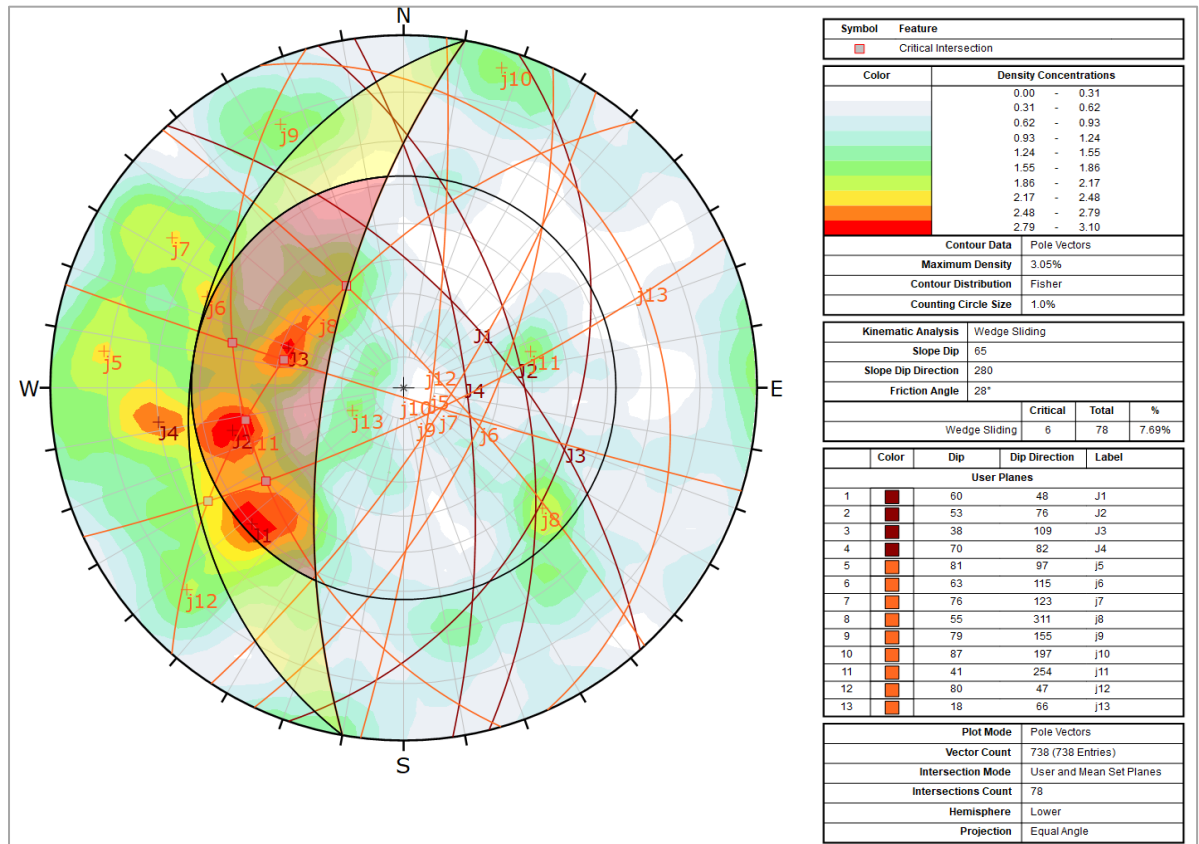


Nota: Sector Este, Dominio estructural (Buz: 65°, Dir. Buz: 300°). Alteración vuggy y argílica intermedia. La familia de diaclasas j8 presenta condiciones para mecanismo de falla planar. Fuente: elaboración propia (2024).

En la figura 18 se puede observar el análisis cinemático del sistema de familias de diaclasas en el programa Dips, por medio de este análisis para un talud con dirección de buzamiento de 300°y buzamiento de 65°, se evaluó el sector pintado de color rojo el cual encierra a las familias cuyos planos podrían ocasionar mecanismos de fallas planares. Según los resultados la familia j8 constituye la más crítica debido a que poseen buzamientos y direcciones de buzamiento de similares a los del talud en análisis teniendo altas posibilidades de generar fallas planares.

**Figura 19**

*Análisis cinemático de mecanismo de falla tipo cuña – Talud Dir. Buz: 280°*

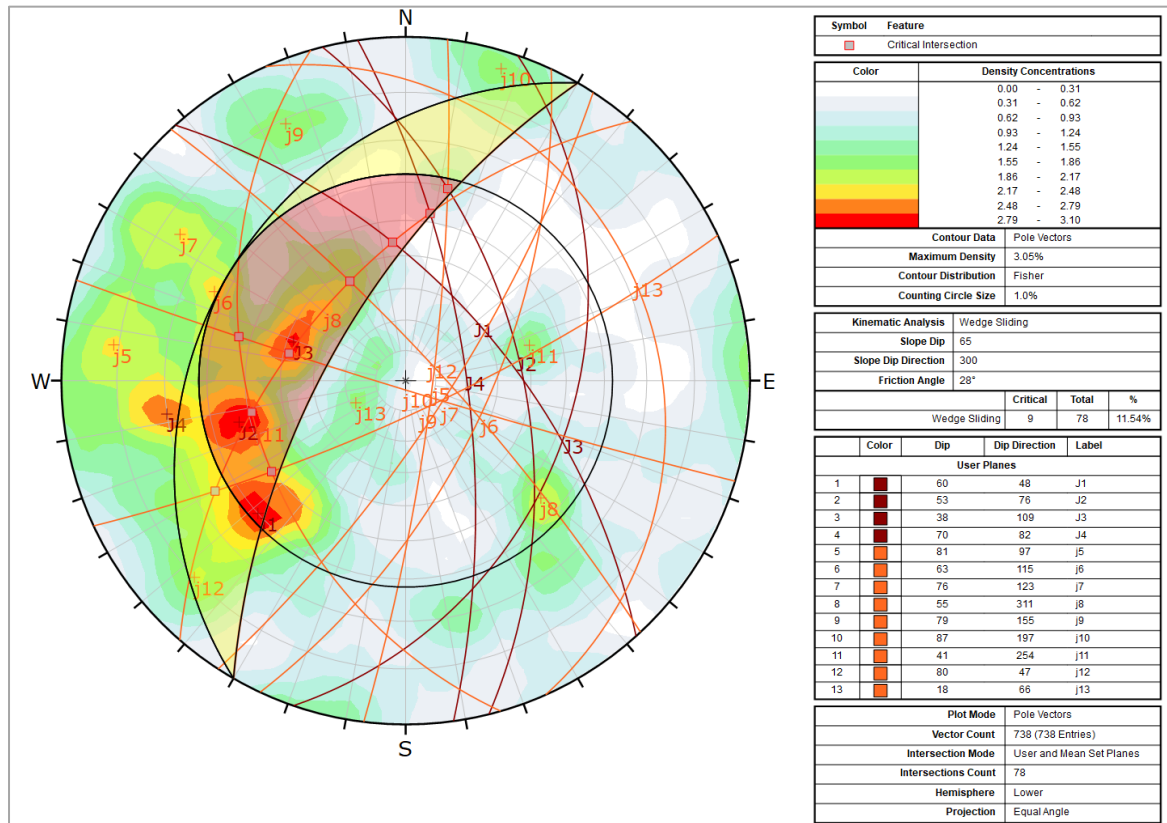


*Nota:* Sector Este, Dominio estructural (Buz: 65°, Dir. Buz: 280°), Alteración vuggy y argílica intermedia. Las familias de diaclasas j8-j10, j8-j11, j9-j11 y j10-j11 cumplen con las condiciones para mecanismo de falla por cuña. Fuente: elaboración propia (2024).

En la figura 19 se puede observar que el análisis cinemático para fallas tipo cuña, para el talud de dirección de buzamiento de 280° y buzamiento 65° se puede observar que la zona roja encierra a la combinación de familias de diaclasas que se intersecan con la dirección de buzamiento del talud ocasionando fallas tipo cuña. Las líneas representan los planos de las familias de diaclasas analizadas, siendo para este caso la combinación de los planos de las familias de diaclasas j8-j10, j8-j11, j9-j11 y j10-j11 que cumplen con esta condición, estos en adelante serán usados para realizar el análisis de estabilidad tipo cuña mediante el cálculo del factor de seguridad.

**Figura 20**

*Análisis cinemático de mecanismo de falla tipo cuña – Talud Dir. Buz: 300°*



*Nota:* Sector Este, Dominio estructural (Buz: 65°, Dir. Buz: 300°), Alteración vuggy y argílica intermedia. Las familias de diaclasas J1-j8, j8-j10, j8-11, j8-j12, j9-j11 y j10-j11 cumplen con las condiciones para mecanismo de falla por cuña. Fuente: elaboración propia (2024).

En la figura 20 se puede observar que el análisis cinemático para fallas tipo cuña, para el talud de dirección de buzamiento de 300° y buzamiento 65°, de los resultados de igual manera que el caso anterior la zona roja restringe a la combinación de familias de diaclasas que se intersecan con la dirección de buzamiento del talud ocasionando fallas tipo cuña. Las líneas representan los planos de las familias de diaclasas analizadas, siendo para este caso la combinación de los planos de las familias de diaclasas J1-j8, j8-j10, j8-11, j8-j12, j9-j11 y j10-j11 que cumplen con esta condición, estos en adelante serán también usados para realizar el análisis de estabilidad tipo cuña mediante el cálculo del factor de seguridad.

**Tabla 13**

*Resumen de resultados del análisis cinemático*

| Sector     | Alteración                  | Diseño de talud<br>(Buz/Dir. Buz) | Mecanismo de falla<br>(escala a nivel de banco) |                                                                      |
|------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|            |                             |                                   | Planar                                          | Cuña                                                                 |
| Pared Este | Vuggy y argílica intermedia | 65°/280°                          | j8<br>j11                                       | j8 y j10<br>j8 y j11<br>j9 y j11<br>j10 y j11                        |
|            |                             | 65°/300°                          | j8                                              | J1 y j8<br>j8 y j10<br>j8 y j11<br>j8 y j12<br>j9 y j11<br>j10 y j11 |

*Nota:* En la Tabla se muestra las discontinuidades que generan fallas planares y cuña. Fuente: elaboración propia (2024)

### 3.2.9. Diseño de bancos

Se consideró utilizar los programas de cómputo: RocPlane versión 4.00 (falla tipo planar), y Swedge versión 7.00 (falla tipo cuña) que usan el método de equilibrio límite para realizar el diseño de bancos. Esto se realizará en zonas puntuales dentro del sector Este en los que se observa que podría ocurrir modos de falla gobernados por discontinuidades (el sector Sur no identificó potenciales mecanismos en el análisis cinemático del tajo Checocollo).

Este tipo de análisis requiere información sobre los parámetros de resistencia de las discontinuidades y el peso del posible bloque deslizante. El peso será calculado a partir de los distintos tamaños de cuñas que el programa genera usando los valores ingresados por el usuario: persistencia, espaciamiento, buzamiento y dirección de buzamiento de las juntas y las respectivas desviaciones de todos estos valores, todos estos tamaños estarán limitados a la altura del banco.

#### 3.2.9.1. Condiciones de análisis

Se ha tomado en cuenta las siguientes condiciones para el análisis realizado:

- Se consideraron bancos dobles (15 m de altura, adoptado el diseño considerado por Minsur) para el sector Este del tajo Checocollo y se evaluó con 65° de ángulo de cara de banco. La dirección de buzamiento de los taludes varía según los sectores de evaluación: Este (300°-280°)

- Cabe indicar que desde la cresta del sector Este del tajo Checocollo hasta alcanzar la cota 4405msnm se consideraron bancos simples (7,5 m de altura) para reducir el impacto que podría generarse por erosión eólica en ese sector (observado en puntos aislados en los 2 primeros bancos del minado actual de ese sector) y para mejorar la estabilidad multibanco del talud colindante a la frontera.

**Tabla 14**

*Resultados de análisis de fallas planares obtenidos - sector este*

| Sector     | Alteración                  | Diseño de talud (Buz/Dir. Buz) | Mecanismo de falla (escala a nivel de banco) | Factor de seguridad Estático | Factor de seguridad Pseudoestático |
|------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|            |                             |                                | Planar                                       |                              |                                    |
| Pared Este | Vuggy y argílica intermedia | 65°/280°                       | j8                                           | 4.15                         | 3.55                               |
|            |                             |                                | j11                                          | 3.19                         | 2.51                               |
|            |                             | 65°/300°                       | j8                                           | 4.15                         | 3.55                               |

*Nota:* En la Tabla se muestra los resultados del análisis de estabilidad de fallas planares. Fuente: elaboración propia (2024)

**Tabla 15**

*Resultados de análisis de fallas tipo cuña obtenidos - sector este*

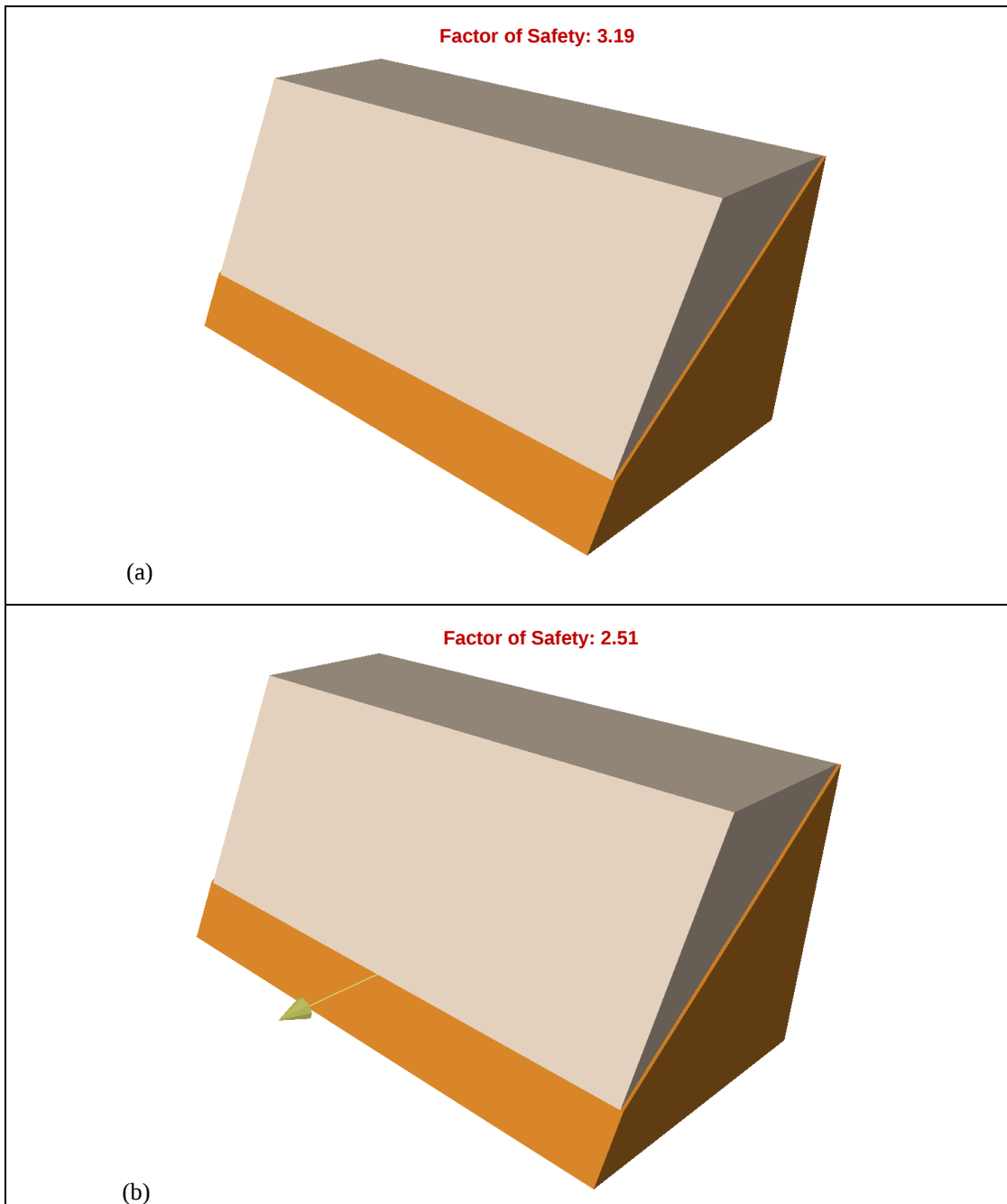
| Sector     | Alteración                  | Diseño de talud (Buz/Dir. Buz) | Mecanismo de falla (escala a nivel de banco) | Factor de seguridad Estático | Factor de seguridad Pseudoestático |
|------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
|            |                             |                                | Cuña                                         |                              |                                    |
| Pared Este | Vuggy y argílica intermedia | 65°/280°                       | j8 y j10                                     | 7.23                         | 6.11                               |
|            |                             |                                | j8 y j11                                     | 4.64                         | 3.68                               |
|            |                             |                                | j9 y j11                                     | 4.88                         | 3.91                               |
|            |                             |                                | j10 y j11                                    | 7.52                         | 5.81                               |
|            |                             | 65°/300°                       | J1 y j8                                      | 13.93                        | 12.43                              |
|            |                             |                                | j8 y j10                                     | 6.49                         | 5.47                               |
|            |                             |                                | j8 y j11                                     | 5.41                         | 4.3                                |
|            |                             |                                | j8 y j12                                     | 7.73                         | 6.72                               |
|            |                             |                                | j9 y j11                                     | 17.23                        | 14.01                              |
|            |                             |                                | j10 y j11                                    | 8.37                         | 6.48                               |

*Nota:* En la Tabla se muestra los resultados del análisis de estabilidad de fallas tipo cuña. Fuente: elaboración propia (2024)

El análisis de estabilidad de mecanismos de falla tipo planar realizado con el software RocPlane muestra que los factores de seguridad están por encima del mínimo considerado. En la figura 21 se visualiza que el valor de factor de seguridad más bajo encontrado para las familias de diaclasas que generan este tipo de fallas. En detalle de los análisis completos se puede visualizar en el apartado de anexos (Anexo 2).

**Figura 21**

*Análisis de estabilidad de fallas planares Talud Dir. Buz: 300 -280°*



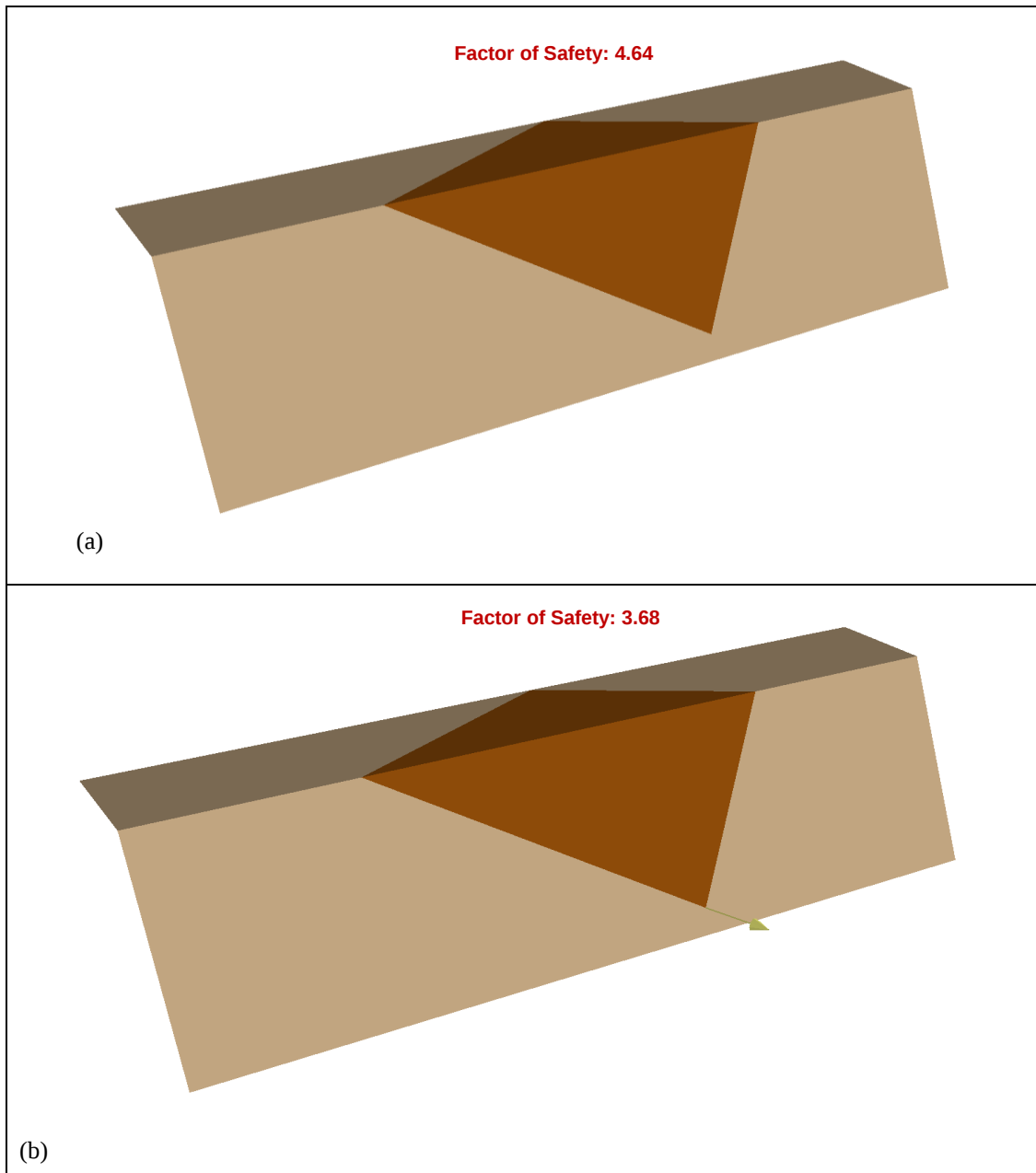
*Nota:* Se muestra el análisis de estabilidad de fallas planar estático (a) y pseudoestático (b) caso de la familia j11. Fuente (Elaboración propia).

De igual manera el análisis de estabilidad de mecanismos de falla tipo cuña realizado con el software Swedge muestra que los factores de seguridad están por encima del mínimo considerado. En la figura 22 se visualiza que el valor de factor de seguridad más bajo encontrado para las familias de diaclasas que generan este tipo de fallas es 4.6 en condición

estática y 3.67 en condición pseudoestática. En detalle de los análisis completos se puede visualizar en el apartado de anexos (Anexo 3).

**Figura 22**

*Análisis de estabilidad de fallas tipo cuña Talud Dir. Buz: 280°*



*Nota:* Se muestra los resultados del análisis de estabilidad de cuñas estático (a) y pseudoestático (b) para el talud de Dip 65° y Dip Dir de 280° familia de diaclasas j8 y j11.

En conclusión, se puede afirmar que las fallas gobernadas por condiciones estructurales no afectaran a la estabilidad global del tajo Checocollo debido a la inexistencia de discontinuidades persistentes.

### 3.2.10. Modelo de alteraciones

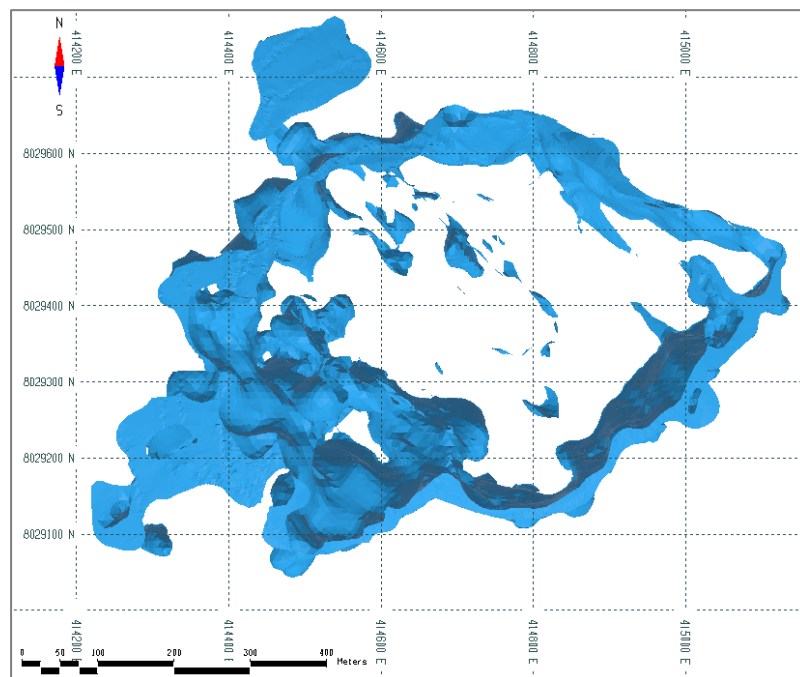
La mina posee un modelo de alteración en lugar de un modelo litológico, este modelo fue realizado en base a las investigaciones geológicas previas realizadas durante el proceso de exploración construcción y posterior operación. A diferencia de otras unidades esta peculiaridad se debe a que el modelo de alteración se ajusta más a sus planes de minado permitiendo una mejor conciliación de sus recursos.

En total se tiene mapeada la existencia de 6 alteraciones para el tajío Checocollo y material morrénico para el tajío morrenas el cual no será motivo de estudio de la presente investigación. Estas alteraciones son descritas gráficamente a continuación. Las ilustraciones fueron extraídas del software Mineplan el cual es usado para realizar el trabajo de planeamiento, estos sólidos nos ayudaron a poder generar el modelo geotécnico en tres dimensiones para el estudio.

#### 3.2.10.1. Alteración Argílica Avanzada

**Figura 23**

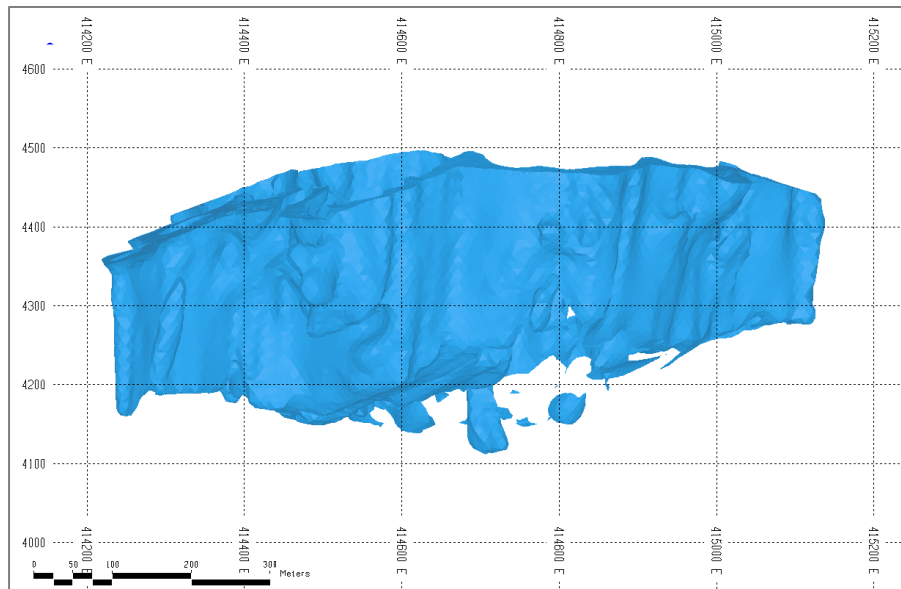
*Alteración Argílica Avanzada – Vista en planta*



*Nota:* En la figura se muestra el modelo en sólido de la alteración argílica avanzada. Fuente: elaboración propia (2024)

**Figura 24**

*Alteración Argílica Avanzada – Vista en Perfil*

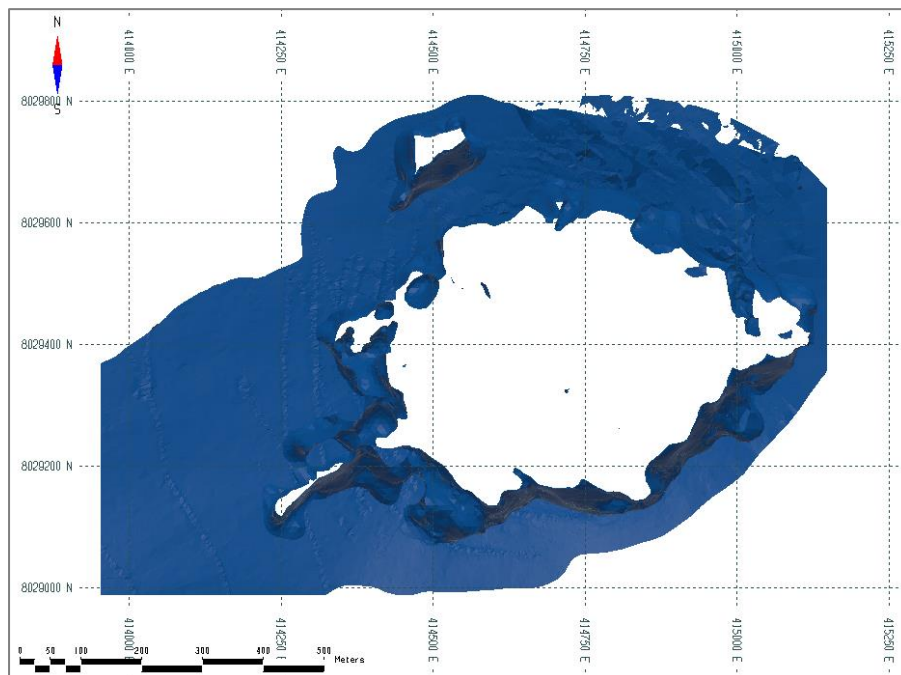


*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración argílica avanzada - perfil. Fuente: elaboración propia (2024)

### **3.2.10.2. Alteración Argílica intermedia**

**Figura 25**

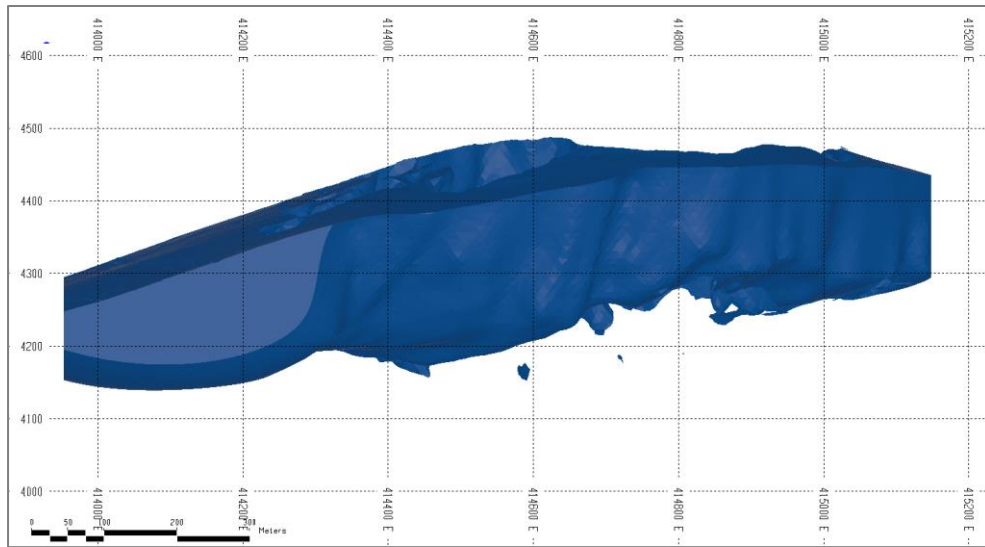
*Alteración Argílica intermedia – Vista en planta*



*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración argílica intermedia. Fuente: elaboración propia (2024)

**Figura 26**

*Alteración Argílica intermedia – Vista en Perfil*

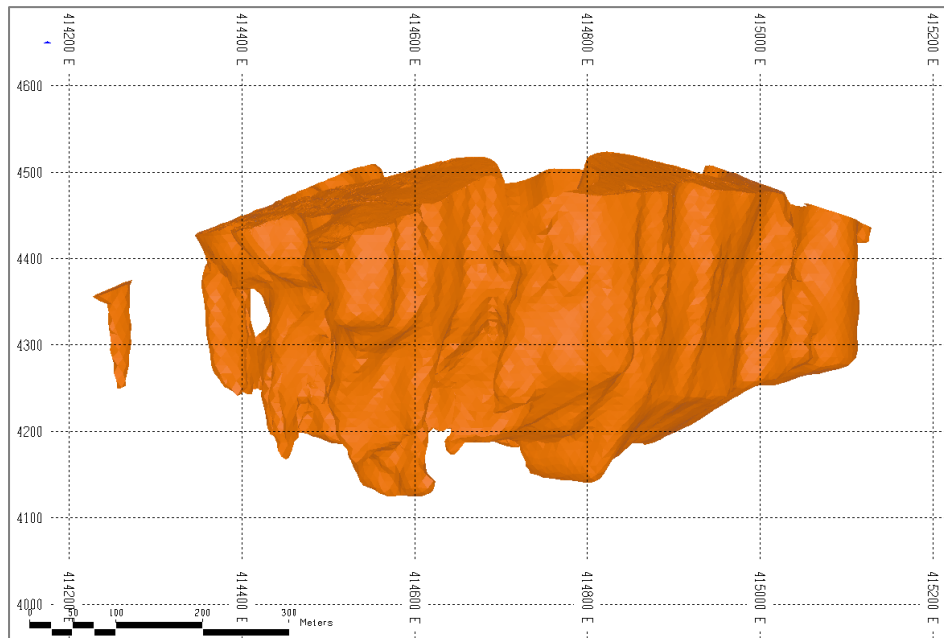


*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración argílica intermedia - perfil. Fuente: elaboración propia (2024)

### **3.2.10.3. Alteración Vuggy**

**Figura 27**

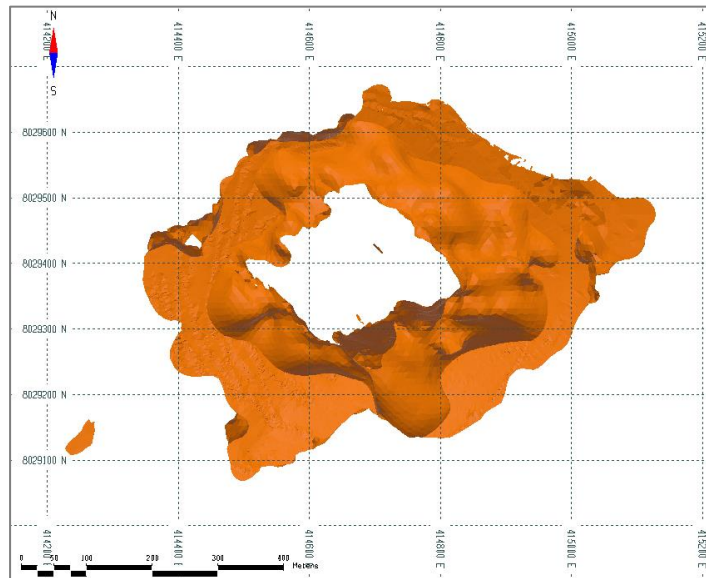
*Alteración Vuggy – Vista en planta*



*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración vuggy. Fuente: elaboración propia (2024)

**Figura 28**

*Alteración Vuggy – Vista en Perfil*

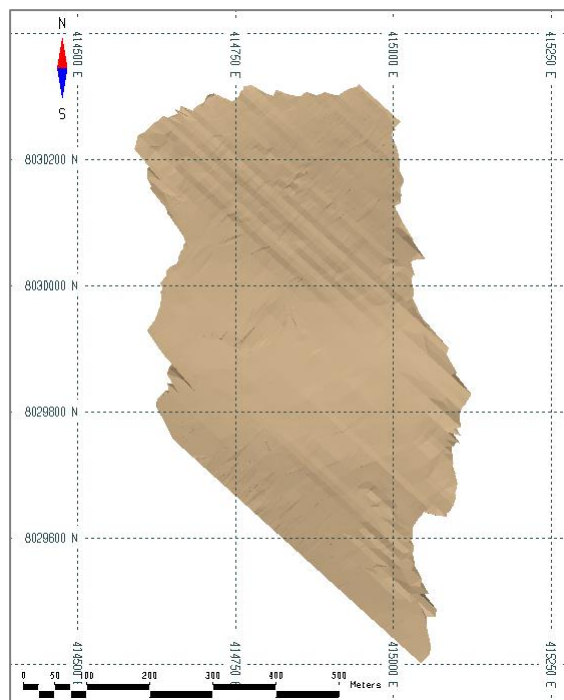


*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración Vuggy - perfil. Fuente: elaboración propia (2024)

#### **3.2.10.4. Alteración Morrenas**

**Figura 29**

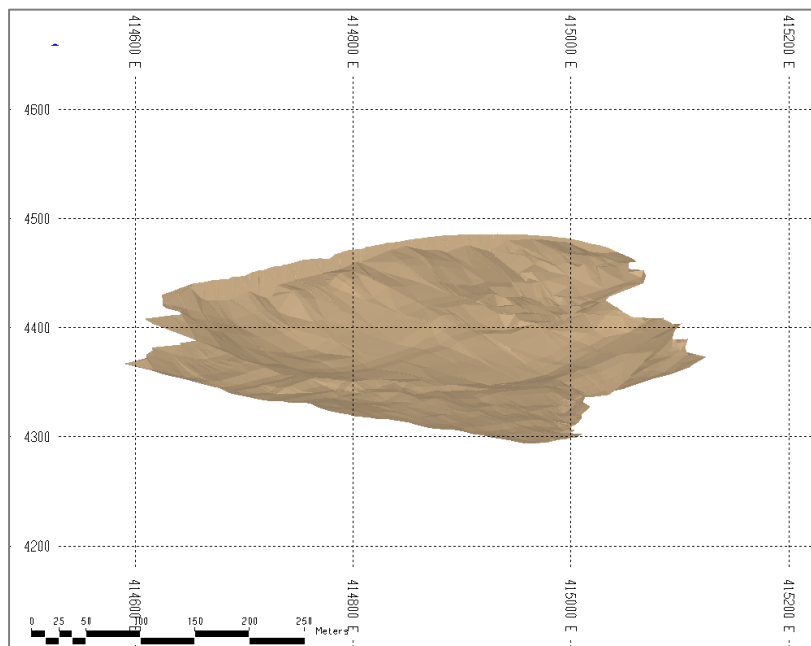
*Alteración Morrenas – Vista en planta*



*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración morrenas. Fuente: elaboración propia (2024)

**Figura 30**

*Alteración Morrenas – Vista en Perfil*

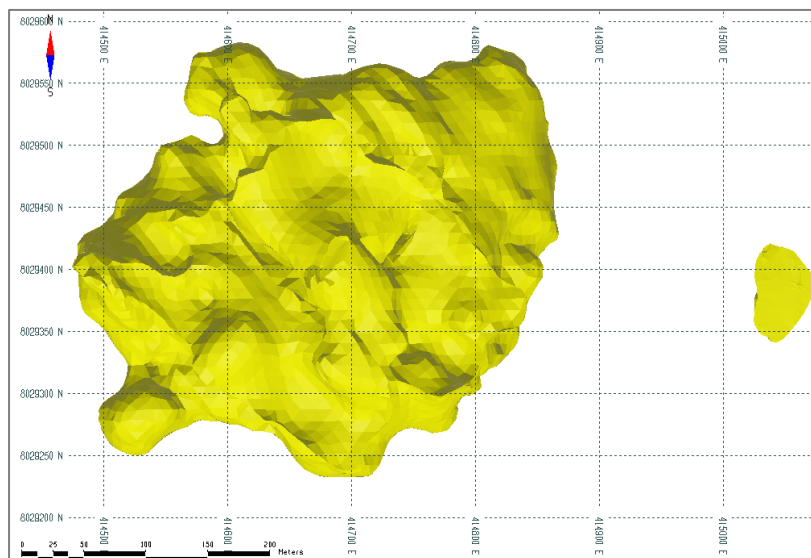


*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración morrenas - perfil. Fuente: elaboración propia (2024)

### 3.2.10.5. *Alteración Sílice granular*

**Figura 31**

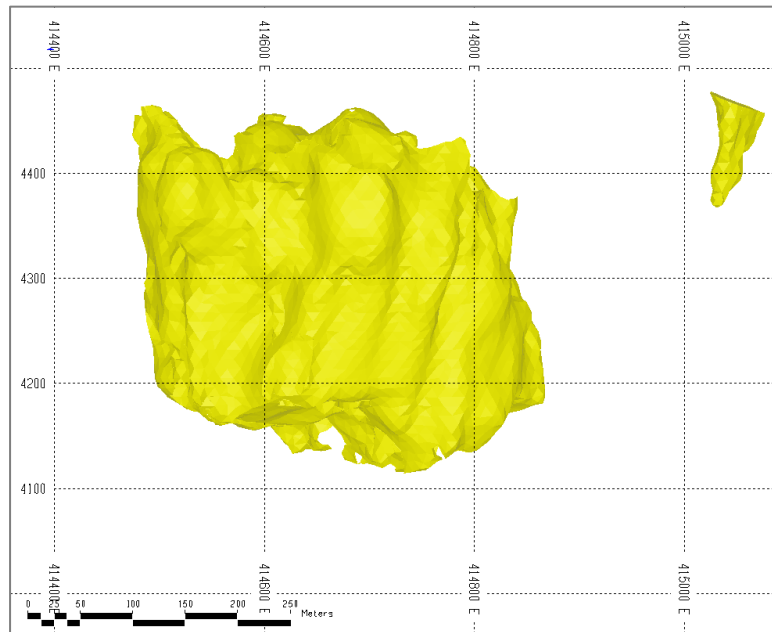
*Alteración Sílice granular – Vista en planta*



*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración sílice granular. Fuente: elaboración propia (2024)

**Figura 32**

*Alteración Sílice granular – Vista en Perfil*

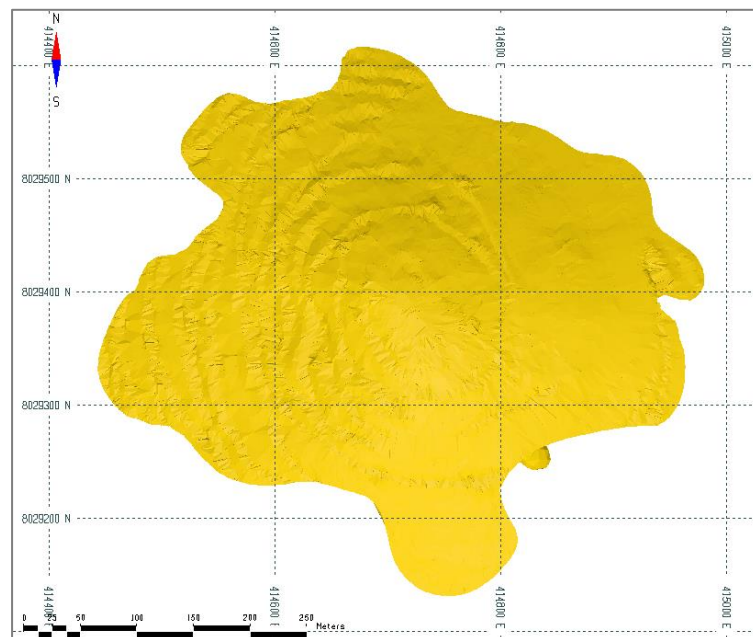


*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración sílice granular - perfil. Fuente: elaboración propia (2024)

### **3.2.10.6. Alteración Sílice Masiva**

**Figura 33**

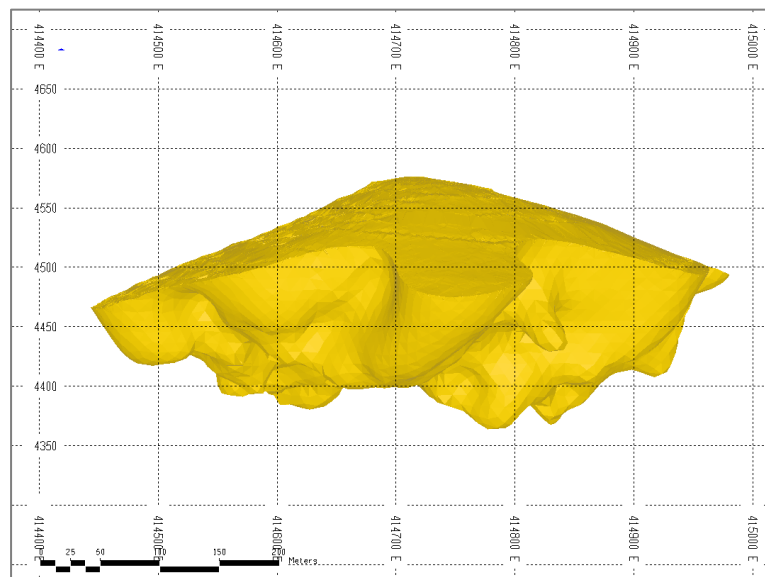
*Alteración Sílice Masiva– Vista en planta*



*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración sílice masiva. Fuente: elaboración propia (2024)

**Figura 34**

*Alteración Sílice Masiva– Vista en Perfil*

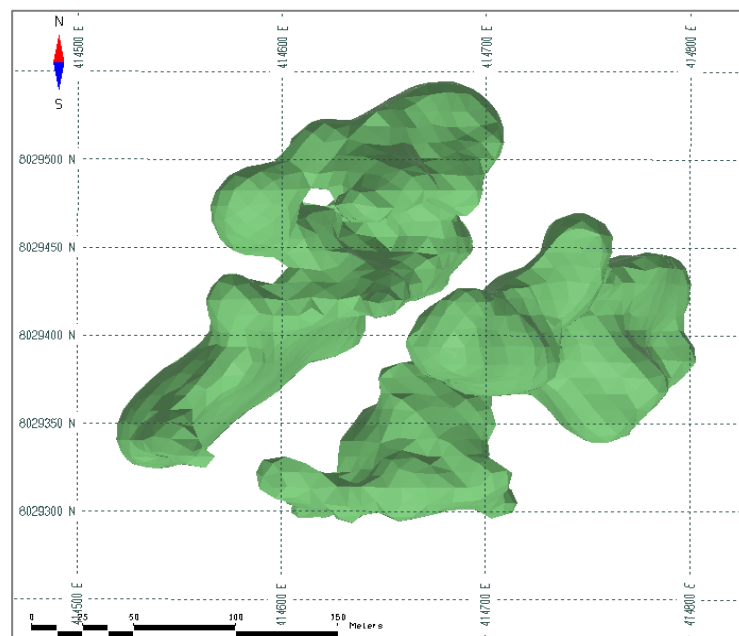


*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración sílice masiva - perfil. Fuente: elaboración propia (2024)

### **3.2.10.7. Alteración Sílice pulverulenta**

**Figura 35**

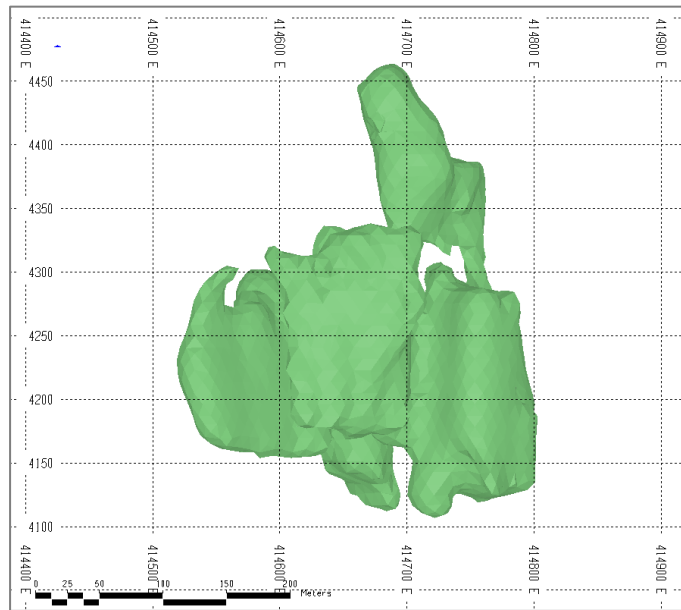
*Alteración Sílice pulverulenta – Vista en planta*



*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración sílice pulverulenta. Fuente: elaboración propia (2024)

**Figura 36**

*Alteración Sílice pulverulenta – Vista en Perfil*

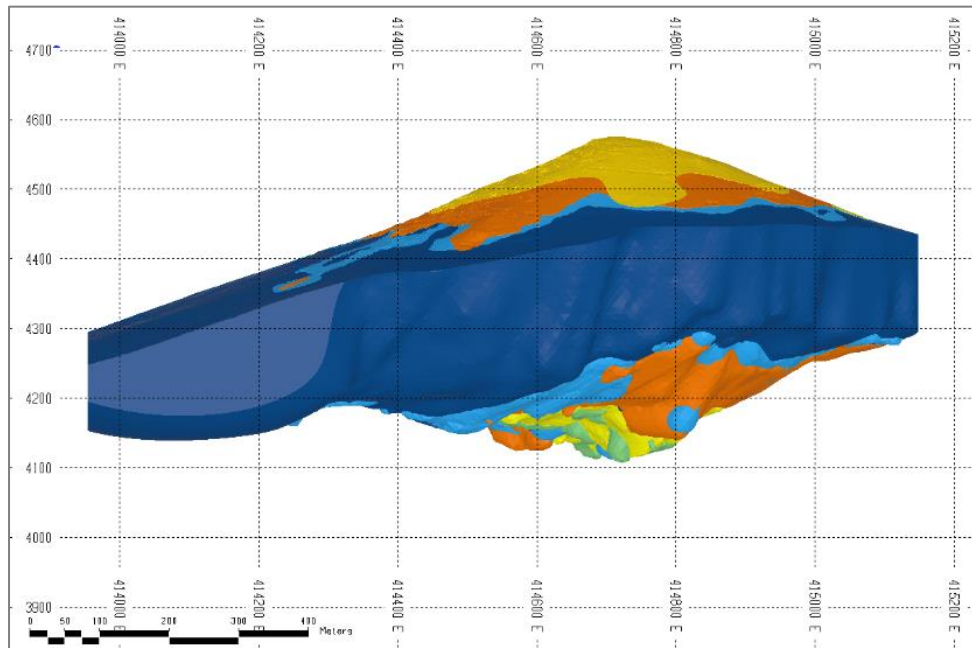


*Nota:* En la figura se muestra el modelo en solido de la alteración sílice pulverulenta - perfil. Fuente: elaboración propia (2024)

En resumen, el cerro Checocollo está compuesto en su mayoría por la alteración argílica intermedia e inicialmente en sus primeras etapas el proceso minero se topó como material de la alteración de sílice masiva. Sin embargo, el sector en estudio en particular contempla la pared frontera Este donde el material más abundante corresponde a la alteración Vuggy cuyos parámetros geomecánicos se observa en las tablas anteriores a este capítulo. En la figura 37 se observa que el material azul corresponde a la alteración argílica intermedia y el material amarillo al material de sílice masiva.

**Figura 37**

*Vista en perfil de las alteraciones del cerro Checocollo*



*Nota:* la figura muestra el perfil de las alteraciones del cerro Checocollo. Fuente: elaboración propia (2024)

### **3.3. Modelo de diseño de mina**

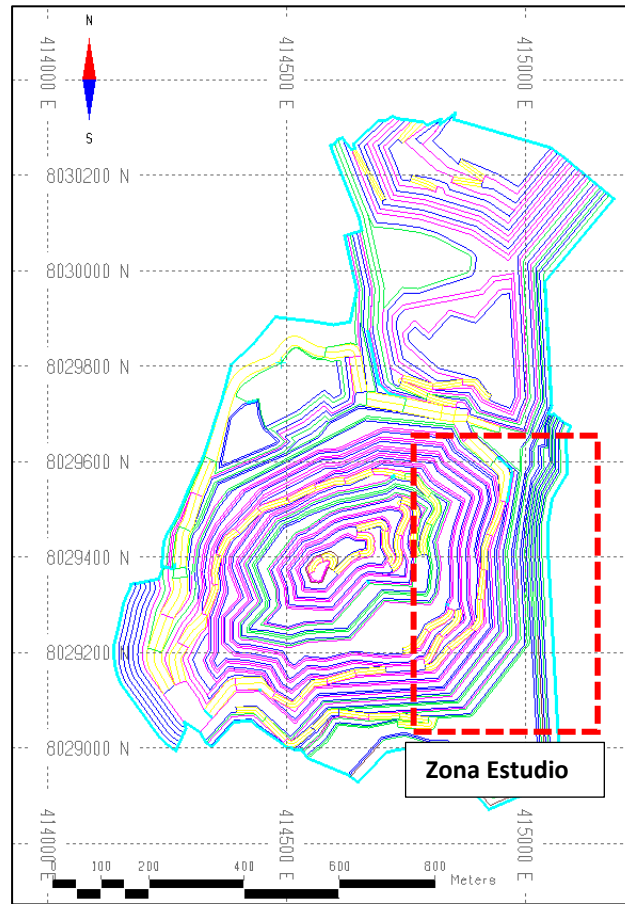
El diseño de la mina se realizó en base a los parámetros geomecánicos de las alteraciones y estudios previos de perforación, mapeo y ensayos de laboratorio. Para ello se realizó los estudios necesarios de ancho de banco ideal para retener posibles eventos de caída de roca y cuya configuración conforme el ángulo de interrampa que garantice su estabilidad global.

En resumen, los parámetros geométricos del diseño consideran alturas de banco de 7.5 metros para bancos simples y 15 metros para bancos dobles, el ángulo cara de banco (BFA) es de 65° teniendo algunos sectores de 52°, los anchos de berma varían de acuerdo a la altura de banco teniendo así valores de 5-6 metros para alturas de banco de 7.5 metros y 8 - 10 metros de ancho para alturas de banco de 15 metros. Bajo estas consideraciones el valor del ángulo interrampa varia de 41° a 45° metros dependiendo a sector. Esta descripción corresponde a los parámetros del tajo Checocollo.

En figura 38 siguiente se muestra el diseño del tajo en líneas de toe (pie de talud) y cresta (parte más alta del talud) así como el detalle de rampas y banquetas intermedias.

**Figura 38**

*Vista en planta del diseño del tajo en líneas de toe y cresta*

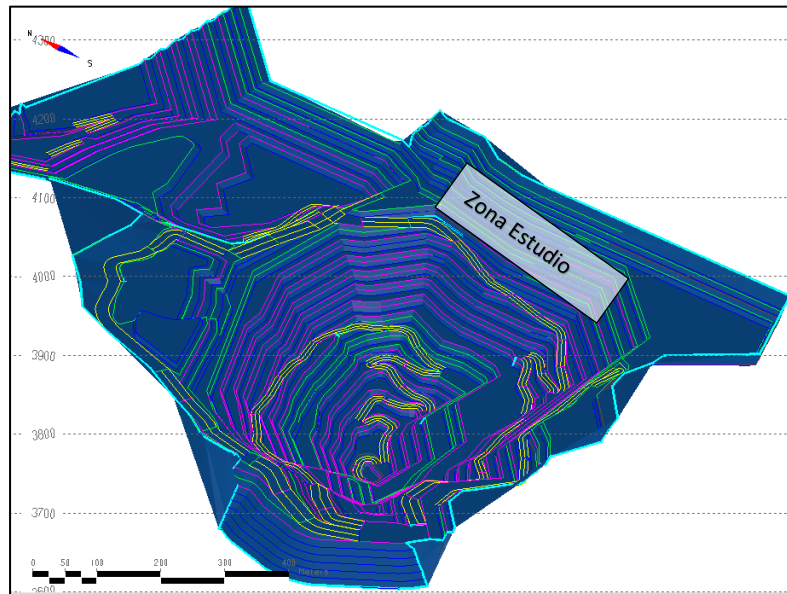


*Nota:* Se muestra las líneas de diseño en toes y crestas generadas en Mineplan. Fuente: Elaboración propia (2024)

Las líneas de toe y cresta representan el pie y la parte más alta del talud, el control del diseño se realiza con la demarcación de estos dos parámetros como líneas guía para los operadores que realizan el perfilado de taludes, a partir de estas líneas de diseño proporcionadas por el área de planeamiento que se triangula y se genera el diseño en superficie de la mina, esta imagen contempla la configuración final del tajo de acuerdo a los estudios actuales.

**Figura 39**

*Vista isométrica en superficie del diseño del tajo*



*Nota:* Se muestra el modelo en superficie generado a partir de las líneas de toe y cresta. Fuente: elaboración propia (2024)

Al diseño en superficie también incluye la topografía actual del terreno con el cual es intersecado teniendo así una idea más real de la configuración del diseño contemplando el entorno del estudio. Este proceso tiene el objetivo de crear un modelo en tres dimensiones que represente con mayor realismo la investigación. En la figura 40 se puede observar la vista en planta del tajo en la actualidad.

**Figura 40**

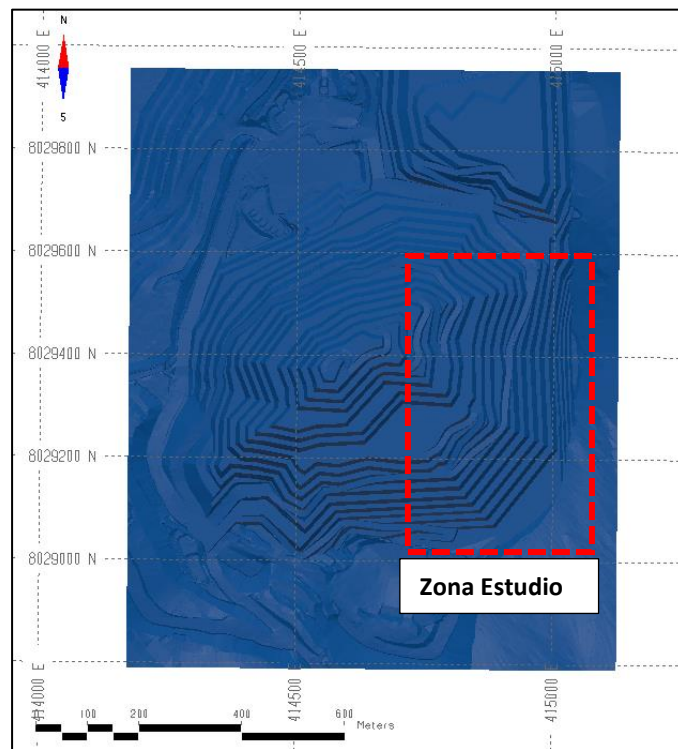
*Vista en planta de la condición actual del tajo Checocollo*



*Nota:* En la figura se muestra el tajo Checocollo en la condición actual, fotografía tomada con vuelo dron. Fuente: Propia (2023)

**Figura 41**

*Vista en planta de la superficie del diseño del tajo*

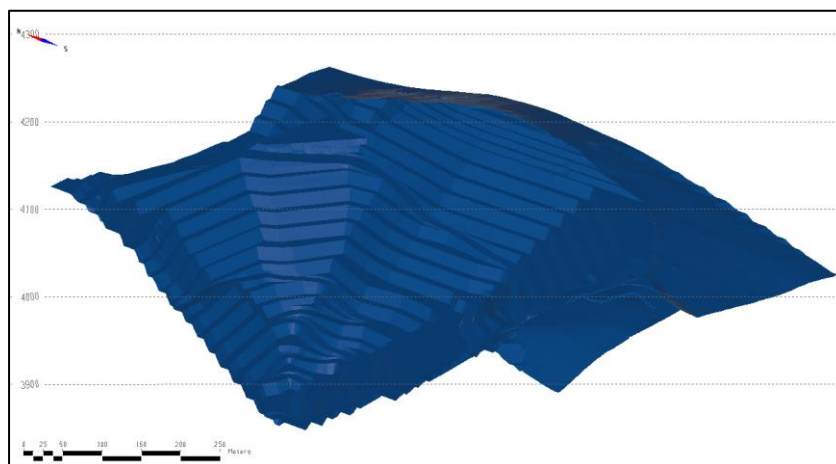


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

La superficie cortada para el sector en análisis se muestra en la figura 42 el cual corresponde a la pared Este del tajo. Se realiza este recorte con el fin de aligerar los análisis del modelo de tres dimensiones.

**Figura 42**

*Vista isométrica en superficie del sector este – pared frontera del tajo*

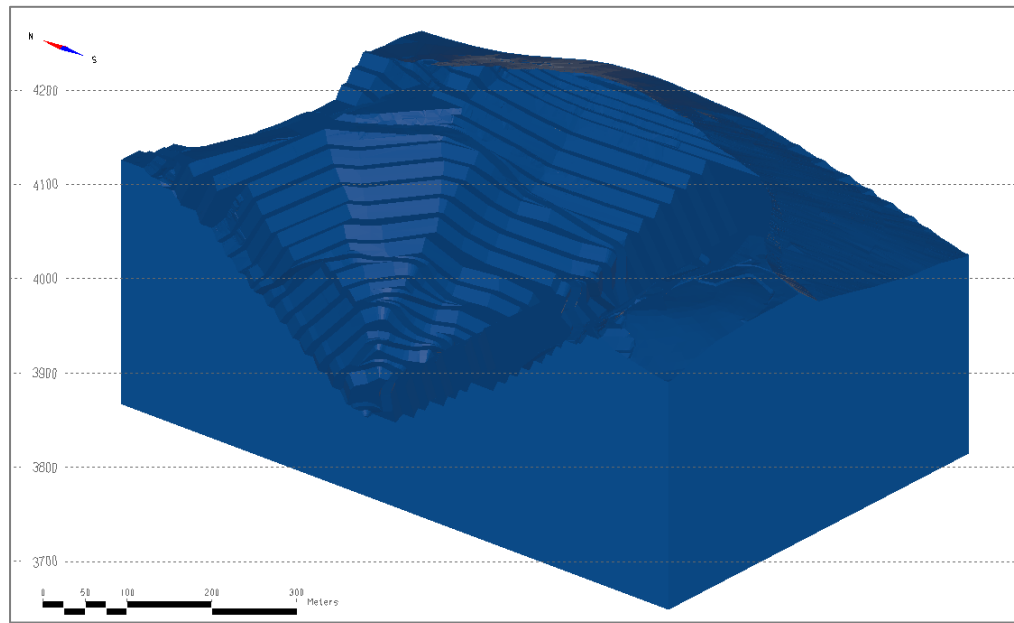


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

A fin de limitar los sólidos de las alteraciones presentadas en el capítulo anterior se genera un sólido del diseño del tajo, con este modelo se procedió a realizar el corte de las litologías, en la figura 43 se representa este modelo.

**Figura 43**

*Vista isométrica en solido del sector este – pared frontera del tajo*

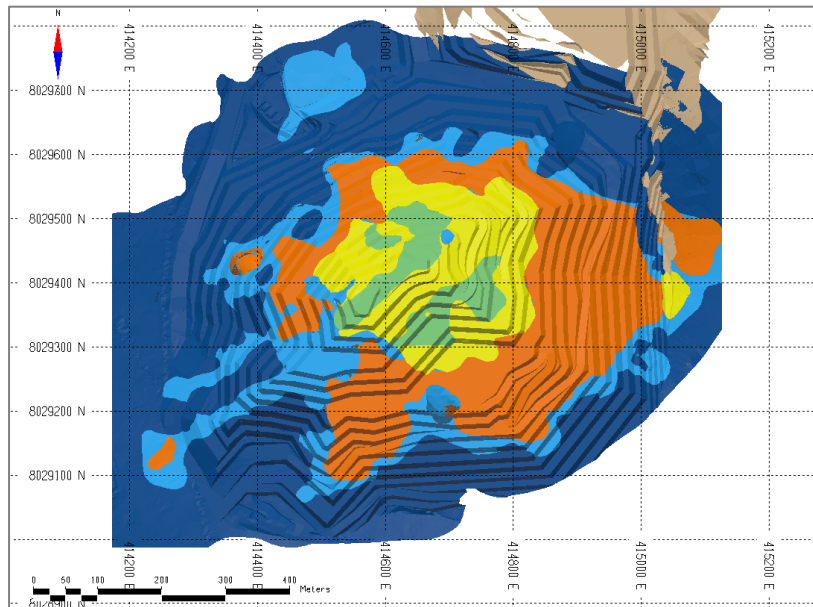


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

El modelo de alteración del tajo Checocollo descrito en el capítulo anterior intersecado con el diseño nos proporciona una idea más clara de las alteraciones que estarán presentes en las paredes finales tajo conforme se realiza el proceso de minado. En la figura 44 se puede observar que conforme se profundiza el tajo la alteración dominante va variando.

**Figura 44**

*Vista en planta de las alteraciones del tajo Checocollo.*

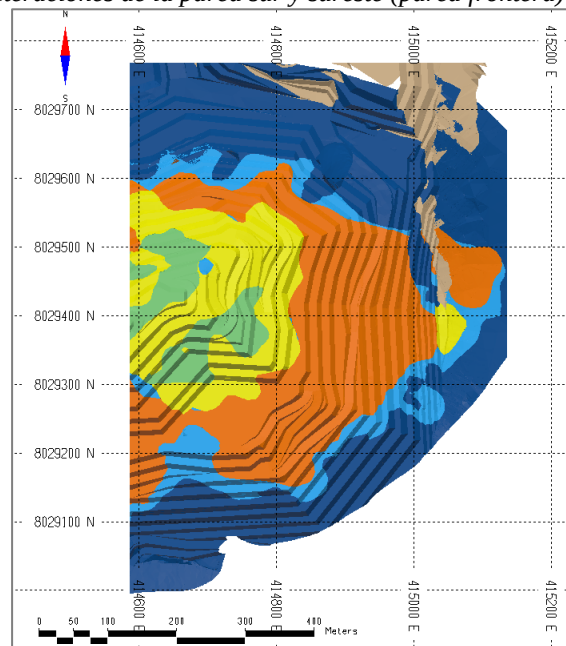


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

El modelo anterior cortado y sectorizado para la pared este (E) nos ayudó a identificar que las alteraciones más predominantes en esta zona de análisis, como son el Vuggy (naranja), argílica avanzada (celeste), sílice granular (amarillo) y pulverulenta (verde) en niveles más profundos.

**Figura 45**

*Vista en planta de las alteraciones de la pared sur y sureste (pared frontera)*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

El modelo de sólidos de estas alteraciones cortado con la huella del diseño se usa para poder generar el modelo geotécnico en 3 dimensiones y realizar el análisis de estabilidad del sector. En la figura 47 se tiene la vista isométrica del sector Este del tajo el cual fue recortado para poder aligerar el tamaño del archivo y con ello el tiempo de simulación posterior. También en la figura 46 se muestra la pared Este en la situación actual para poder visualizar las alteraciones en campo.

**Figura 46**

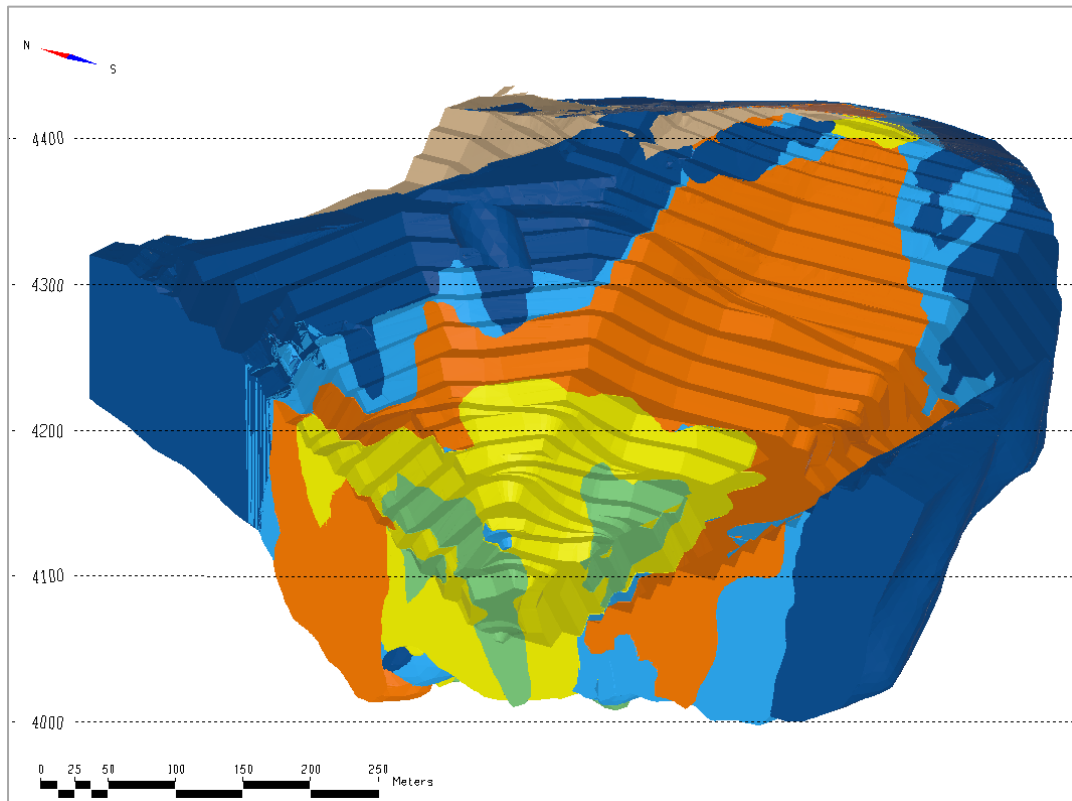
*Pared Este del tajo Checocollo actual.*



*Nota:* En la figura se muestra la pared Este del tajo Checocollo en la condición actual, fotografía tomada con vuelo dron. Fuente: Propia (2023)

**Figura 47**

*Vista en isométrica de las alteraciones de la pared sur y sureste (pared frontera)*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

### **3.3.1. Creación de modelos geotécnicos**

Con los sólidos de las alteraciones cortadas en el software Mineplan 15.4 se exportan en formato de AutoCAD dxf., este formato nos ayuda a poder importar al software Slide3, este programa es parte del paquete Rocscience y usa el método de equilibrio límite para calcular el factor de seguridad.

#### **3.3.1.1. Modelo geotécnico tridimensional**

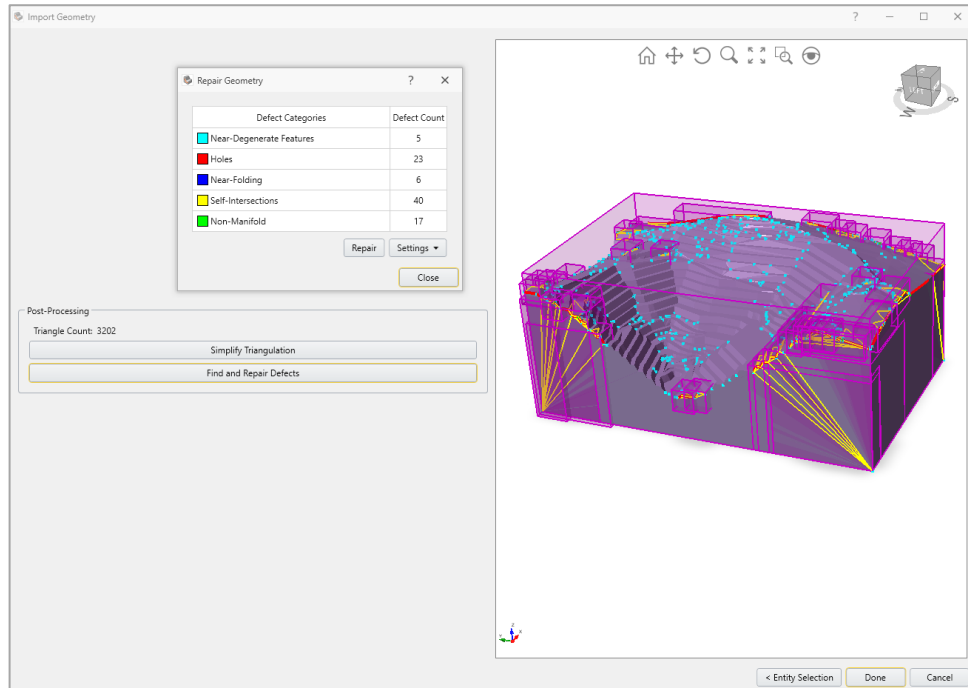
El modelo geotécnico tridimensional se genera en base a los archivos dxf exportados anteriormente, para este proceso se usará las herramientas del software Slide3.

Al importar los sólidos el software mencionado realiza la corrección de la superficie verificando que no tenga vacíos y caras repetidas, este proceso es muy importante ya que los softwares de diseño y planeamiento de mina generalmente contiene muchos errores a la hora de triangular superficies, trabajar con un modelo con superficies dañadas no permitirá continuar con el proceso de análisis o en su defecto nos proporcionará resultados erróneos. En

la figura 48 se muestra el proceso de importación y corrección de errores del solido de diseño del tajo.

**Figura 48**

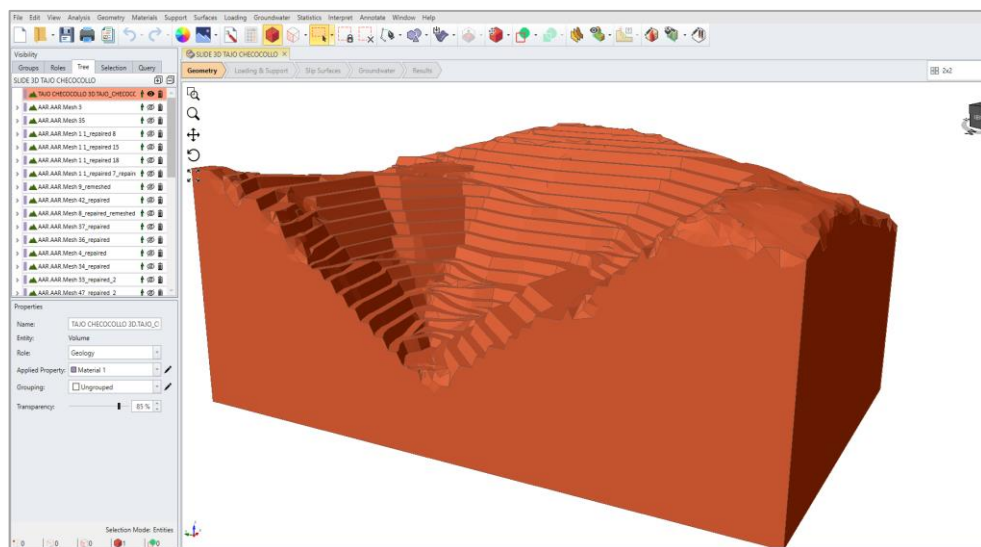
*Importe y corrección de errores de solido de diseño de mina*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

**Figura 49**

*Solido de diseño de mina importado y corregido.*

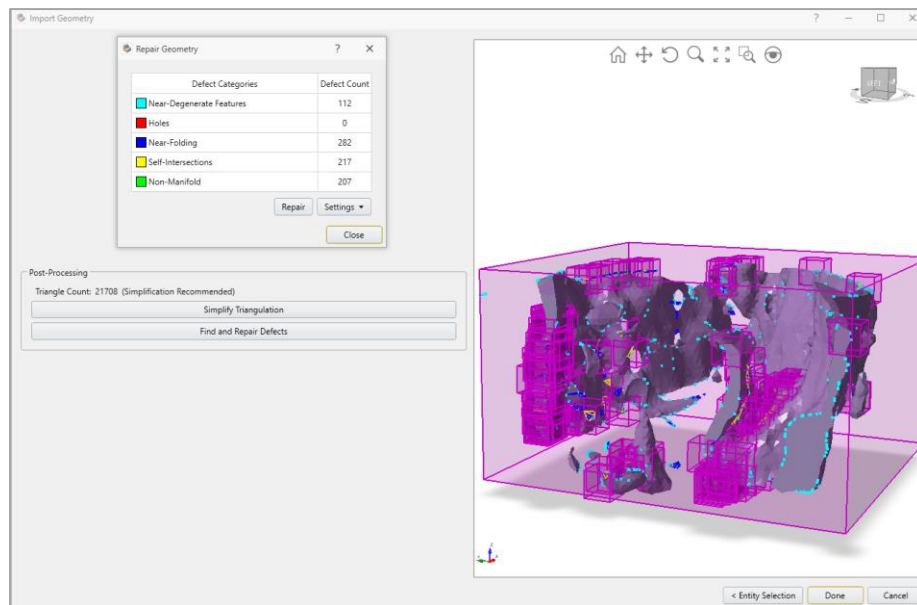


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

De manera similar al caso anterior se realizó para los modelos de alteración, estos sólidos por su detalle poseen errores mucho mayores los cuales se deben de que corregir usando las herramientas de dividir y re triangular del software Slide 3D. En la figura 50 se muestra el proceso de importación y corrección de errores de los sólidos de la alteración argílica avanzada.

**Figura 50**

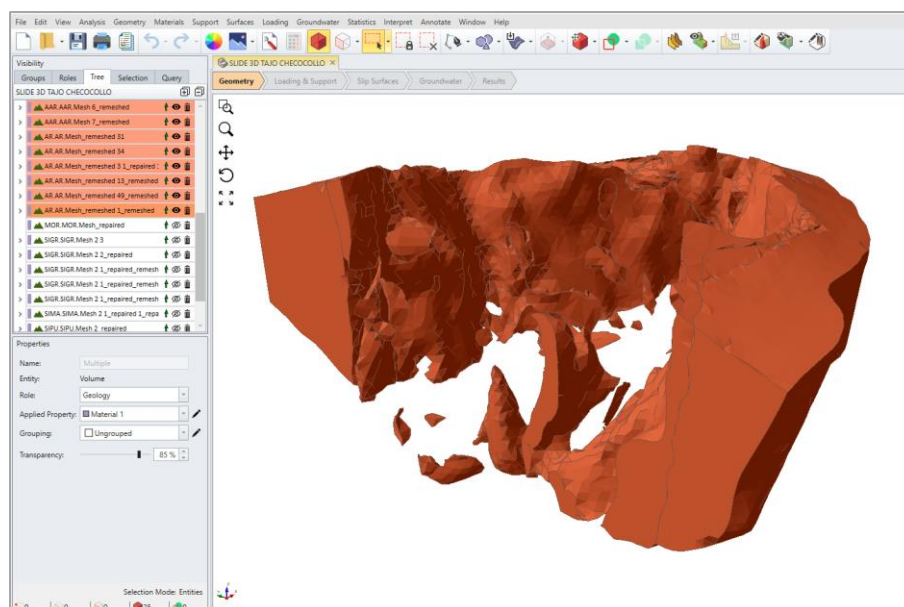
*Importe y corrección de errores de solido de alteraciones.*



*Nota: Figura de elaboración propia (2024)*

**Figura 51**

*Solido de modelo de alteraciones importado y corregido.*

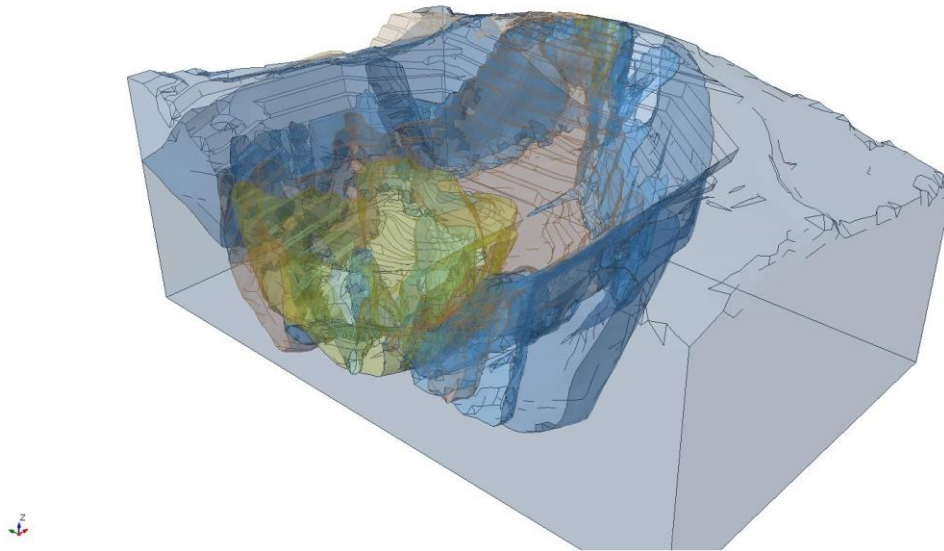


*Nota: Figura de elaboración propia (2024)*

Este proceso se realiza para todas las alteraciones o diseños que influirán en el análisis de estabilidad, finalmente se tendrá los sólidos corregidos y sin ningún tipo de defecto o vacío. En las figuras 52 y 53 muestran las salidas del software Slide3, se puede visualizar que usa una transparencia por defecto para poder manipular y diferenciar los sólidos de las alteraciones importadas.

**Figura 52**

*Diseño de mina y modelo de alteraciones importados y corregidos*

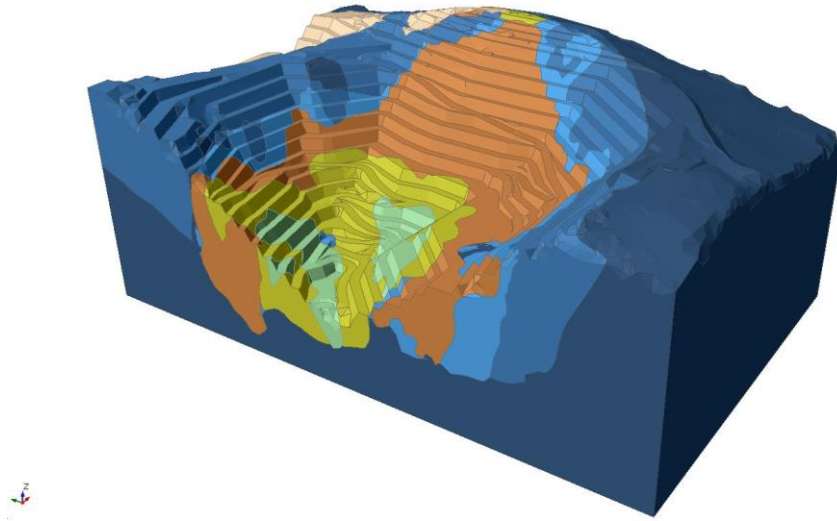


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024).

Posterior a la creación de los modelos cada sólido en tres dimensiones será asignado con los colores correspondientes para poder diferenciar las alteraciones, para completar este proceso se usarán los colores ya establecidos en los modelos del Mineplan y los colores usados en mina.

**Figura 53**

*Asignación de colores a los sólidos del modelo de alteraciones*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024).

Finalmente se ingresan los parámetros geomecánicos de cada alteración el cual contempla la resistencia a la compresión uniaxial de la roca, el valor del índice de resistencia geológica (GSI), los valores de peso específico, constante de la roca intacta ( $m_i$ ) y el valor de la disturbancia causada por los proyectos de voladura ( $D$ ); todos estos valores son descritos en el capítulo de parámetros geotécnicos proporcionados en base a los estudios de la empresa consultora Anddes.

**Figura 54**

*Asignación de propiedades de los materiales*

| Type                     | Data                     | More |
|--------------------------|--------------------------|------|
| UCS of intact rock (kPa) | 17000                    |      |
| Define by                | GSI, $m_i$ , $d$         |      |
| GSI                      | 40                       |      |
| $m_i$                    | 8.5                      |      |
| $D$                      | 0.5                      |      |
| Use Tensile Strength     | <input type="checkbox"/> |      |

*Nota:* Figura de elaboración propia (2024).

### 3.3.1.1. Modelo geotécnico bidimensional

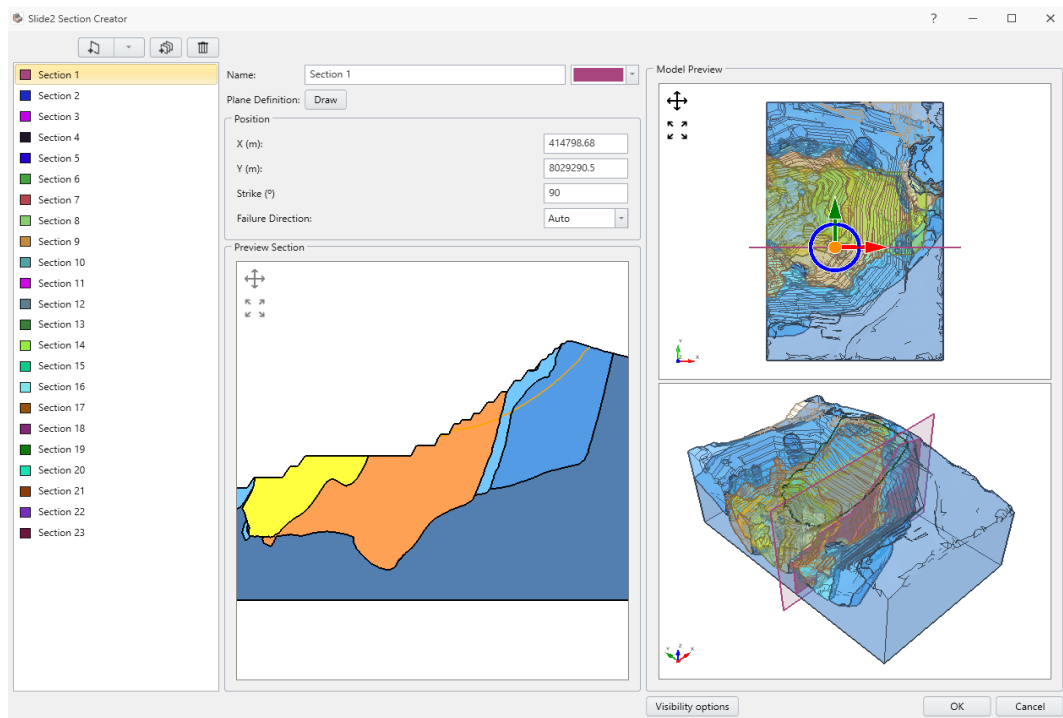
Existe una variedad de formas de generar un modelo bidimensional usando diversos programas del mercado como el Mineplan, Leapfrog, Datamine, Civil 3D , etc, cada programa con sus ventajas y desventajas, para el presente estudio se usó el mismo modelo 3D generado en el software Slide 3D para esto previamente se trazó las líneas de sección que se va analizar, las líneas de sección deben mantener la perpendicularidad al azimuth de los taludes de diseño en una vista en planta..

El objetivo de trazar muchas secciones de análisis en la pared de interés es poder identificar adecuadamente la sección más crítica y cuyo valor de factor de seguridad será comparado con el factor de seguridad del caso tridimensional. Este proceso también nos ayudará a verificar la evolución de los factores de seguridad en un tramo de análisis, este proceso en la realidad es simplificado al criterio del evaluador el cual cometer errores por falta de experiencia o conocimiento.

En total se generaron 23 secciones espaciados a 10 metros cuyas posiciones de inicio son importados en coordenadas al software Slide3 usado como se muestra en la figura.

**Figura 55**

*Generación de secciones a partir del modelo tridimensional*

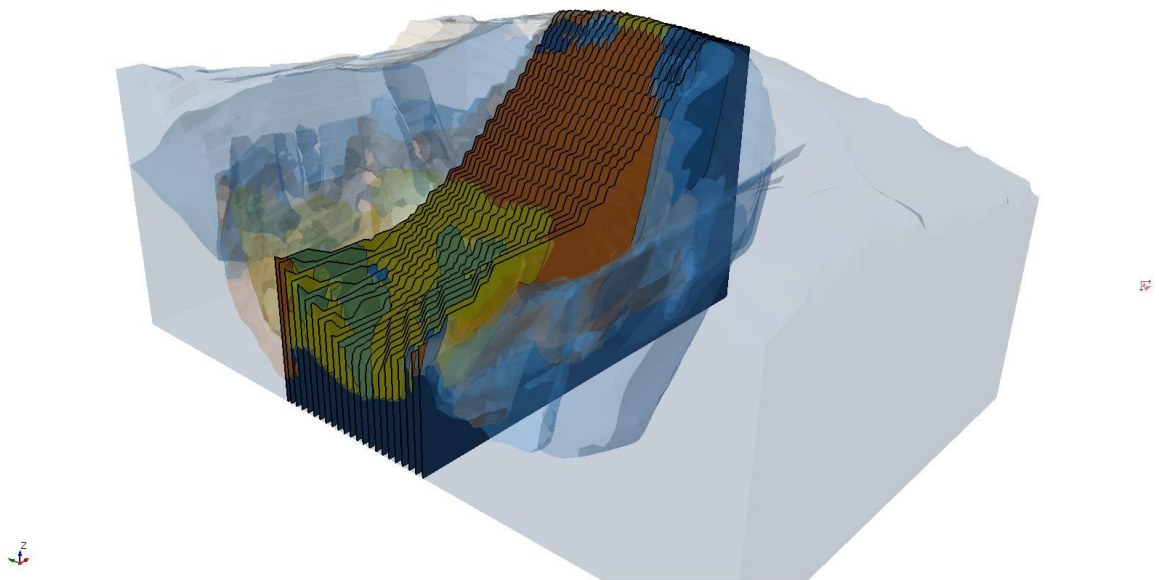


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024).

Las secciones generadas se irán visualizando conforme se avanza con la inserción de las coordenadas en la figura se muestra la vista isométrica de las secciones creadas y la vista en planta de las mismas correspondientes a la pared este del tajo Checocollo.

**Figura 56**

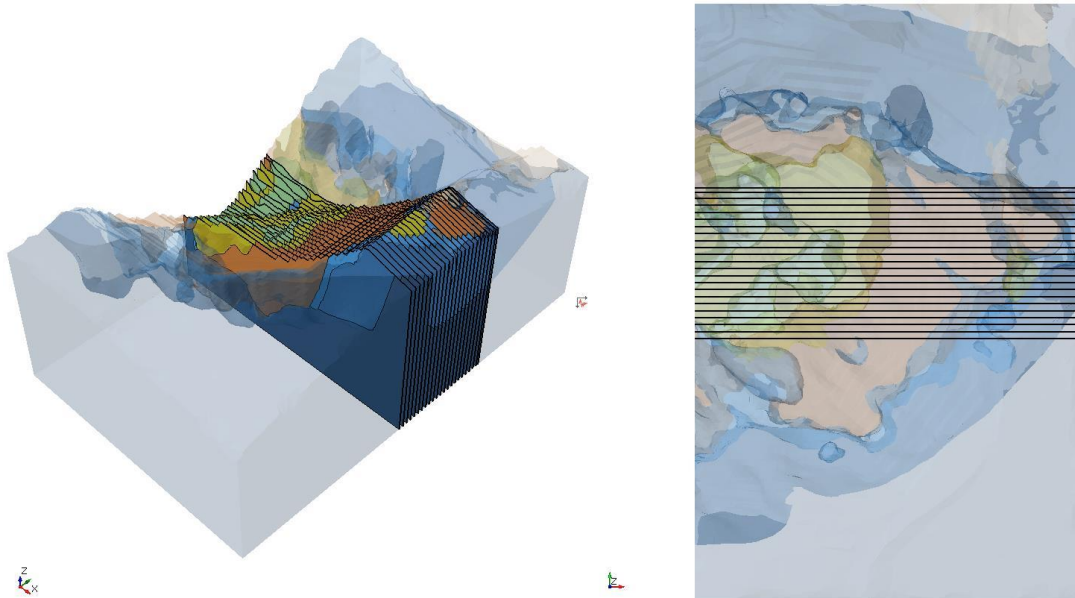
*Secciones generadas en el modelo tridimensional.*



*Nota: Figura de elaboración propia (2024).*

**Figura 57**

*Secciones generadas - vista en planta e isométrico.*

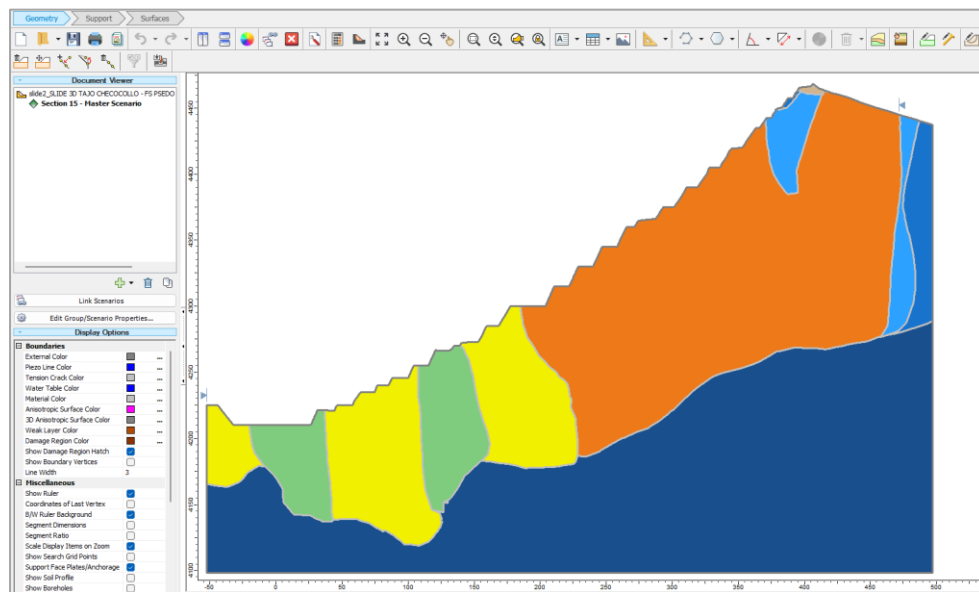


*Nota: Figura de elaboración propia (2024).*

Finalmente, cada sección de análisis quedara como lo figura 58 donde se corrobora que la alteración dominante por la pared de análisis es el vuggy.

**Figura 58**

*Sección bidimensional culminada.*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024).

## CAPÍTULO IV

### 4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1.1. Resultados del análisis de estabilidad física en 3 dimensiones

Con los modelos creados y propiedades de los materiales ingresados se definió los métodos de análisis. Para realizar un mayor énfasis en los factores de seguridad se usó el método **Spencer** y **Morgenstern Price**, porque son los métodos más usados y completos de la actualidad, ambos métodos usan también el método de equilibrio límite con su modificación para el caso tridimensional. La superficie de falla a buscar es no circular debido a que se simula y representa un terreno rocoso.

Para simular el caso pseudoestático se utilizó como coeficiente sísmico el valor de 0.2 en base a los estudios de peligro sísmico realizados anteriormente e incluidos en esta investigación en el capítulo de materiales.

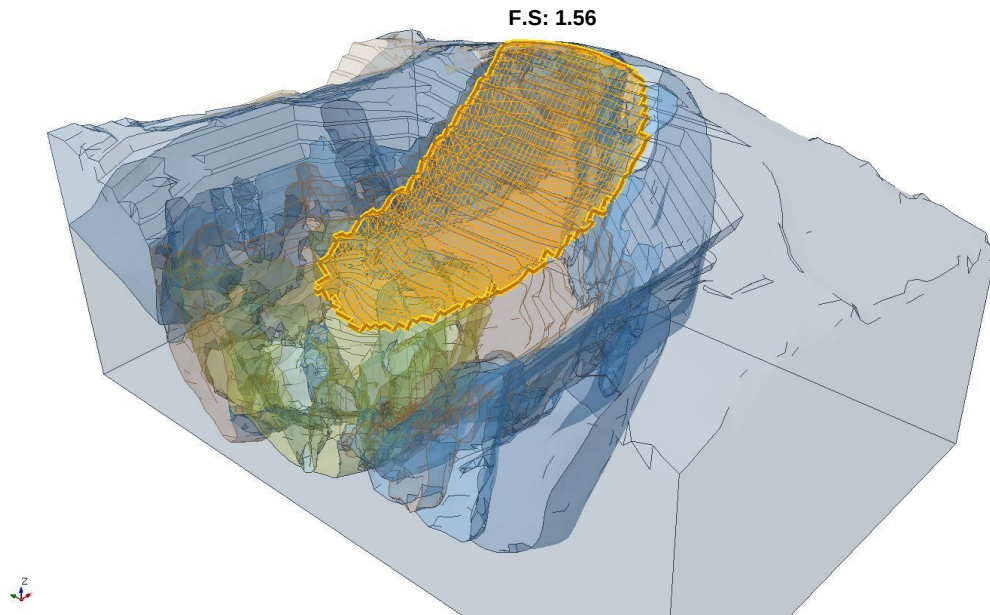
##### 4.1.1.1. *Caso condición estática 3D.*

Para el caso de análisis en condición estática de tres dimensiones con el método Spencer se obtuvo como valor de factor de seguridad 1.56, este valor se considera **estable** y mayor a los valores de diseño establecidos cumpliendo con el mínimo para el valor de factor de seguridad de la etapa de operación ( $FS = 1.3$ ) y el de cierre ( $FS = 1.5$ ).

En la figura 59 se observa la superficie de falla en 3D con el factor de seguridad estático más crítico para la pared Este del tajo para el método Spencer.

**Figura 59**

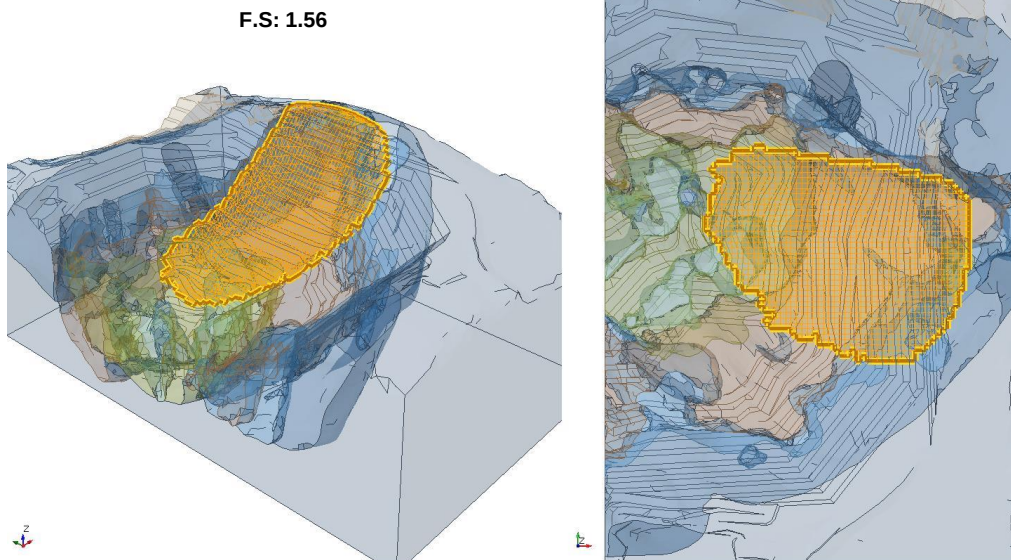
*Resultado factor de seguridad estático tridimensional – Spencer.*



*Nota: Figura de elaboración propia (2024).*

**Figura 60**

*Vista en plata e isométrico de superficie de falla estático tridimensional – Spencer.*



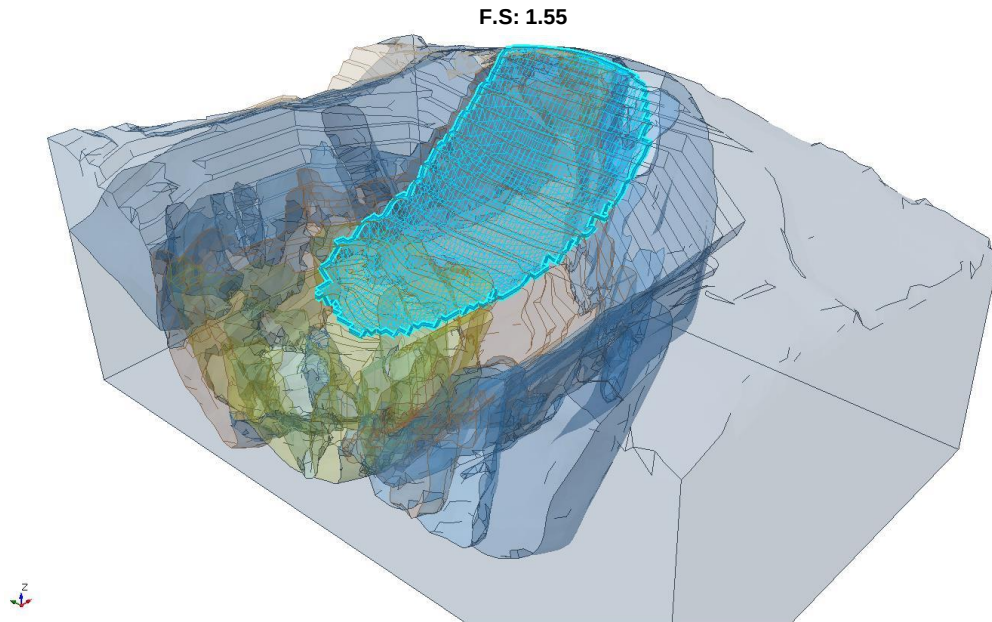
*Nota: Figura de elaboración propia (2024).*

Para el caso de análisis en condición estática de tres dimensiones con el método Morgenstern Price se obtuvo como valor de factor de seguridad 1.55, este valor se considera **estable** y mayor a los valores de diseño establecidos cumpliendo con el mínimo para el valor de factor de seguridad de la etapa de operación (FS =1.3) y el de cierre (FS=1.5). A diferencia del método de Spencer se tiene un valor ligeramente menor.

En la figura 61 se observa la superficie de falla en 3D con el factor de seguridad estático más crítico para la pared este del tajo para el método Morgenstern Price.

**Figura 61**

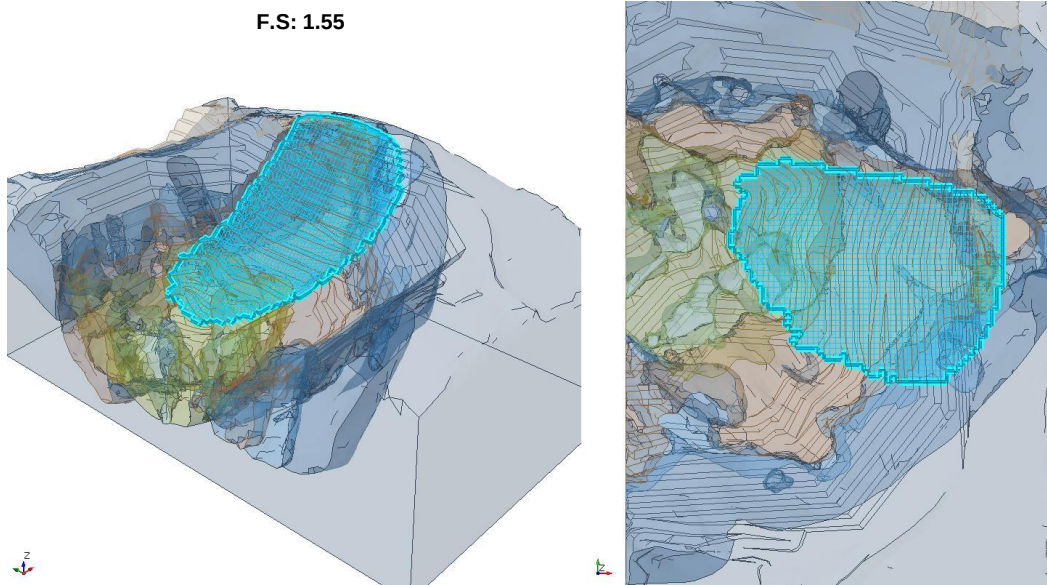
*Resultado factor de seguridad estático tridimensional –M.P.*



*Nota: Figura de elaboración propia (2024).*

**Figura 62**

*Vista en planta e isométrico de superficie de falla estático tridimensional – M.P.*



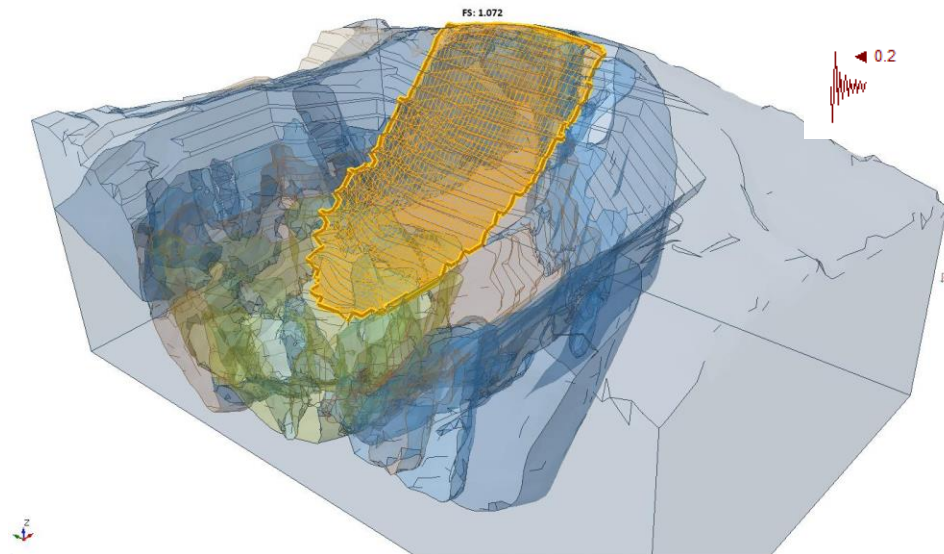
*Nota: Figura de elaboración propia (2024).*

#### 4.1.1.2. Caso condición Pseudoestático 3D

Para el caso de análisis en condición pseudoestático de tres dimensiones con el método Spencer se obtuvo como valor de factor de seguridad 1.07, este valor se considera **estable** y mayor al valor de diseño establecido cumpliendo con el mínimo para la etapa de operación y cierre (FS=1.0). En la figura 63 se observa la superficie de falla en 3D con el factor de seguridad pseudoestático más crítico para la pared Este del tajo para el método Spencer.

**Figura 63**

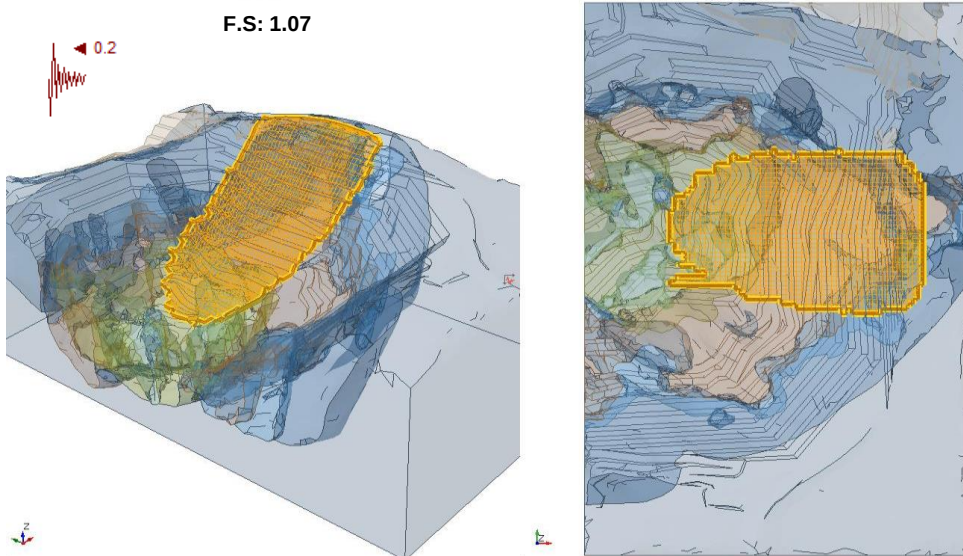
*Resultado factor de seguridad pseudoestático tridimensional – Spencer.*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

**Figura 64**

*Vista en plata e isométrico de superficie de falla pseudoestático tridimensional – Spencer.*

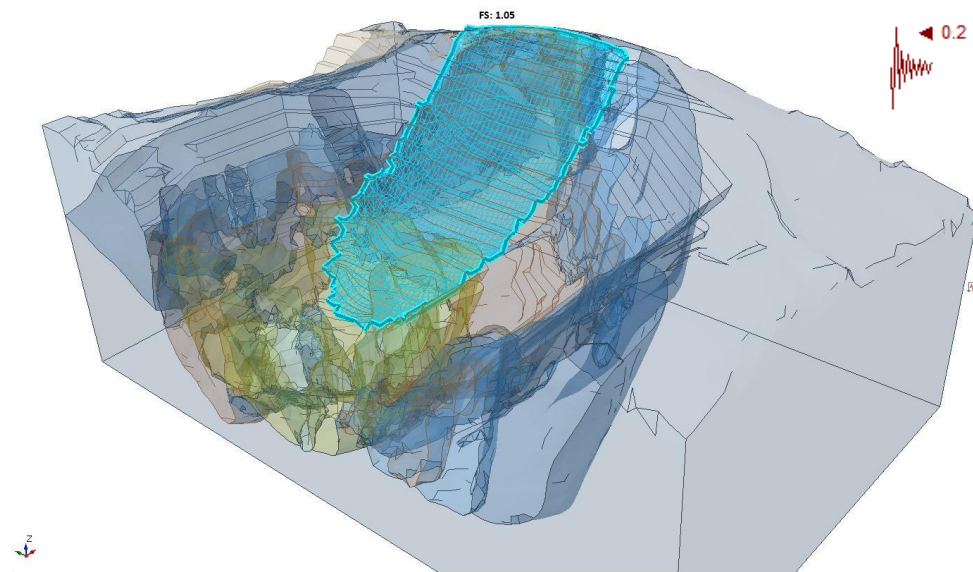


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

Para el caso de análisis en condición pseudoestático de tres dimensiones con el método Morgenstern Price se obtuvo como valor de factor de seguridad 1.05, este valor se considera **estable** y mayor al valor de diseño establecido cumpliendo con el mínimo para la etapa de operación y cierre (FS=1.0). En la figura 65 se observa la superficie de falla en 3D con el factor de seguridad pseudoestático más crítico para la pared este del tajo para el método Morgenstern Price.

**Figura 65**

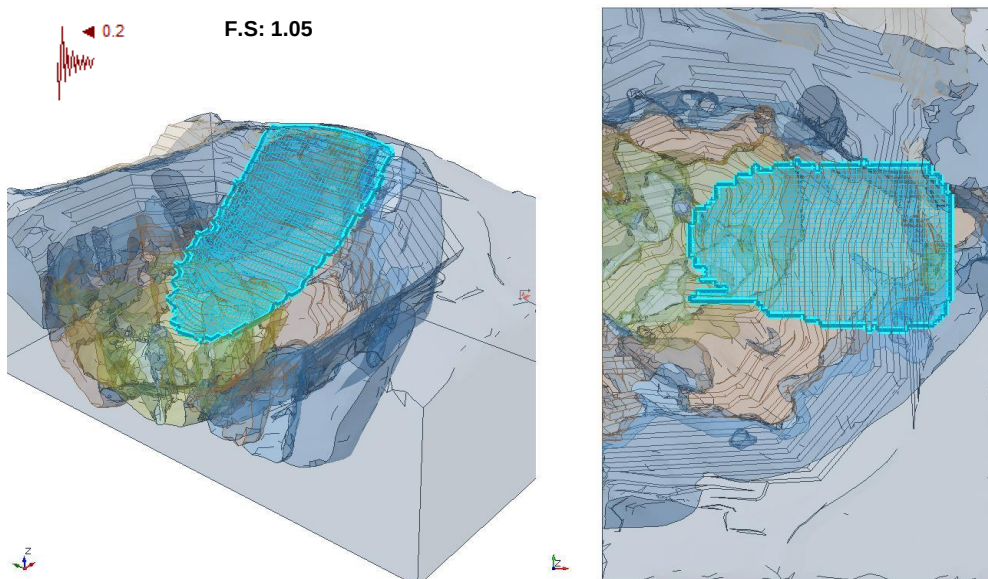
*Resultado factor de seguridad pseudoestático tridimensional – M.P.*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

**Figura 66**

*Vista en plata e isométrico de superficie de falla pseudoestático tridimensional – M.P.*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

#### 4.1.2. Resultados de análisis de estabilidad física en 2 dimensiones

Con las secciones creadas y propiedades de los materiales ingresados se definió los métodos de análisis. Para realizar un mayor énfasis en los factores de seguridad bidimensional se usó el método **Spencer** y **Morgenstern Price**, ampliamente usados en la actualidad, ambos métodos se basan también en el método de equilibrio límite. La superficie de falla a buscar es no circular debido a que se simula un terreno dominado por material rocoso.

Para simular el caso pseudoestático en dos dimensiones también se utilizó como coeficiente sísmico el valor de 0.2 en base a los estudios de peligro sísmico realizados anteriormente e incluidos en esta investigación en el capítulo 3.

##### 4.1.2.1. Caso condición estático 2D

Para este caso se presenta los resultados de las 23 secciones creadas para visualizar la evolución de los factores de seguridad estáticos por el método Spencer y Morgenstern Price considerando para el estudio los valores más críticos o mínimos.

**Tabla 16**

*Resultados de factores de seguridad por sección – Caso Estático Bidimensional.*

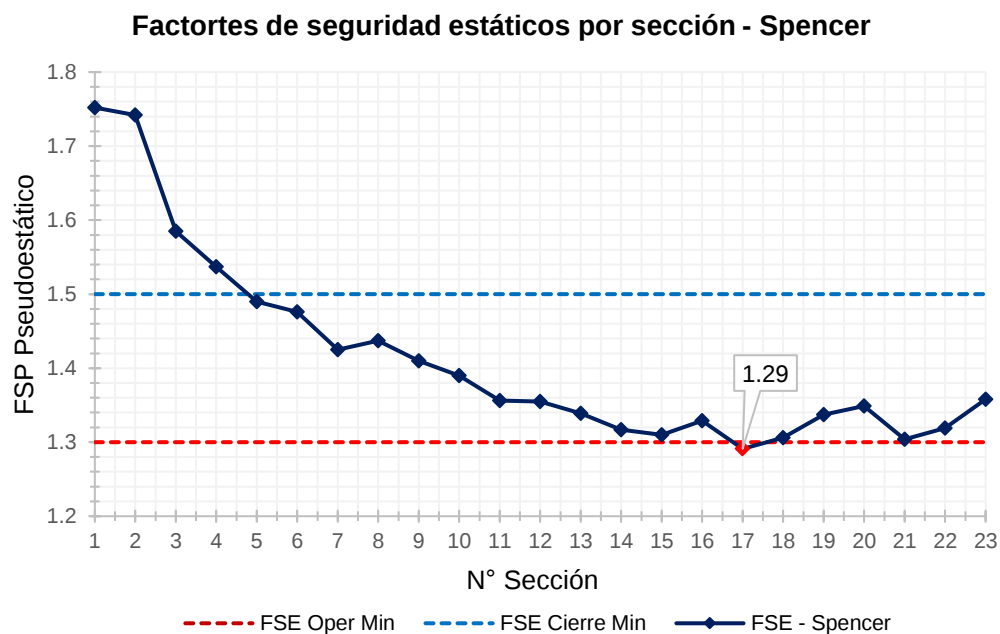
| Factores de Seguridad por Sección - Estático |               |              |
|----------------------------------------------|---------------|--------------|
| Sección                                      | FSE - Spencer | FSE - MP     |
| Sección 01                                   | 1.752         | 1.732        |
| Sección 02                                   | 1.742         | 1.689        |
| Sección 03                                   | 1.585         | 1.582        |
| Sección 04                                   | 1.537         | 1.526        |
| Sección 05                                   | 1.49          | 1.493        |
| Sección 06                                   | 1.476         | 1.467        |
| Sección 07                                   | 1.425         | 1.445        |
| Sección 08                                   | 1.437         | 1.389        |
| Sección 09                                   | 1.41          | 1.382        |
| Sección 10                                   | 1.39          | 1.339        |
| Sección 11                                   | 1.356         | 1.336        |
| Sección 12                                   | 1.355         | 1.327        |
| Sección 13                                   | 1.339         | 1.32         |
| Sección 14                                   | 1.317         | 1.299        |
| Sección 15                                   | 1.31          | 1.296        |
| Sección 16                                   | 1.329         | 1.309        |
| Sección 17                                   | <b>1.291</b>  | <b>1.273</b> |
| Sección 18                                   | 1.306         | 1.288        |
| Sección 19                                   | 1.337         | 1.318        |
| Sección 20                                   | 1.349         | 1.353        |
| Sección 21                                   | 1.304         | 1.283        |
| Sección 22                                   | 1.319         | 1.303        |
| Sección 23                                   | 1.358         | 1.461        |
| <b>Average</b>                               | <b>1.41</b>   | <b>1.40</b>  |

*Nota:* Tabla de elaboración propia (2024)

Con estos datos de factores de seguridad se generó un gráfico (figura 67) donde se visualiza las secciones y los valores de factores de seguridad, en este caso para el método Spencer se puede observar que la sección más crítica es la sección 17 cuyo valor de factor de seguridad es 1.29, este valor se puede redondear al valor de 1.3 cumpliendo con el mínimo establecido para la operación del tajo (FS=1.3), que en el grafico es representado por la línea de color rojo. Al considerar los resultados obtenidos en las otras secciones se tiene un promedio de 1.41 el cual también **estable** para la operación del tajo.

**Figura 67**

*Factores de seguridad estático por sección – Método Spencer Bidimensional*

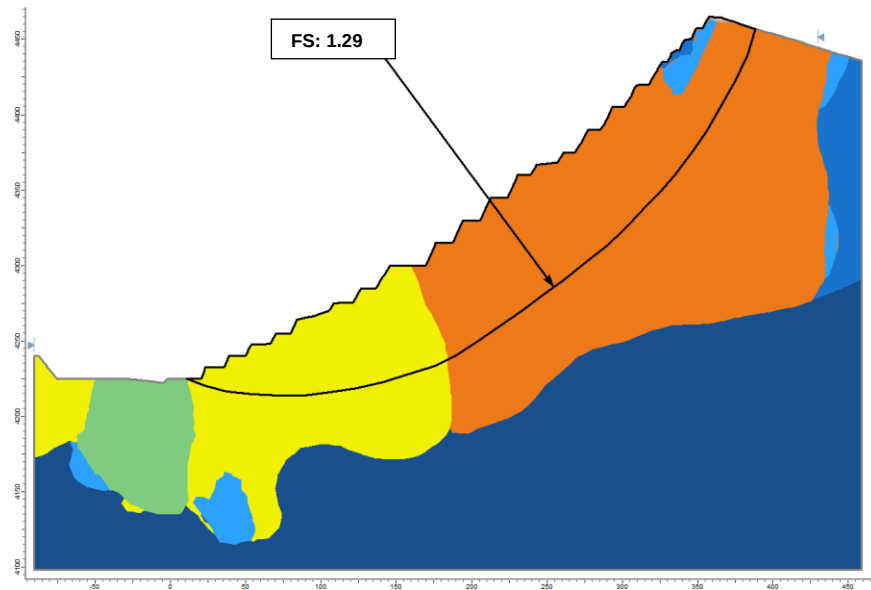


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

En la figura 68 siguiente se visualiza que la sección 17 tiene el factor de seguridad más crítico, este valor se considera **estable** para la etapa de Operación del tajo. Esta afirmación se sustenta en base a los resultados de factores de seguridad de las secciones circundantes los cuales tienen valores por encima de 1.3.

**Figura 68**

Sección crítica caso estático - Método Spencer Bidimensional

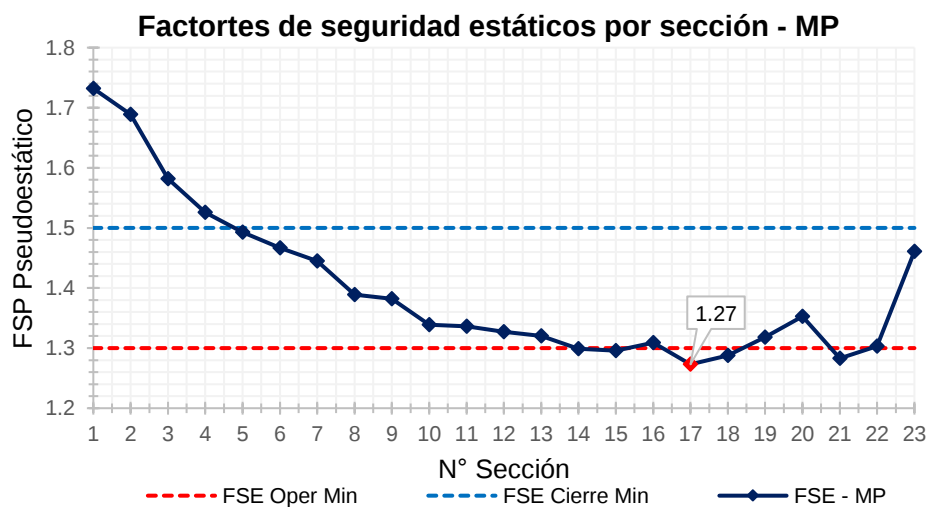


Nota: Figura de elaboración propia (2024)

De igual manera se generó el gráfico con entrada de las 23 secciones (figura 69) y valores de factores de seguridad por el método de Morgenstern Price teniendo como valor mínimo 1.27, este valor correspondiente a la sección 17, es ligeramente menor al valor obtenido por el método de Spencer, sin embargo, también se considera como 1.3 reduciendo a un decimal por lo cual es **estable** para la etapa de operación del tajo. Al considerar los resultados obtenidos en las otras secciones se tiene un promedio de 1.40 el cual también **estable** para la operación del tajo.

**Figura 69**

Factores de seguridad estático por sección – Método Morgenstern Price Bidimensional

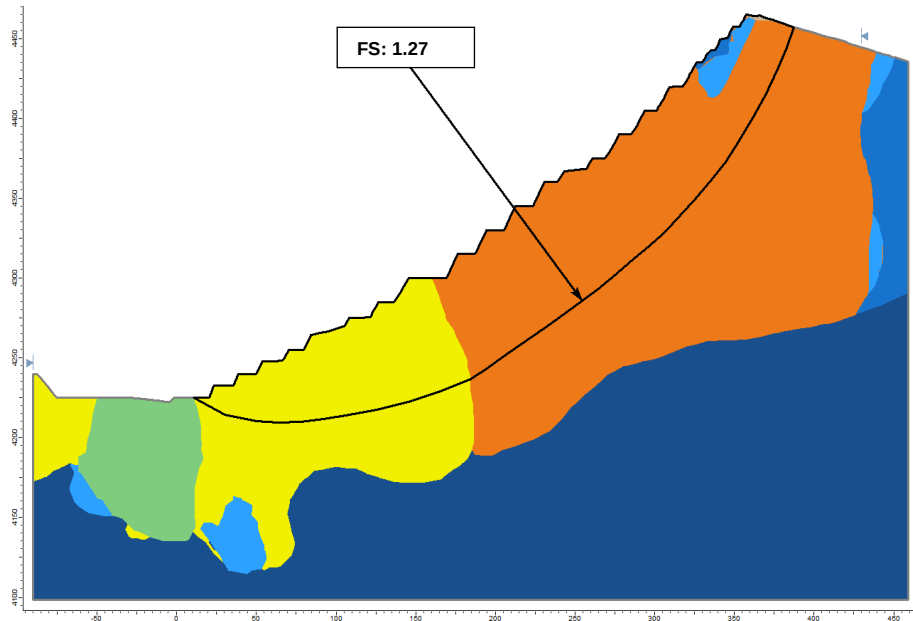


Nota: Figura de elaboración propia (2024)

En figura 70 se observa la sección 17, la cual es la más crítica cuyo valor de factor de seguridad 1.27 cumple de manera exacta con los valores mínimos, siendo **estable** para la operación del tajo.

**Figura 70**

*Sección crítica caso estático - Método Morgenstern Price Bidimensional*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

#### **4.1.2.2. Caso condición Pseudoestático 2D**

En el caso de condición pseudoestática se muestra en la tabla 17 los resultados de factor de seguridad por sección analizada para el método de Spencer y Morgenstern Price, se puede observar que conforme se avance a la zona de máxima pendiente del talud de la pared Este del tajo el valor del factor de seguridad va disminuyendo.

**Tabla 17**

*Resultados de factores de seguridad por sección – Caso Pseudoestático Bidimensional.*

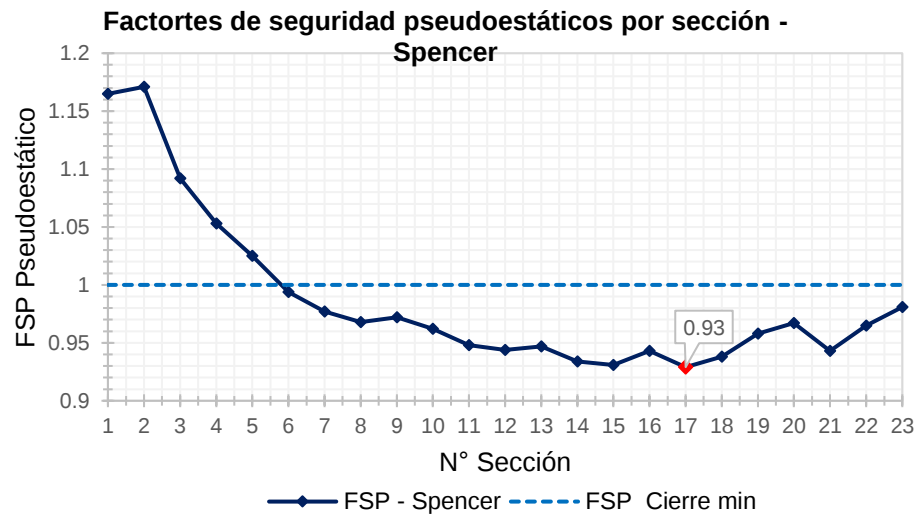
| <b>Factores de Seguridad por Sección - Pseudoestático</b> |                      |                 |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|
| <b>Sección</b>                                            | <b>FSP - Spencer</b> | <b>FSP - MP</b> |
| Sección 01                                                | 1.165                | 1.142           |
| Sección 02                                                | 1.171                | 1.158           |
| Sección 03                                                | 1.092                | 1.083           |
| Sección 04                                                | 1.053                | 1.049           |
| Sección 05                                                | 1.025                | 1.013           |
| Sección 06                                                | 0.994                | 0.98            |
| Sección 07                                                | 0.977                | 0.97            |
| Sección 08                                                | 0.968                | 0.955           |
| Sección 09                                                | 0.972                | 0.955           |
| Sección 10                                                | 0.962                | 0.945           |
| Sección 11                                                | 0.948                | 0.931           |
| Sección 12                                                | 0.944                | 0.927           |
| Sección 13                                                | 0.947                | 0.934           |
| Sección 14                                                | 0.934                | 0.92            |
| Sección 15                                                | 0.931                | <b>0.916</b>    |
| Sección 16                                                | 0.943                | 0.926           |
| Sección 17                                                | <b>0.929</b>         | 0.918           |
| Sección 18                                                | 0.938                | 0.924           |
| Sección 19                                                | 0.958                | 0.944           |
| Sección 20                                                | 0.967                | 0.95            |
| Sección 21                                                | 0.943                | 0.929           |
| Sección 22                                                | 0.965                | 0.953           |
| Sección 23                                                | 0.981                | 0.965           |
| <b>Average</b>                                            | <b>0.99</b>          | <b>0.97</b>     |

*Nota:* Tabla de elaboración propia (2024)

Con la gráfica generada con la entrada de valores de factor de seguridad por sección (Figura 71) se puede observar que la sección más crítica para el método Spencer es la sección 17 la cual tiene como valor 0.93 esto se encuentra por debajo del mínimo considerado para la etapa de cierre ( $FS > 1$ ) sin embargo según los resultados de otras secciones se tienen un valor promedio de  $0.99 \approx 1.0$  el cual es considerado como **estable** para la etapa de operación y cierre. Esto se puede corroborar con el estudio de factibilidad que realizó la empresa Anddes para el estudio de ampliación del tajo hacia el lado chileno en el 2018 donde se muestran los factores de seguridad iguales y mayores a 1.

**Figura 71**

Factores de seguridad pseudoestático por sección – Método Spencer Bidimensional

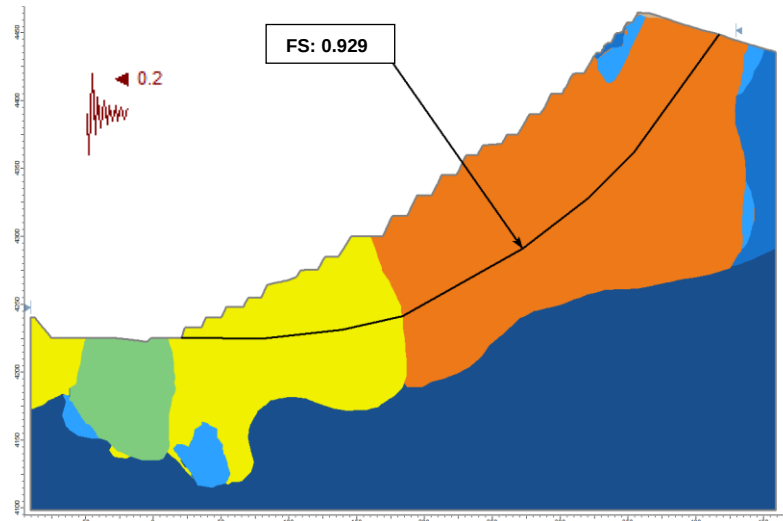


Nota: Figura de elaboración propia (2024)

En la figura 72 se puede observar la sección más crítica para el método Spencer para un valor de coeficiente sísmico de 0.2.

**Figura 72**

Sección crítica caso pseudoestático - Método Spencer Bidimensional



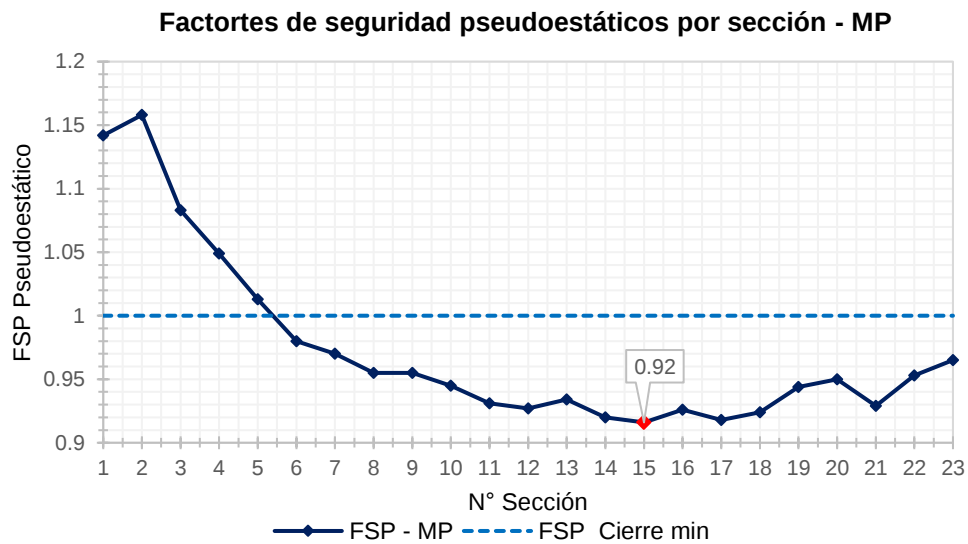
Nota: Figura de elaboración propia (2024)

Con la gráfica generada con la entrada de valores de factor de seguridad por sección (Figura 73) se puede observar que la sección más crítica para el método de Morgenstern Price es la sección 15 el cual tiene como valor 0.92 esto se encuentra por debajo del mínimo considerado para la etapa de cierre ( $FS > 1$ ) sin embargo según los resultados de otras secciones se tienen un valor promedio de  $0.97 \approx 1.0$  el cual es considerado como **estable** para la etapa

de operación y cierre. Esto se puede corroborar con el estudio de factibilidad que realizó la empresa Anddes para el estudio de ampliación del tajo hacia el lado chileno en el 2018 donde se muestran los factores de seguridad iguales y mayores a 1.

**Figura 73**

*Factores de seguridad pseudoestático por sección – Método Spencer M.P.*

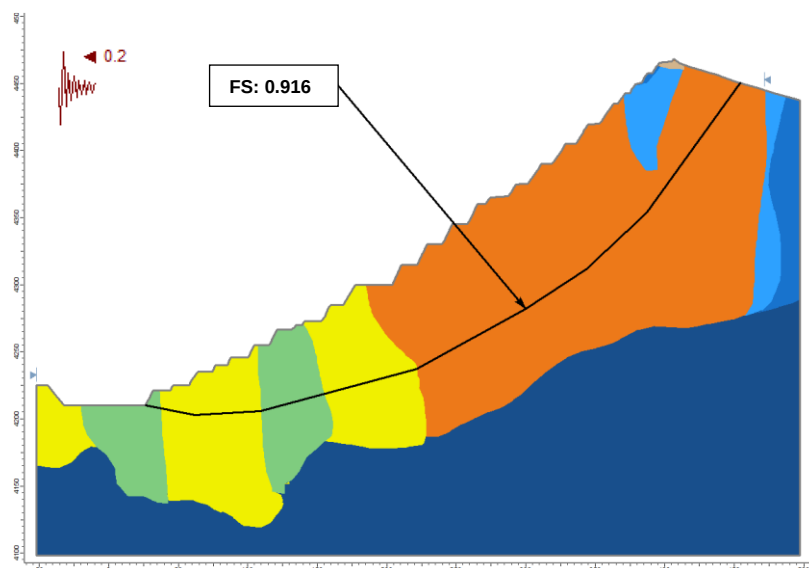


*Nota:* Figura de elaboración propia (2024)

En la figura 74 se puede observar la sección más crítica para el método Spencer para un valor de coeficiente sísmico de 0.2.

**Figura 74**

*Sección crítica caso pseudoestático - Método Morgenstern Price Bidimensional*



*Nota:* Figura de elaboración propia (2024).

El análisis de estabilidad pseudoestática para ambos métodos arrojaron valores de factores de seguridad que varían desde 0.916 a 1.165 en todas las secciones analizadas, dependiendo de la sección escogida por el evaluador podremos concluir si es estable o no, el presente estudio consideró el sector este del tajo Checocollo como **estable** para el caso pseudoestático ya que las diferencias no son muy significativas al valor de 1 mínimo requerido. Esta conclusión se puede corroborar con los estudios de estabilidad física que realizaron otras empresas especializadas donde un análisis probabilístico arroja valores de factor de seguridad iguales o superiores a 1.0 reafirmando su estabilidad.

#### 4.1.3. Análisis comparativo

Para poder correlacionar el análisis de estabilidad tridimensional y bidimensional se optó por realizar una regresión no lineal tomando como datos 15 resultados de factores de seguridad 2D y 3D. La función que más se ajustó según los datos ingresados fue la función potencial, esto se puede verificar viendo los valores de R, cuyo valor sabemos se debe estar cercano a 1.

##### 4.1.3.1. Caso condición estático

En el caso pseudoestático se evaluó por el método de Spencer y Morgenstern Price, los resultados de factores de seguridad bidimensional y tridimensional se muestran en la tabla 18.

**Tabla 18**

Factores de seguridad bidimensionales y tridimensionales estáticos.

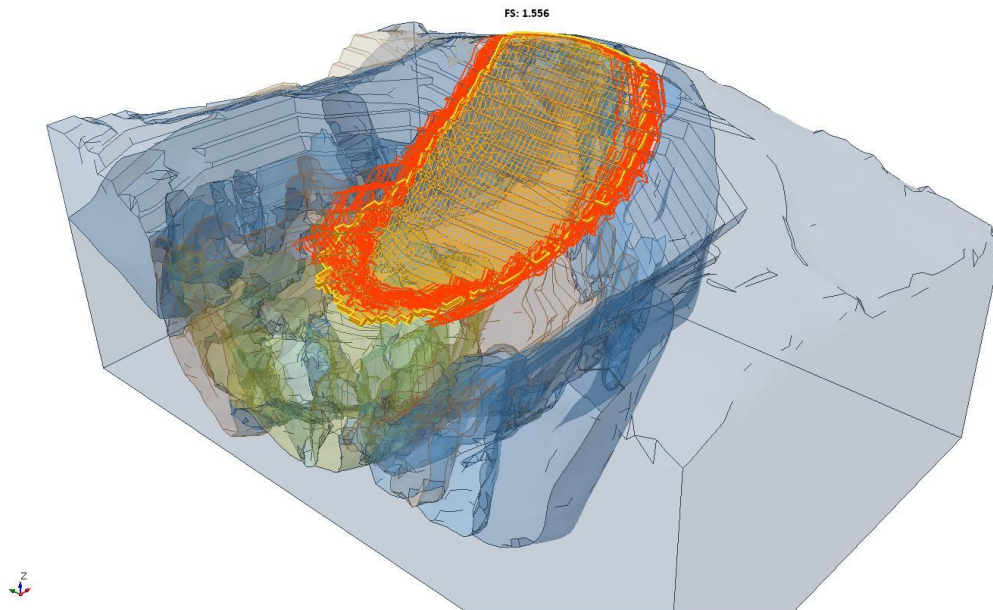
| Caso Estático |       |          |       |
|---------------|-------|----------|-------|
| FSE - Spencer |       | FSE - MP |       |
| 2D            | 3D    | 2D       | 3D    |
| 1.291         | 1.556 | 1.273    | 1.552 |
| 1.304         | 1.598 | 1.283    | 1.582 |
| 1.306         | 1.612 | 1.288    | 1.595 |
| 1.310         | 1.619 | 1.296    | 1.601 |
| 1.317         | 1.624 | 1.299    | 1.607 |
| 1.319         | 1.631 | 1.303    | 1.615 |
| 1.329         | 1.636 | 1.309    | 1.621 |
| 1.337         | 1.643 | 1.318    | 1.627 |
| 1.339         | 1.654 | 1.320    | 1.633 |
| 1.349         | 1.667 | 1.327    | 1.638 |
| 1.355         | 1.677 | 1.336    | 1.647 |
| 1.356         | 1.687 | 1.339    | 1.657 |
| 1.358         | 1.704 | 1.353    | 1.671 |
| 1.390         | 1.721 | 1.382    | 1.691 |
| 1.410         | 1.733 | 1.389    | 1.713 |

Nota: Elaboración propia (2024)

En la figura 75 y 76 se puede observar el resultado de los factores de seguridad tridimensional tomados como dato, las líneas rojas representan superficies de falla encontradas usando el método de análisis de Spencer y Morgenstern price. Para el caso bidimensional se tomó en cuenta los valores de factores de seguridad de la tabla 16.

**Figura 75**

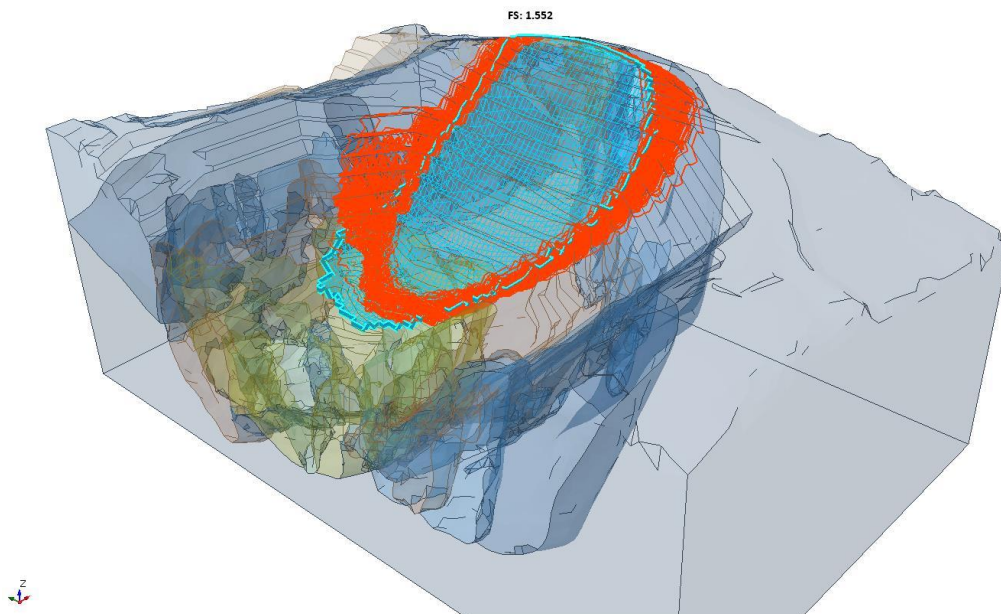
Superficies de falla tridimensionales - Método de Spencer.



Nota: Elaboración propia (2024)

**Figura 76**

Superficies de falla tridimensionales - Método de Morgenstern Price

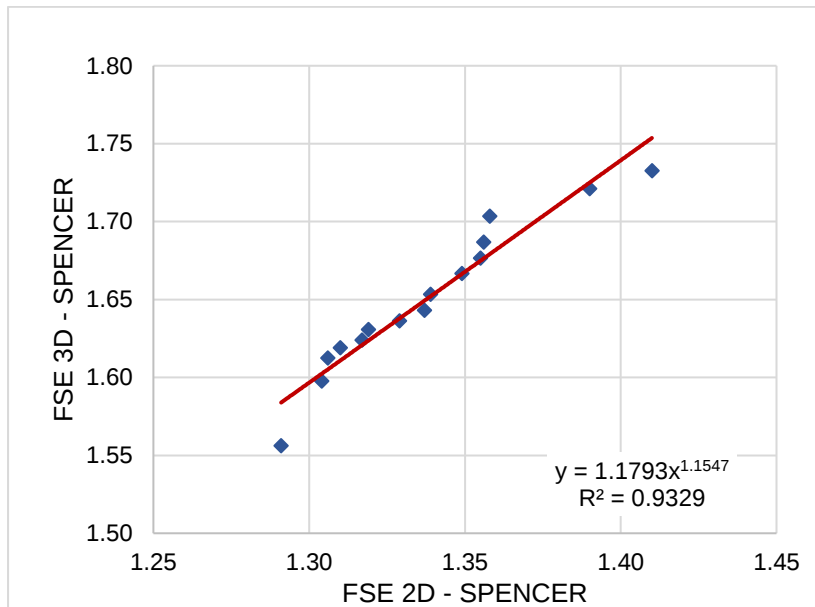


Nota. Elaboración propia (2024)

Con los datos de factores de seguridad bidimensionales y tridimensionales del método de Spencer y Morgenstern Price estático se generó el grafico dispersión de puntos, el cual se fue ajustando, verificando el valor de R, la ecuación en este caso fue la regresión potencial. Estos resultados podrán ayudar a estimar de manera aproximada factores de seguridad tridimensionales a partir de factores bidimensionales para el caso estático del método de Spencer Morgenstern Price. En la figura 77 y 78 se ve el resultado del análisis.

**Figura 77**

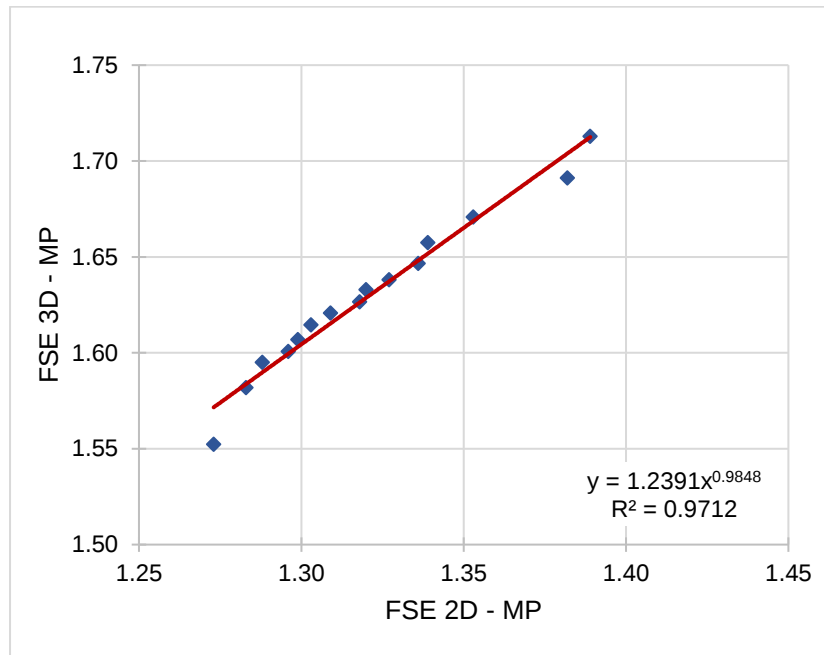
Regresión potencial FS 2D y 3D – Estático, método de Spencer.



Nota. Elaboración propia (2024)

**Figura 78**

Regresión potencial FS 2D y 3D – Estático, método de Morgenstern Price



Nota. Elaboración propia (2024)

#### 4.1.3.2. Caso condición pseudoestática

En la tabla 19 se presenta los factores de seguridad bidimensionales y tridimensionales que usaran para poder correlacionar los métodos analizados.

**Tabla 19**

Factores de seguridad bidimensionales y tridimensionales pseudoestáticos.

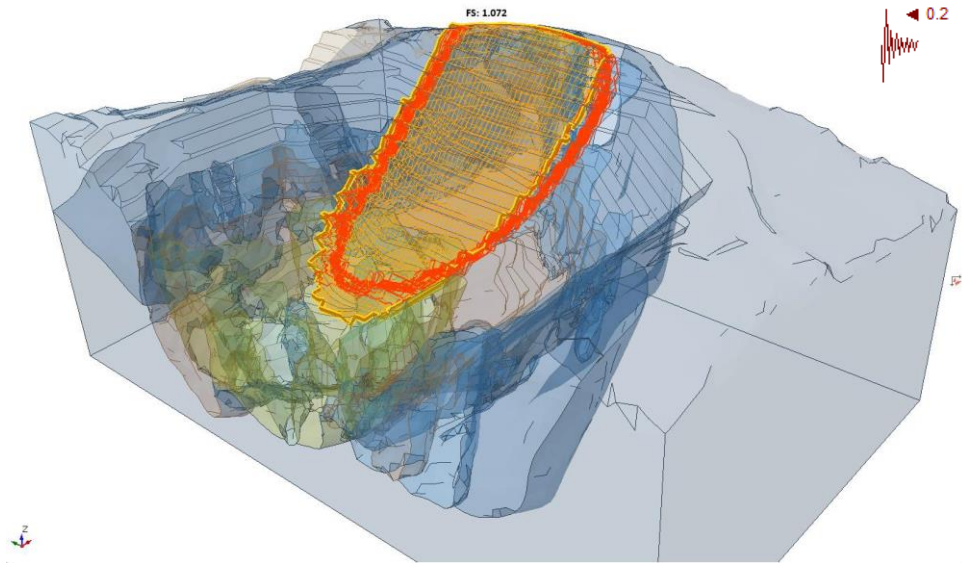
| Caso Pseudoestático |       |          |       |
|---------------------|-------|----------|-------|
| FSP - Spencer       |       | FSP - MP |       |
| 2D                  | 3D    | 2D       | 3D    |
| 0.929               | 1.072 | 0.916    | 1.050 |
| 0.931               | 1.082 | 0.918    | 1.059 |
| 0.934               | 1.098 | 0.920    | 1.066 |
| 0.938               | 1.105 | 0.924    | 1.069 |
| 0.943               | 1.114 | 0.926    | 1.073 |
| 0.943               | 1.120 | 0.927    | 1.078 |
| 0.944               | 1.127 | 0.929    | 1.081 |
| 0.947               | 1.133 | 0.931    | 1.087 |
| 0.948               | 1.140 | 0.934    | 1.091 |
| 0.958               | 1.145 | 0.944    | 1.096 |
| 0.962               | 1.151 | 0.945    | 1.100 |
| 0.965               | 1.155 | 0.950    | 1.106 |
| 0.967               | 1.160 | 0.953    | 1.111 |
| 0.968               | 1.165 | 0.955    | 1.116 |
| 0.972               | 1.169 | 0.955    | 1.120 |

Nota. Elaboración propia (2024)

En la figura 79 y 80 se presenta las superficies de falla pseudoestáticas generadas por el programa Slide3 para el método de Spencer y Morgenstern Price, estos valores de factores de seguridad son presentados en la tabla 19, para el caso bidimensional se toman los descritos en la tabla 17.

**Figura 79**

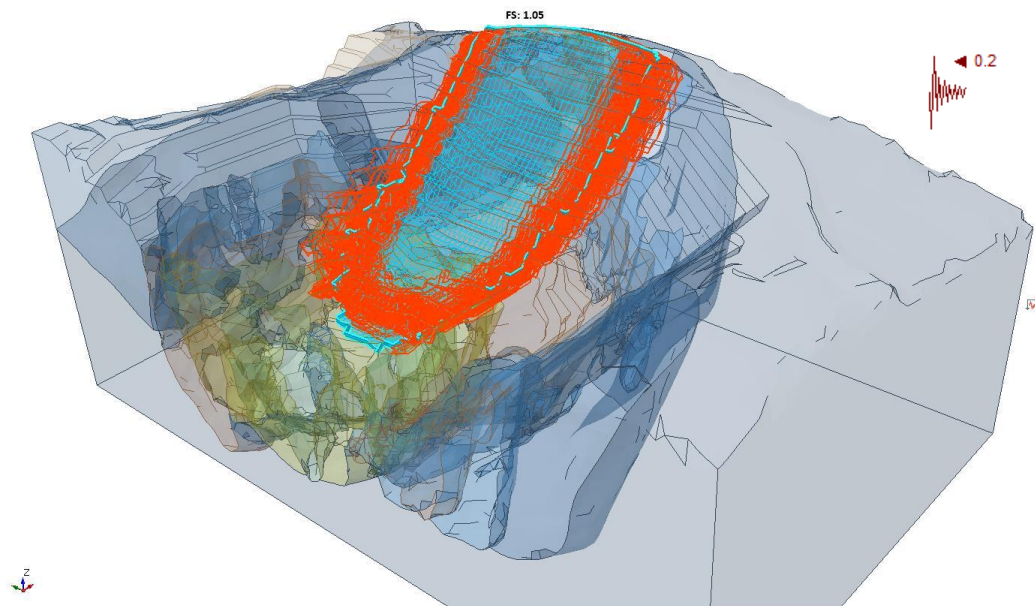
Superficies de falla tridimensionales - Método de Spencer Pseudoestático



Nota. Elaboración propia (2024)

**Figura 80**

Superficies de falla tridimensionales - Método de Morgenstern Price pseudoestático

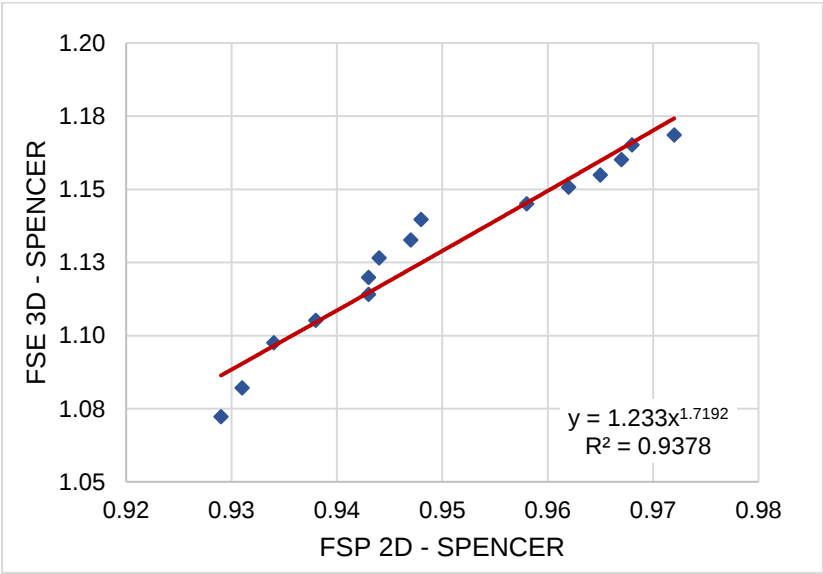


Nota. Elaboración propia (2024)

Para cada caso se realizó el ajuste por regresión potencial para poder obtener una ecuación única el cual pueda ayudarnos a correlacionar factores de seguridad bidimensionales con los tridimensionales. En la figura 80 y 81 se pueda observar las gráficas generadas y los valores R de ajuste correspondientes.

**Figura 81**

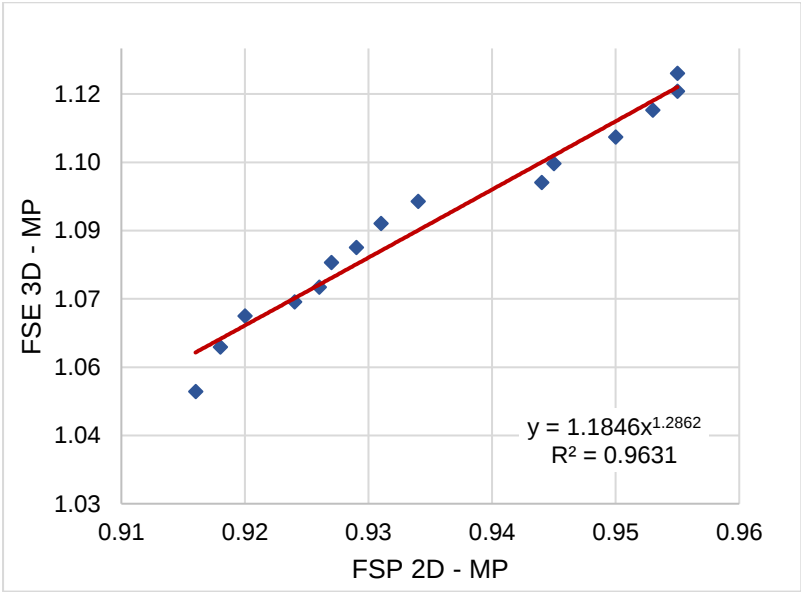
Regresión potencial FS 2D y 3D – pseudoestático, método de Spencer.



Nota. Elaboración propia (2024)

**Figura 82**

Regresión potencial FS 2D y 3D – pseudoestático, método de Morgenstern Price



Nota. Elaboración propia (2024)

#### 4.1.3.3. Propuesta de optimización de talud

La mayoría de las veces, el ancho mínimo o de diseño del banco se basa en la experiencia operativa; por ejemplo, para alturas de banco de 15 m, rara vez es menor a 7 m. En algunas localidades (por ejemplo, Columbia Británica, Canadá), se codifica junto con la altura del banco en relación con la capacidad del equipo de excavación y perforación. Al considerar la caída de rocas, muchos profesionales en América del Norte y del Sur utilizan el criterio Ritchie modificado desarrollado por Call & Nicholas Inc. como guía. El criterio original fue publicado por Ritchie (1963) se limitó a un pequeño número de geometrías y, por lo tanto, requirió una extrapolación a geometrías de minas típicas. La relación empírica desarrollada por Call & Nicholas Inc. define el ancho de banco de captura preferido (Ryan & Pryor, 2000):

$$\text{Ancho de Banco (m)} = 0.2 \times \text{Altura de banco} + 4.5 \text{ m}$$

Para el caso de estudio y recomendar un ancho de banqueta que pueda aprovechar los valores de factores de seguridad obtenidos por el método de equilibrio limitante tridimensional y optimizar los parámetros de diseño nos basaremos en función a los 15 metros operativos considerados en la mina Pucamarca, esto debido a la capacidad del equipo de perforación y equipos de excavación. Según este detalle el ancho de banco sería

$$\text{Ancho de Banco (m)} = 0.2 \times \text{Altura de banco} + 4.5 \text{ m}$$

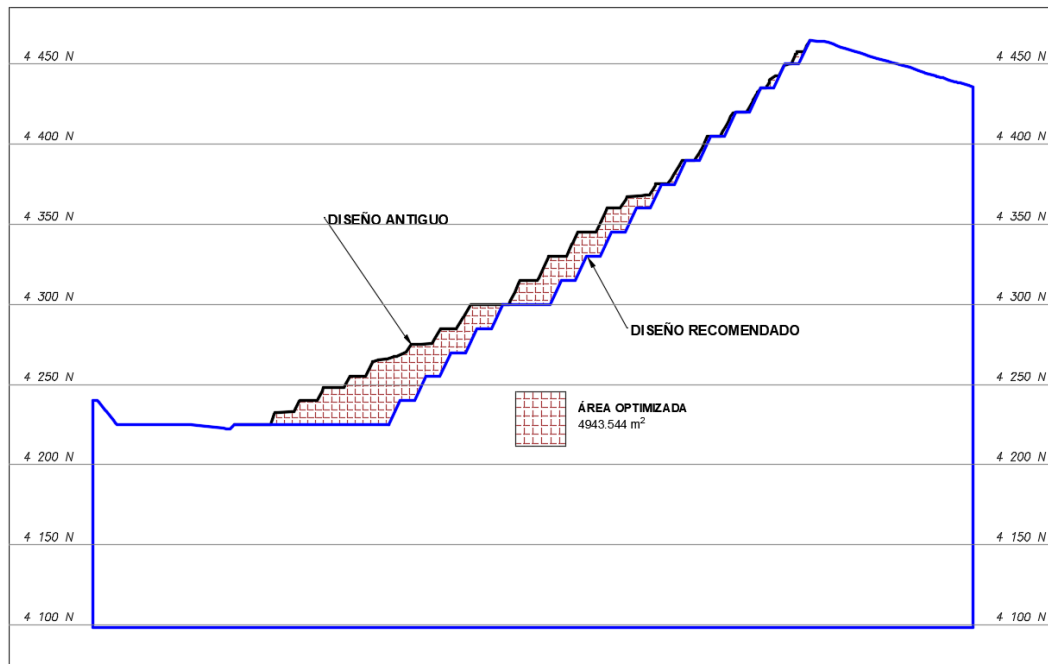
$$\text{Ancho de Banco (m)} = 0.2 \times 15 \text{ m} + 4.5 \text{ m}$$

$$\text{Ancho de Banco (m)} = 7.5$$

Según el diseño actual el ancho de banco considerado es de 11 m y según el cálculo realizado ancho de banco mínimo requerido es de 7.5 metros. Por lo tanto, tomando una decisión conservadora se optó por recomendar modificar los anchos de banco a 8.5 metros, teniendo así una optimización del talud como se muestra en la figura 83, la sección representa al perfil más crítico obtenido por el método de análisis bidimensional en el cual se puede observar que el área ganada representa 4943.544 m<sup>2</sup>.

**Figura 83**

Talud optimizado en sección más crítica

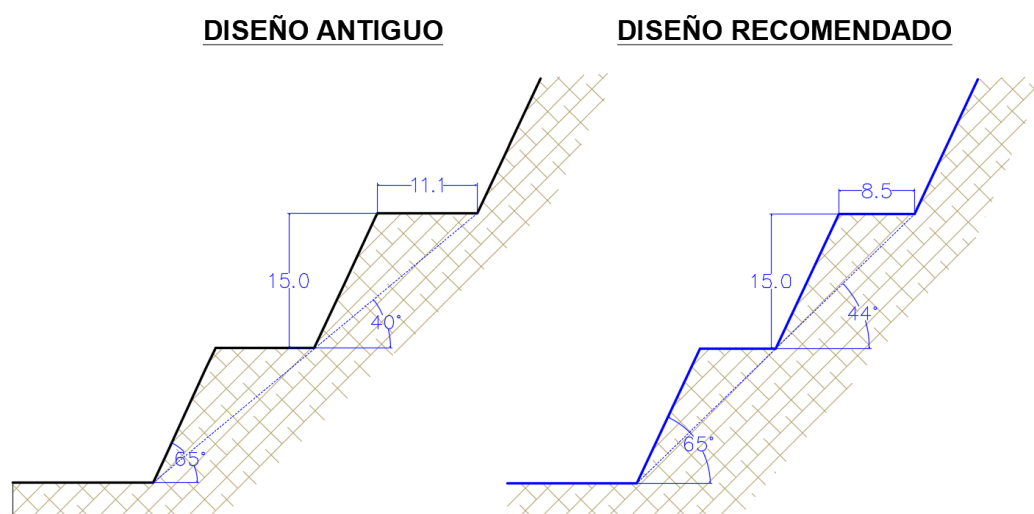


*Nota.* Elaboración propia (2024)

Esta nueva configuración les debe a que los parámetros a nivel de banco finales serian como los que se muestran en la figura 84, en esta podemos ver que la modificación de ancho de banquetas ayuda también a modificar el ángulo interrampa el cual en el diseño antigua es de 40° y en el recomendado se optimiza a 44° haciendo que se gane más ancho de minado.

**Figura 84**

Parámetros nivel de banco optimizados



*Nota.* Elaboración propia (2024)

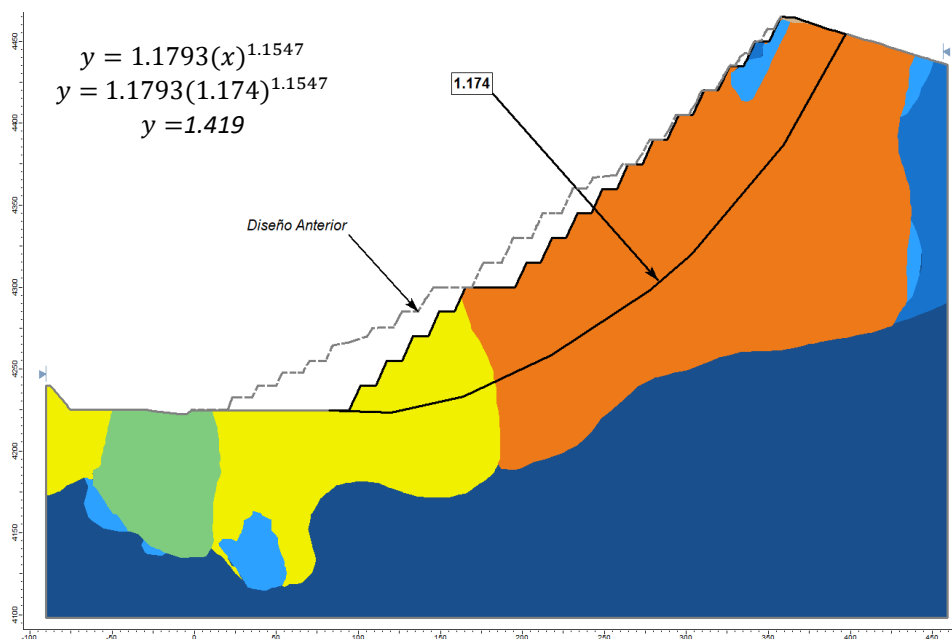
Para la sección crítica analizada, se optó por realizar un análisis de estabilidad bidimensional con la finalidad de obtener los factores de seguridad con la configuración recomendada. Debido al cambio en los parámetros se esperó tener factores de seguridad por debajo del mínimo requerido, sin embargo, se utilizó estos valores para poder correlacionarlos con los factores de seguridad tridimensionales a partir de las ecuaciones obtenidas en el capítulo de análisis comparativo.

Para el caso del factor de seguridad estático por el método de Spencer el valor obtenido fue de 1.174, este valor es inferior al valor mínimo requerido en el diseño por ello se procedió a correlacionarlo haciendo uso de la ecuación mostrada en la figura teniendo así un resultado de 1.419 como factor tridimensional siendo este valor ya estable para la operación del tajo.

Se procedido de la misma manera para el método de Spencer y Morgenstern Price en el caso estático y pseudoestático, los resultados se pueden describir en las figuras 85 – 88.

**Figura 85**

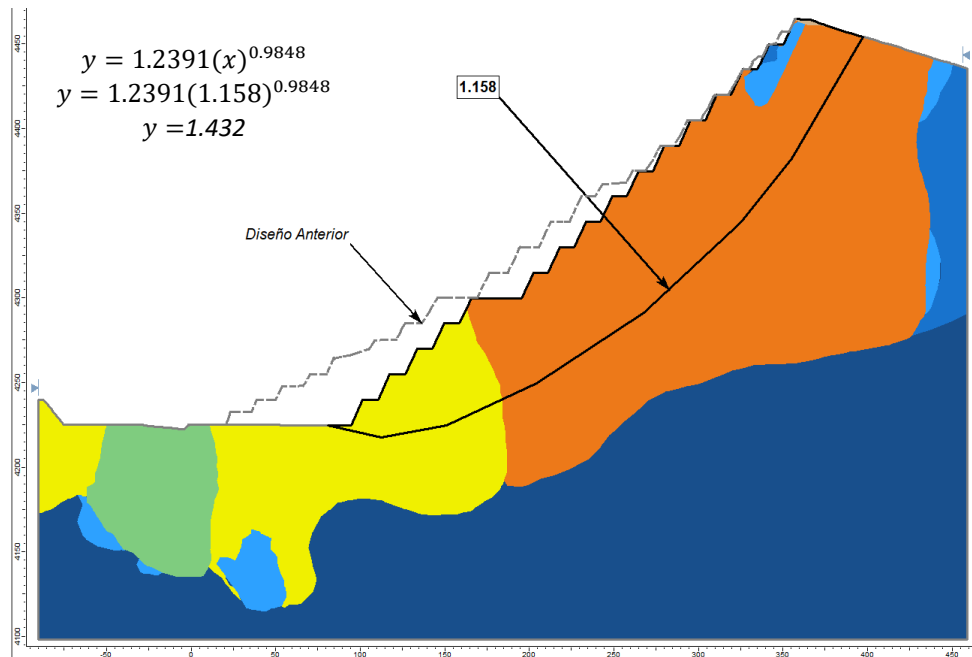
Análisis bidimensional de talud optimizado – método de Spencer estático



**Nota:** Este valor de factor de seguridad bidimensional correlacionando con el tridimensional haciendo uso de la ecuación de la figura 77 da como valores 1.419 siendo estable para la operación.

**Figura 86**

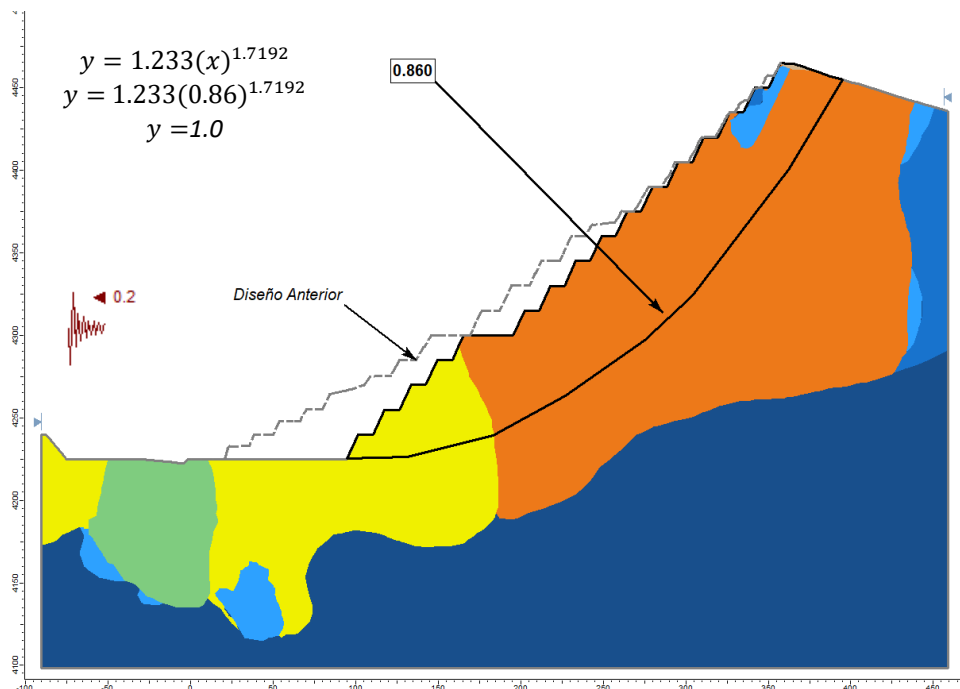
Análisis bidimensional de talud optimizado – método de MP, estático



*Nota:* Este valor de factor de seguridad bidimensional correlacionando con el tridimensional haciendo uso de la ecuación de la figura 78 da como valores 1.432 siendo estable para la operación.

**Figura 87**

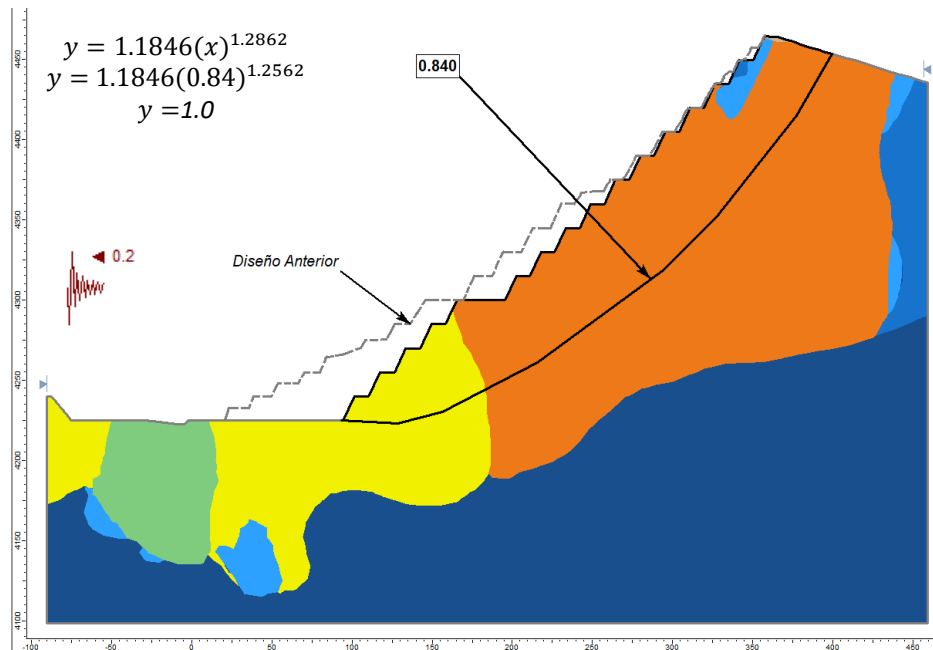
Análisis bidimensional de talud optimizado – método de Spencer pseudoestático



*Nota:* Este valor de factor de seguridad bidimensional correlacionando con el tridimensional haciendo uso de la ecuación de la figura 81 da como valores 1.0 siendo estable para la operación.

**Figura 88**

Análisis bidimensional de talud optimizado – método de método de M.P pseudoestático



*Nota:* Este valor de factor de seguridad bidimensional correlacionando con el tridimensional haciendo uso de la ecuación de la figura 82 da como valores 1.0 siendo estable para la operación.

#### 4.1.4. Discusión de resultados

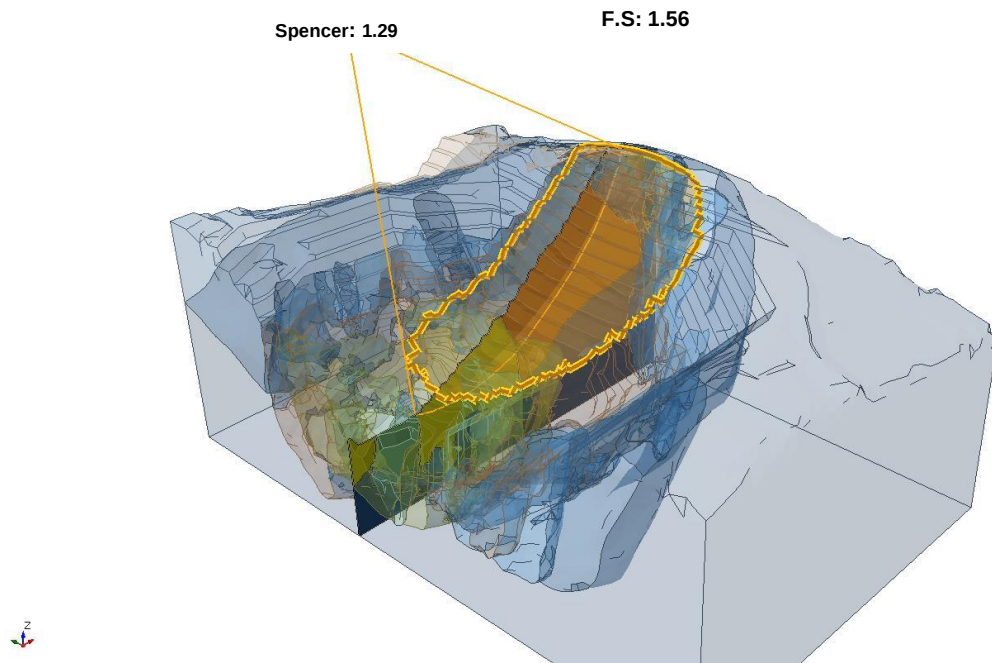
Los valores obtenidos en la sección anterior nos permiten tener una idea más clara de los resultados que se tiene al realizar el análisis de estabilidad con el método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional para el sector Este del Tajo Checocollo. Antes de realizar la discusión del análisis comparativo se debe tener en cuenta que los métodos de equilibrio límite tridimensionales existentes se dedujeron a partir de métodos bidimensionales para ello se convirtieron los cortes en 2D a secciones columnadas agregando una tercera dimensión como lo indica Kalatehjari & Ali (2013), también se puede mencionar que el factor de seguridad se calcula en base a la generación una superficie tridimensional que tiene volumen. Por otro lado, el método de análisis bidimensional nos puede ayudar a generar una sección de falla la cual se puede considerar representativa al problema para taludes continuos y homogéneos seleccionando el método de análisis más adecuado como lo determinaron Sengani y Allopi (2022), sin embargo, en muchos casos el método bidimensional no representa la verdadera naturaleza del talud conduciendo resultados poco realistas, en estos casos se requiere de un análisis 3D que representa mejor el modelo esto también fue determinado por Wines (2016) en su estudio de comparación de análisis de estabilidad de taludes en dos y tres dimensiones basando en revisiones bibliográficas de diversas minas en el mundo.

#### 4.1.4.1. Caso condición Estático

De los resultados obtenidos se puede observar en la figura 89 que el valor del factor de seguridad tridimensional por método de equilibrio límite de Spencer es de 1.56 para el caso estático siendo superior al valor del factor de seguridad bidimensional de la sección más crítica el cual tiene un valor de 1.29. Por otro lado, en la figura 90 se puede observar que el valor del factor de seguridad tridimensional por método de equilibrio límite de Morgenstern Price para el caso estático es de 1.55 siendo superior al valor del factor de seguridad bidimensional el cual tiene un valor de 1.27. Estos resultados indican que los valores de factores estáticos 3D para el método de Spencer y Morgenstern Price son 17% a 18% mayores a los factores 2D esto se puede deber a la ausencia de nivel freático, Shamsoddin Saeed et al. (2015) en su estudio de la mina Miduk indica que las diferencias de los factores de seguridad entre ambos son mayores cuando el nivel freático es bajo en comparación a aquellos de nivel freático alto, en su estudio determinó que la diferencia entre ambas es menos de 7% para zonas de nivel freático más profundos.

**Figura 89**

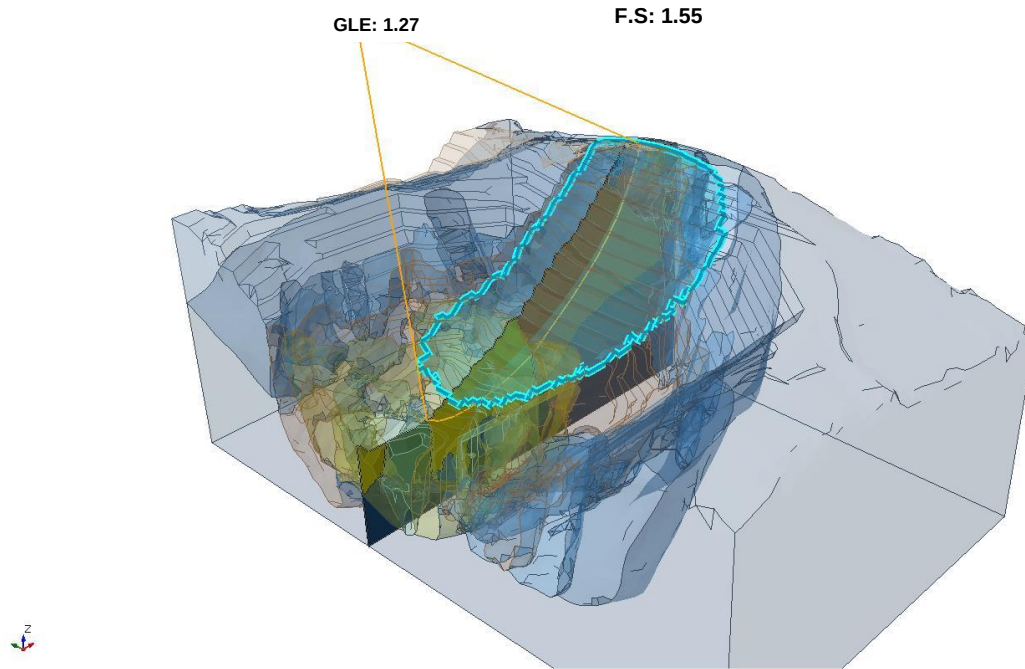
*Resultado de factor de seguridad tridimensional y bidimensional estático – Spencer*



*Nota:* En ambos se tiene una condición **estable** siendo los resultados bidimensionales más conservadores. (2024).

**Figura 90**

*Factor de seguridad tridimensional y bidimensional estático – Morgenstern Price*



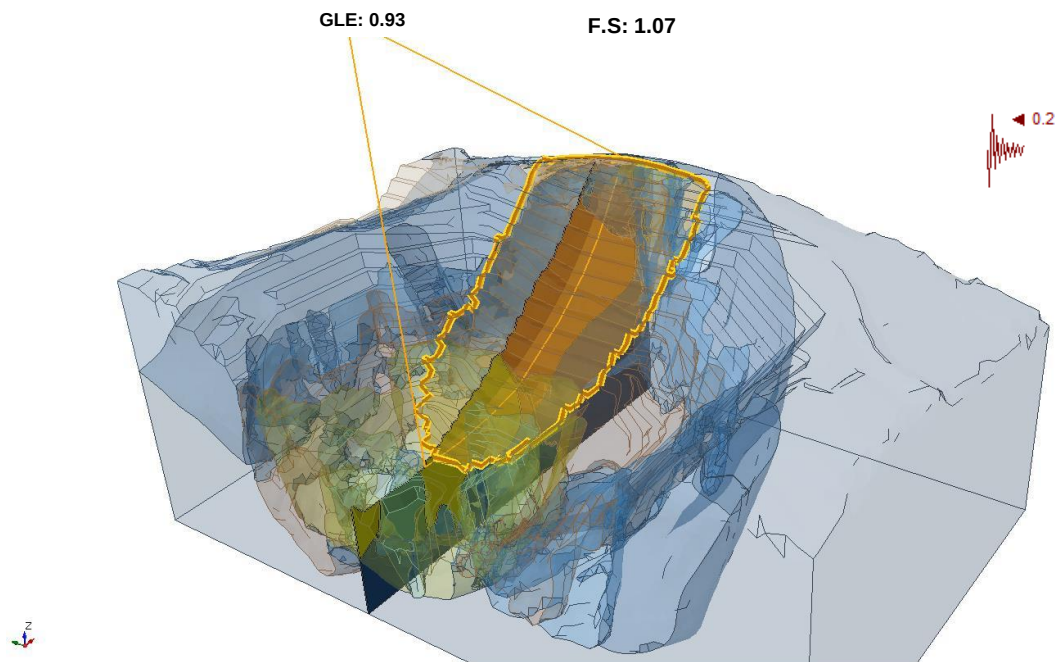
*Nota:* En ambos se tiene una condición **estable** siendo los resultados bidimensionales más conservadores. (2024).

#### **4.1.4.2. Caso condición pseudoestático**

De los resultados se puede observar en la figura 91 que el valor del factor de seguridad tridimensional por método de equilibrio límite Spencer es de 1.07 para el caso pseudoestático siendo superior al valor del factor de seguridad bidimensional de la sección más crítica el cual tiene un valor de 0.93. Por otro lado, en la figura 92 se puede observar que el valor del factor de seguridad tridimensional por método de equilibrio límite de Morgenstern Price para el caso estático es de 1.05 siendo superior al valor del factor de seguridad bidimensional el cual tiene un valor de 0.92. Los resultados indican que los factores 3D por el método de Spencer y Morgenstern Price son 13 % a 12% mayores a los bidimensionales. Según Arellano y Stark (2000), el valor de la relación del factor de seguridad 3D/2D aumenta al disminuir la relación de W/H, para nuestro estudio se pudo demostrar que al optimizar al ancho de banco la relación entre ambos factores 3D/2D aumenta.

**Figura 91**

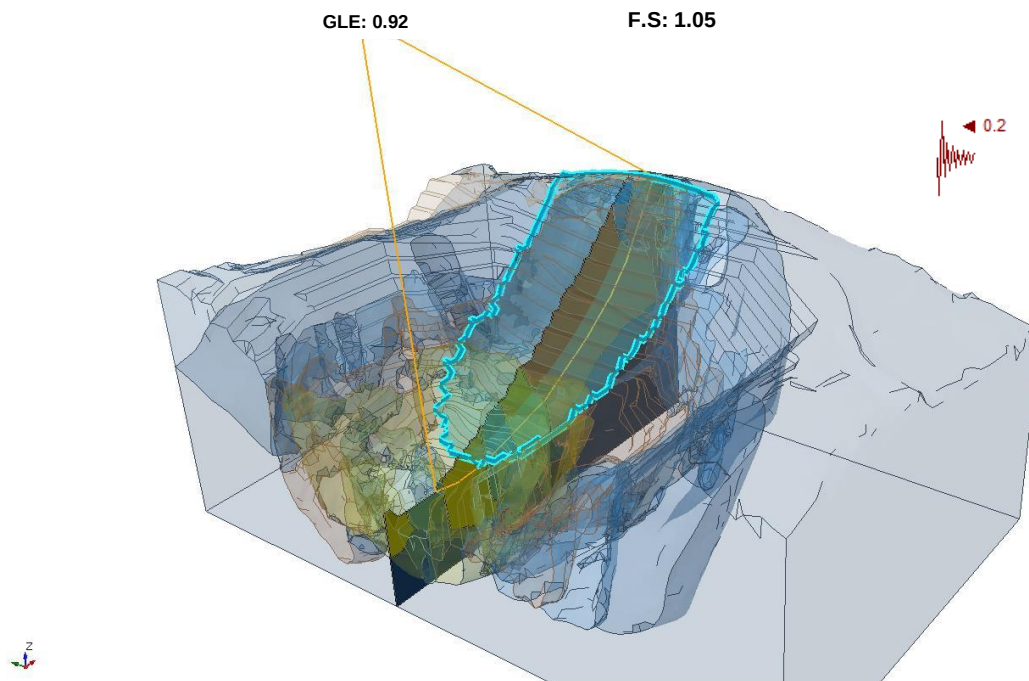
*Resultado de factor de seguridad tridimensional y bidimensional pseudoestático – Spencer*



*Nota:* En ambos se tiene una condición **estable** siendo los resultados bidimensionales más conservadores. (2024).

**Figura 92**

*Resultado de factor de seguridad tridimensional y bidimensional pseudoestático – M.P*



*Nota:* En ambos se tiene una condición **estable** siendo los resultados bidimensionales más conservadores. (2024).

**Tabla 20***Resultados de factores de seguridad tridimensionales y bidimensionales*

| <b>Método de equilibrio límite</b> | <b>Condición de análisis</b> | <b>Método de Spencer</b> | <b>Condición</b> | <b>Método de M P</b> | <b>Condición</b> |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------|----------------------|------------------|
| <b>Tridimensional</b>              | Estático                     | 1.56                     | Estable          | 1.55                 | Estable          |
|                                    | Pseudoestático               | 1.07                     | Estable          | 1.05                 | Estable          |
| <b>Bidimensional</b>               | Estático                     | 1.29                     | Estable          | 1.27                 | Estable          |
|                                    | Pseudoestático               | *0.99                    | Estable          | *0.97                | Estable          |

*Nota:* De la tabla se puede observar que todos lo F.S. tridimensionales con superiores. (\*) representan valores promedios. Fuente: Elaboración propia (2024).

Después de realizar el estudio de estabilidad tridimensional se puede afirmar que generalmente se implementan métodos bidimensionales de análisis de estabilidad de taludes por su sencillez y rapidez como indica Kalatehjari & Ali (2013), sin embargo, en un análisis de estabilidad bidimensional cuando se presentan geometrías complejas dificulta la selección de una sección típica de análisis por ello es necesario el uso de un método tridimensional, esto también fue determinado por Chakraborty y Goswami (2016). También podemos mencionar que el factor de seguridad tridimensional es superior al bidimensional debido al efecto de la geometría, los cuales son factores que influyen directamente en el resultado, por ejemplo en nuestro caso se tiene un talud con un ligero giro convexo el cual ayuda a mejorar el valor de factor de seguridad tridimensional, esto también fue determinado por Zhang et al. (2013), quien indica que en las esquinas de taludes que tienen un giro convexo el efecto actúa como una restricción para posibles desplazamientos aumentando el factor de seguridad en un 7.5% en taludes suaves y 7% en taludes pronunciados. Por otro lado, Leong y Rahardjo (2012) determino también que la diferencia entre el factor 2D y 3D es menos del 10%, sin embargo, esto varía de acuerdo al nivel freático, en nuestro caso la condición seca aumenta las diferencias entre ambos factores. En ambos casos se puede observar que para el caso 2D y 3D las diferencias entre los valores por el método de Spencer y Morgenstern Price no son muy distantes, según Sengani y Allopi (2022), ambos brindan soluciones similares por lo cual concluye que no requeriré su uso simultaneo.

#### 4.1.5. Prueba de hipótesis

##### 4.1.5.1. Hipótesis específica 01

**H0:** El método de equilibrio limite tridimensional optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad **estática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.

**H1:** El método de equilibrio limite tridimensional no optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad **estática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.

#### Prueba t de Student para Medias de los factores de seguridad tridimensionales y bidimensionales en condición estática

Se hizo uso de la prueba T student para realizar la validación de la hipótesis debido a que el número de muestras está por debajo de 30, para esto se toma en cuenta los valores de factor de diseño tridimensional y bidimensional obtenidos en cada sección. Para realizar prueba se hizo uso del programa MiniTab.

**Tabla 21**

*Prueba t de Student para Medias de los factores de seguridad estáticos*

| Método de análisis          | Media FSE<br>Tridimensional | Media FSE<br>Bidimensional | T-<br>Valor | P - Valor | Conclusión      |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------|-----------|-----------------|
| Método Spencer              | 1.56                        | 1.42                       | -5.43       | 1         | Se acepta la H0 |
| Método Morgenstern<br>Price | 1.55                        | 1.4                        | -5.52       | 1         | Se acepta la H0 |

*Nota:* Para ambos casos de acepta H0. Fuente: elaboración propia (2024).

##### 4.1.5.2. Hipótesis específica 02

**H0:** El método de equilibrio limite tridimensional optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad **pseudoestática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.

**H1:** El método de equilibrio limite tridimensional no optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad **pseudoestática** de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.

#### Prueba t de Student para Medias de los factores de seguridad tridimensionales y bidimensionales en condición pseudoestática

Se hizo uso de la prueba T student para realizar la validación de la hipótesis debido a que el número de muestras está por debajo de 30, para esto se toma en cuenta los valores de factor de diseño tridimensional y bidimensional obtenidos en cada sección. Para realizar prueba se hizo uso del programa MiniTab.

**Tabla 22**

*Prueba t de Student para Medias de los factores de seguridad pseudoestáticos*

| <b>Método de análisis</b>           | <b>Media FSP<br/>Tridimensional</b> | <b>Media FSP<br/>Bidimensional</b> | <b>T-<br/>Valor</b> | <b>P - Valor</b> | <b>Conclusión</b> |
|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>Método Spencer</b>               | 1.07                                | 0.9                                | -5.35               | 1                | Se acepta la H0   |
| <b>Método<br/>Morgenstern Price</b> | 1.05                                | 0.98                               | -4.91               | 1                | Se acepta la H0   |

*Nota:* Para ambos casos de acepta H0. Fuente: elaboración propia (2024).

## 5. CONCLUSIONES

1. Los resultados del análisis de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite tridimensional son mayores a los métodos bidimensionales para el caso estático y pseudoestático, en ambos casos se obtuvieron diferencias de 17 -18% y 13- 12% respectivamente para el método de Spencer y Morgenstern Price, esto se justifica debido al efecto de la geometría del talud tridimensional y a la ausencia de nivel freático que aumenta la diferencia entre ambos métodos.
2. Con los resultados obtenidos se concluye que el talud del lado Este del Tajo Checocollo es **estable** para un análisis **estático**. Se concluye que el análisis de estabilidad tridimensional optimiza los valores de los factores de seguridad, en los resultados se obtuvieron valores de 1.56 para el método de Spencer y 1.55 para el método de Morgenstern Price, para ambos casos los valores fueron superiores a los valores de factor de seguridad bidimensional los cuales, en las secciones críticas, tienen un valor de 1.29 y 1.27 respectivamente para cada método mencionado. También se hizo la comparación con la media de todas las secciones bidimensionales analizadas cuyos valores fueron 1.42 y 1.4, estos valores tampoco superaron los valores de los factores de seguridad tridimensionales.
3. Con los resultados obtenidos se concluye que el talud del lado Este del Tajo Checocollo es **estable** para un análisis **pseudoestático**, también se concluye el análisis de estabilidad tridimensional optimiza los valores de los factores de seguridad, en los resultados se obtuvieron valores de 1.07 para el método de Spencer y 1.05 para el método de Morgenstern Price, para ambos casos los valores fueron superiores a los valores de factor de seguridad bidimensional los cuales ,en las secciones críticas, tienen un valor de 0.93 y 0.92 respectivamente para cada método mencionado. También se hizo la comparación con la media de todas las secciones bidimensionales analizadas cuyos valores fueron 0.99 y 0.97, estos valores tampoco superaron los valores de los factores de seguridad tridimensionales.
4. En base a los resultados de los factores bidimensionales y tridimensionales se realizó una correlación potencial para obtener ecuaciones que puedan ayudar a determinar valores de factor de seguridad tridimensionales a partir de los bidimensionales, para comprobar ello se realizó la propuesta de optimización del ancho de banqueta de los taludes del sector Este del Tajo, esto valores se variaron de 11 a 8. 5 metros, el resultado de análisis estabilidad bidimensional fue menos de lo requerido por ello al utilizar las ecuaciones de correlación de obtuvieron que estos factores de seguridad son estables si se realiza un análisis tridimensional.

5. La mejora de los factores de seguridad en los análisis tridimensionales se debe a que se consideran más factores geométricos que ayudan a simular adecuadamente el problema del talud minero. Este modelado tridimensional constituye una desventaja en la actualidad ya que requiere de conocimientos avanzados de herramientas informáticas que hacen ese trabajo. También la duración de la simulación es un tiempo más prolongado respecto al análisis bidimensional y requiere de equipos de cómputo de alta capacidad.

## 6. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar el estudio comparativo del análisis de estabilidad de taludes tridimensional y bidimensional para el caso **estático** en otras condiciones geológicas-geotecnias como es el caso del estudio de taludes mineros en presas de relave, botaderos y pads de lixiviación, también se recomienda usar otros métodos de análisis diferentes al método de equilibrio límite como los métodos numéricos.
2. Se recomienda desarrollar el estudio comparativo del análisis tridimensional y bidimensional para el caso **pseudoestático** considerando la variación de los coeficientes sísmicos, también considerar el uso de otros softwares del mercado que hacen uso del método de equilibrio limite y métodos numéricos en dos y tres dimensiones.
3. Se recomienda elaborar más estudios de este tipo que consideren la cantidad de recursos minerales explotables que se pueda ganar al realizar un nuevo diseño teniendo en cuenta el costo y el beneficio, que ocasiona la mejora de los factores de seguridad del análisis tridimensional. Esto podría ir acompañado del estudio del beneficio económico en tema de recursos que podría ganar una mina a cielo abierto.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abusharar, S. W., & Han, J. (2011). Two-dimensional deep-seated slope stability analysis of embankments over stone column-improved soft clay. *Engineering Geology*, 120(1–4), 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.002>
- Ágreda, E. (2005). *Estabilidad de Taludes*. Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Alberto Guzmán Sánchez, L., Sénior, G., Cía Minera, M., Enrique Hermitaño Cristóbal, A., & Junior, G. (2016). *GEOLOGÍA DEL PROYECTO PUCAMARCA*
- Alcántara, E. (2017). *Aplicación de los métodos de equilibrio límite, elementos finitos y diferencias finitas en el comportamiento de laderas y taludes*. [Tesis de pregrado universidad nacional de Cajamarca]. repositorio UNC.
- Arellano, D., & Stark, T. D. (n.d.). Importance of Three-Dimensional Slope Stability Analyses in Practice.
- Ayala, F. (1986). *Manual de Taludes*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Calle, A. (2019). Factor de seguridad en taludes y laderas inestables: orden de magnitud. *INGENIOXYZ*, 2.
- Castro, S., Atarama, E., Peña, L., Pulcha, D., Huamán, C., Sánchez, M., & Álvarez, J. (2021). *Estudio de factibilidad para la ampliación del tajo hacia el lado chileno Informe técnico Unidad minera Pucamarca Minsur SA*.  
[www.anddes.com](http://www.anddes.com)
- Chakraborty, A., & Goswami, D. (2016). State of the art: Three-Dimensional (3D) Slope-Stability Analysis. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(5), 493–498. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1172807>
- Curasma, N. y Quinto, R. (2019). *Estudio comparativo entre el método de equilibrio límite y elementos finitos en el análisis de estabilidad de ladera en el sector Heramocco - comunidad de Sacsamarca – 2019*. [Tesis de pregrado universidad nacional de Huancavelica] repositorio UNH.  
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/1390>  
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/86567>  
<https://repositorio.unh.edu.pe/500>
- Huang, C.-C., Tsai, ; Cheng-Chen, & Chen, Y.-H. (n.d.). Generalized Method for Three-Dimensional Slope Stability Analysis.  
<https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412002128:10836>

- Kalatehjari, R., & Ali, N. (n.d.). A Review of Three-Dimensional Slope Stability Analyses based on Limit Equilibrium Method.
- Kalatehjari, R., A Rashid, A. S., Hajihassani, M., Kholghifard, M., & Ali, N. (2014). Determining the unique direction of sliding in three-dimensional slope stability analysis. *Engineering Geology*, 182(PA), 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.06.002>
- Leong, E. C., & Rahardjo, H. (2012). Two and three-dimensional slope stability reanalyses of Bukit Batok slope. *Computers and Geotechnics*, 42, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.01.001>
- López E. (2022). *Análisis de estabilidad del talud por metodología 3D y propuesta de estabilización del talud en Quebrada Jilari, Cuyocuyo, Puno, 2022*. [Tesis de pregrado universidad Cesar Vallejo]. repositorio UCV.
- Matteis, Á. F. (2003). Estabilidad de taludes. Rosario, Santa fé: Universidad Nacional de Rosario.
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004). Mecánica de rocas fundamentos de la ingeniería de taludes
- Read, J., Stacey, P., & Read Peter Stacey, J. (n.d.). Guidelines for Open Pit Slope Design.
- Sengani, F., & Allopi, D. (2022). Accuracy of Two-Dimensional Limit Equilibrium Methods in Predicting Stability of Homogenous Road-Cut Slopes. *Sustainability*, 14(7), 3872. <https://doi.org/10.3390/su14073872>
- Shamsoddin Saeed, M., Maarefvand, P., & Yaaghubi, E. (2015). Two and three-dimensional slope stability analyses of final wall for Miduk mine. *International Journal of Geo-Engineering*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-015-0009-0>
- Shirago, K., & Dirate, D. (2023). Three-dimensional strength reduction and two-dimensional limit equilibrium methods of slope stability analysis. *Heliyon*, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17966>
- Suarez, J. (2018). Deslizamientos: Análisis Geotécnicos. Medellín: erosión.
- Wines, D. (2016). A comparison of slope stability analyses in two and three dimensions. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(5), 399–406. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n5a5>
- Zhang, Y., Chen, G., Zheng, L., Li, Y., & Zhuang, X. (n.d.). Effects of geometries on three-dimensional slope stability. [www.nrcresearchpress.com](http://www.nrcresearchpress.com)

## 8. LISTA DE ABREVIATURAS

|                 |                                           |
|-----------------|-------------------------------------------|
| <b>BFA:</b>     | Ángulo de cara de banco                   |
| <b>IRA:</b>     | Ángulo interrampa                         |
| <b>OSA:</b>     | Ángulo global de Talud                    |
| <b>TOE:</b>     | Pie de talud                              |
| <b>FS:</b>      | Factor de seguridad                       |
| <b>FSE:</b>     | Factor de seguridad estático              |
| <b>FSP:</b>     | Factor de seguridad pseudoestático        |
| <b>DIP:</b>     | Angulo de buzamiento                      |
| <b>DIP DIR:</b> | Dirección de buzamiento                   |
| <b>RMR89:</b>   | <i>Rock Mass Rating</i> del 1989          |
| <b>RQD:</b>     | <i>Rock Quality Designation</i>           |
| <b>FOS:</b>     | <i>Factor of Security</i>                 |
| <b>LEM:</b>     | <i>Limit Equilibrium Method</i>           |
| <b>VWP:</b>     | Piezómetro de cuerda vibrante             |
| <b>UCS:</b>     | <i>Uniaxial Compressive Strength</i>      |
| <b>FDM:</b>     | <i>Finite Differences Method</i>          |
| <b>PGA:</b>     | <i>Peak ground acceleration</i>           |
| <b>M.P:</b>     | Morgenstern Price                         |
| <b>GLE:</b>     | Se refiere al método de Morgenstern Price |
| <b>RCS:</b>     | <i>Rock Core Sample</i>                   |

## 9. ANEXOS

### Anexo 01: Matriz de consistencia

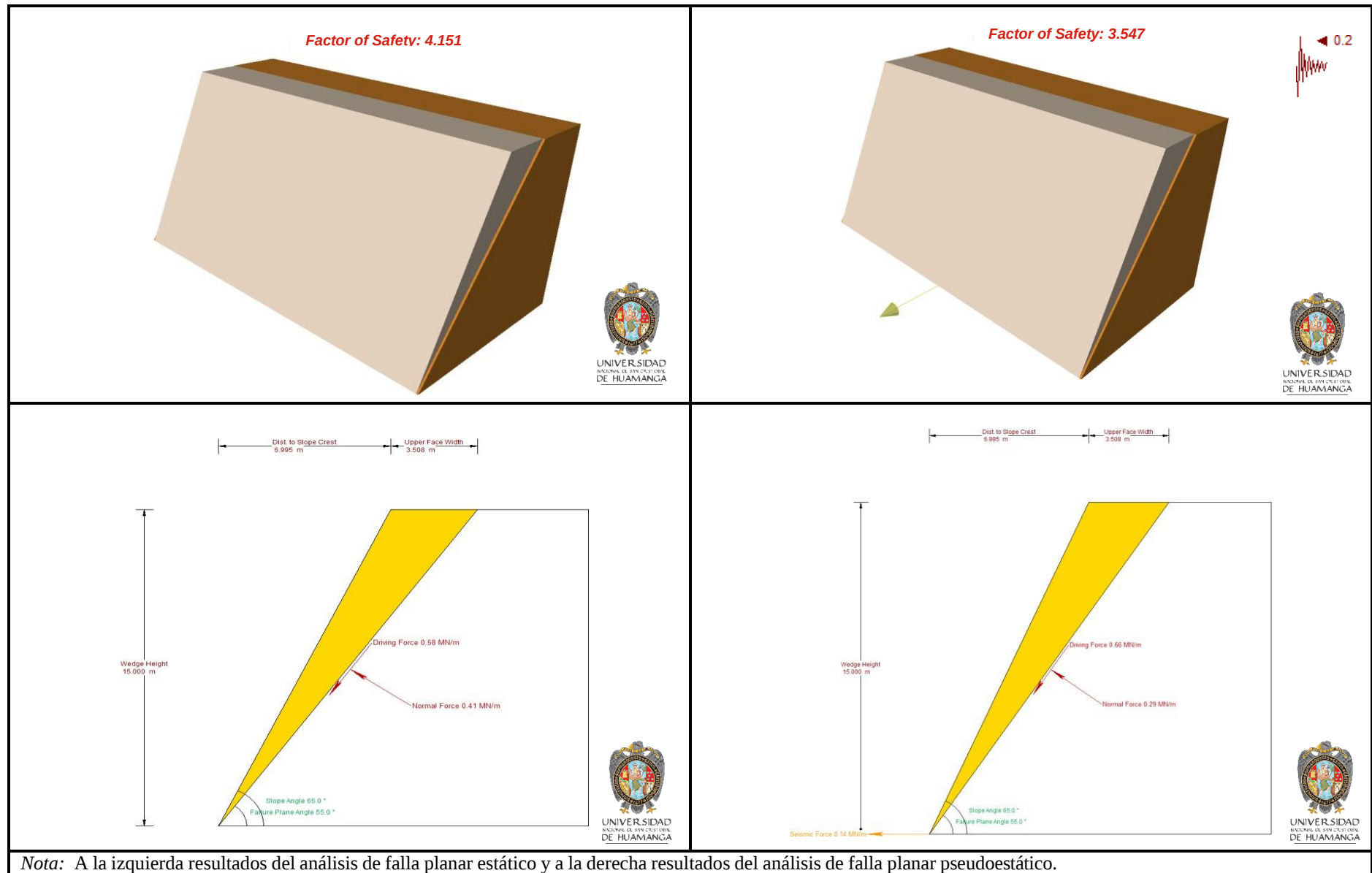
| “Estudio comparativo del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del Tajo Checocollo de la Mina Pucamarca, 2024”                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PROBLEMA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | OBJETIVOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | HIPÓTESIS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | VARIABLES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | INDICADORES                                                                                                                                                                                                                                                                | METODOLOGÍA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Problema General</b><br><br>¿Cuál es la diferencia entre el método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024?                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>Objetivo General</b><br><br>Determinar la diferencia del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024.                                                                                                                                                                                                                                             | <b>Hipótesis general</b><br><br>El método de equilibrio límite tridimensional optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>Variables independientes:</b><br><br><b>X:</b> Métodos de equilibrio límite bidimensional y tridimensional<br><b>Dimensiones:</b><br>• <b>X1:</b> Métodos de equilibrio límite tridimensional<br>• <b>X2:</b> Métodos de equilibrio límite bidimensional                                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Propiedades físicas</li> <li>Propiedades mecánicas</li> <li>Modelo geométrico</li> </ul>                                                                                                                                            | <b>Diseño de investigación:</b><br><b>Método:</b><br>El diseño de investigación usado es correlacional, transeccional, no experimental.<br><br><b>Tipo de investigación:</b><br>El tipo de investigación usado es el Aplicado.                                                                                                          |
| <b>Problemas específicos:</b><br><br><b>PE1:</b> ¿Cuál es la diferencia entre el método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad estática de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024?<br><br><b>PE2:</b> ¿Cuál es la diferencia entre el método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad pseudoestática de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024?? | <b>Objetivos específicos:</b><br><br><b>OE1:</b> Determinar la diferencia del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad estática de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024<br><br><b>OE2:</b> Determinar la diferencia del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad pseudoestática de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024 | <b>Hipótesis específico:</b><br><br><b>HE1:</b> El método de equilibrio límite tridimensional optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad estática de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024<br><br><b>HE2:</b> El método de equilibrio límite tridimensional optimiza los resultados en comparación con el bidimensional en el análisis de estabilidad pseudoestática de taludes del tajo Checocollo de la mina Pucamarca, 2024 | <b>Variables Dependientes(Y):</b><br><b>Y:</b> Análisis Estabilidad de taludes.<br><br><b>Dimensiones:</b><br>• <b>Y1:</b> Análisis estabilidad estático tridimensional.<br>• <b>Y2:</b> Análisis estabilidad pseudoestático tridimensional.<br>• <b>Y1:</b> Análisis estabilidad estático bidimensional.<br>• <b>Y2:</b> Análisis estabilidad pseudoestático bidimensional. | <ul style="list-style-type: none"> <li>Factor de seguridad estático tridimensional.</li> <li>Factor de seguridad pseudoestático tridimensional.</li> <li>Factor de seguridad estático bidimensional.</li> <li>Factor de seguridad pseudoestático bidimensional.</li> </ul> | <b>Nivel de investigación:</b><br>El nivel de investigación que se utiliza es el Descriptivo – Correlacional.<br><br><b>Población:</b><br>Taludes del tajo Checocollo en la unidad minera Pucamarca - Tacna 2024.<br><br><b>Muestra:</b><br>Taludes del sector frontera del tajo Checocollo de la unidad minera Pucamarca - Tacna 2024. |

## **Anexo 2.0**

*Análisis de estabilidad de falla planar y tipo cuña*

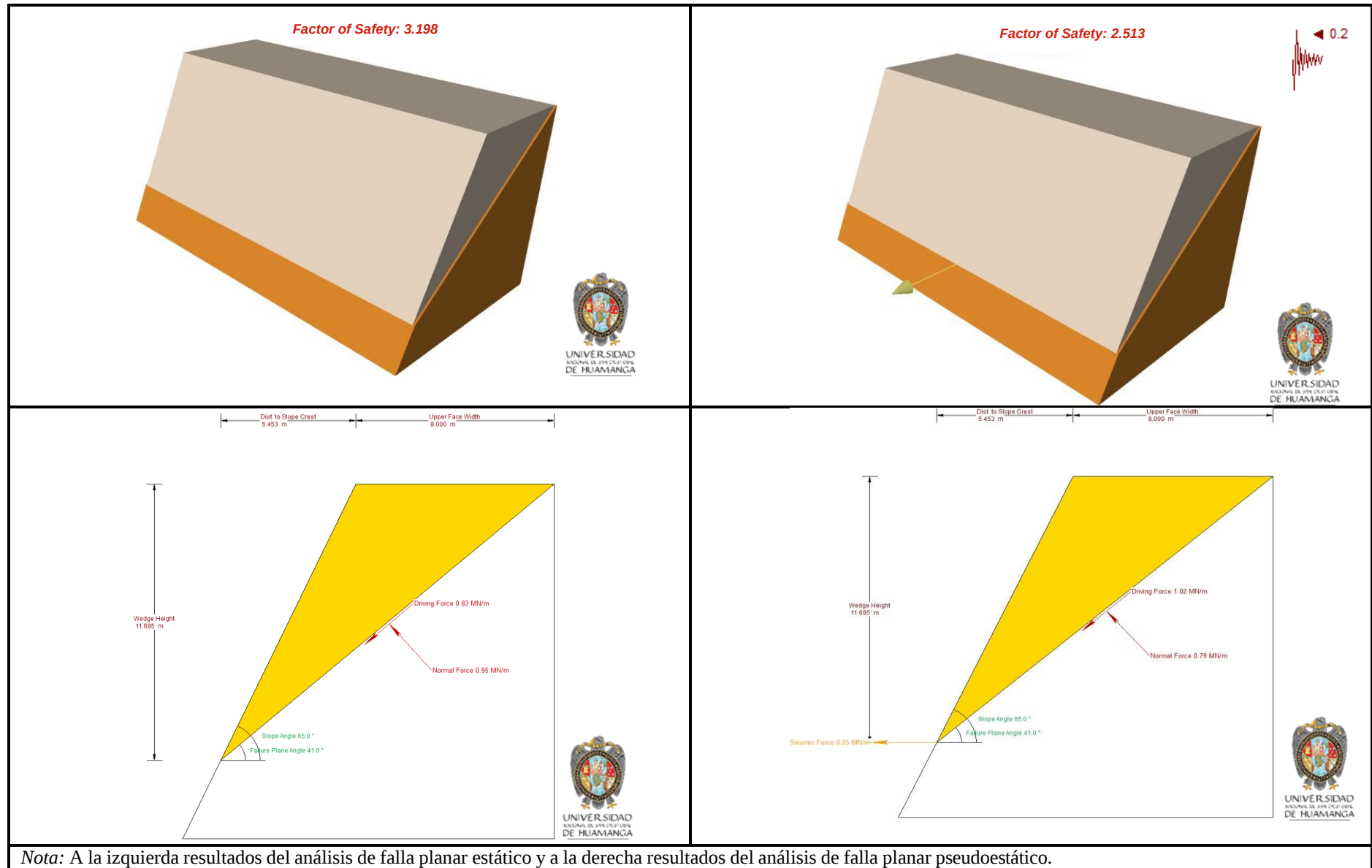
## Anexo 2.1

Análisis de estabilidad de falla planar Dip de talud  $65^\circ$  - Dip Dir  $300^\circ$ -  $280^\circ$ , familia de diaclasas j8



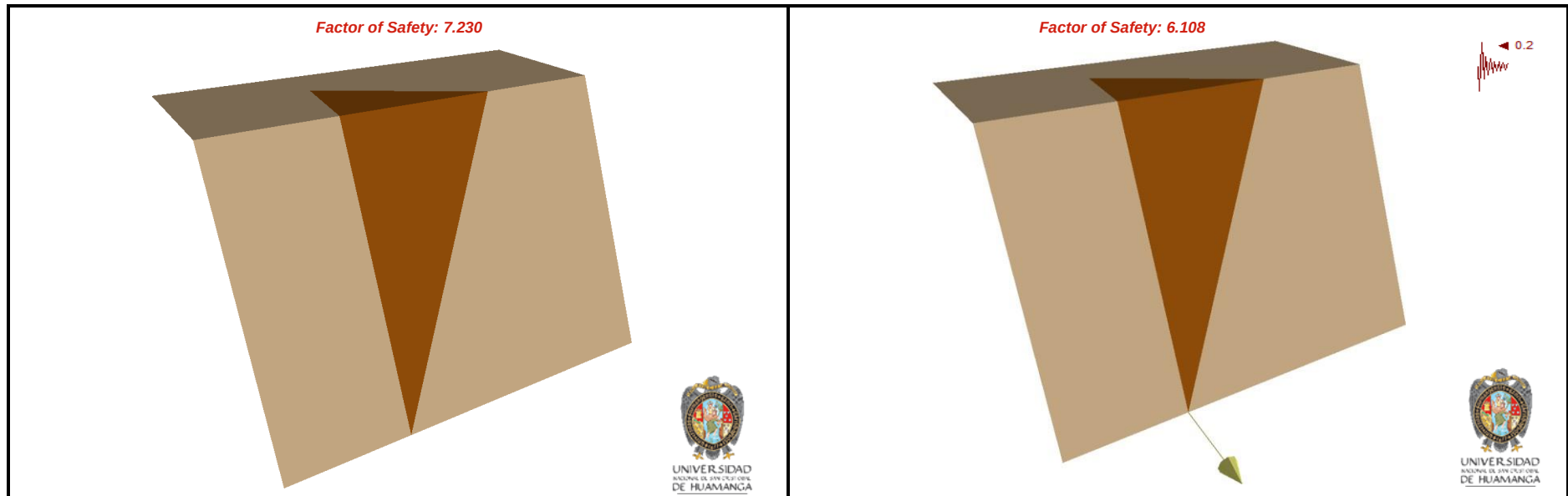
## Anexo 2.2

Análisis de estabilidad de falla planar Dip de talud 65° - Dip Dir 300° - 280°, familia de diaclasas j11

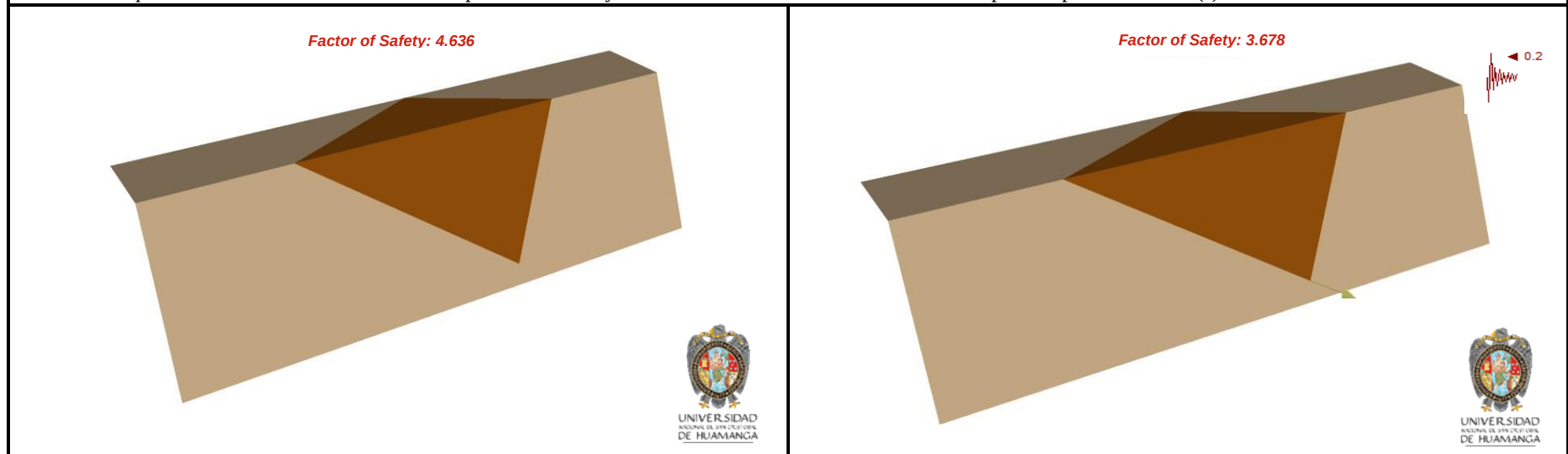


### Anexo 2.3

Análisis de estabilidad de falla tipo cuña Dip de talud 65° - Dip Dir 280°, familia de diaclasas j8 y j10 (a) - familia de diaclasas j8 y j11 (b)



Nota: A la izquierda resultados del análisis de falla tipo cuña estático y a la derecha resultados del análisis de falla tipo cuña pseudoestático. (a)



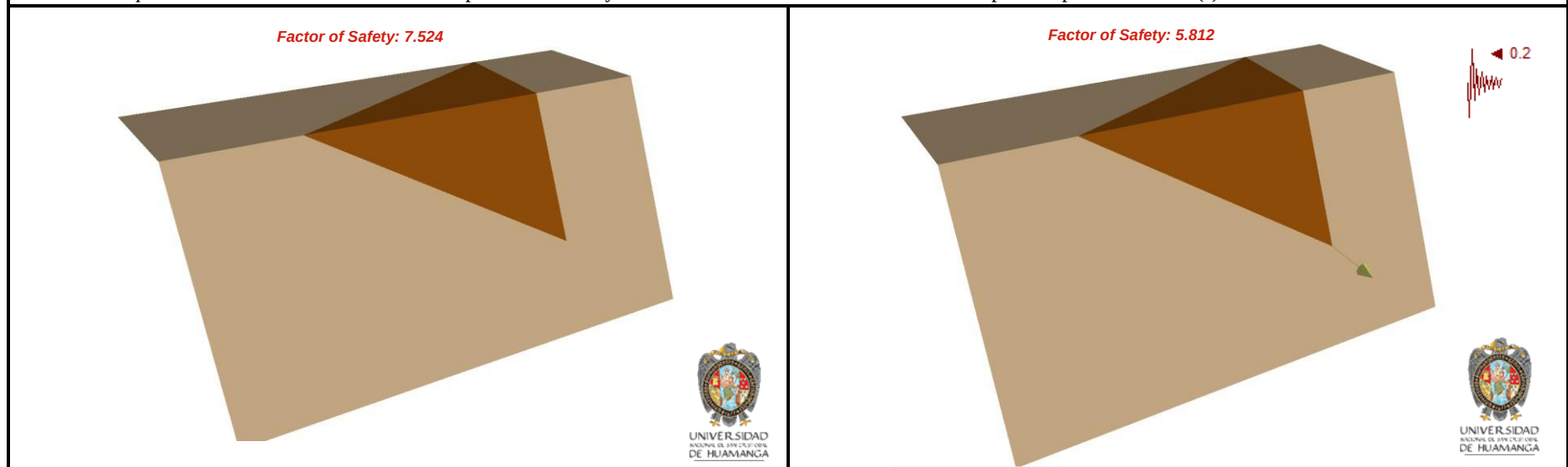
Nota: A la izquierda resultados del análisis de falla tipo cuña estático y a la derecha resultados del análisis de falla tipo cuña pseudoestático. (b)

## Anexo 2.4

Análisis de estabilidad de falla tipo cuña Dip de talud 65° - Dip Dir 280°, familia de diaclasas j9 y j11 (a) - familia de diaclasas j10 y j11 (b)



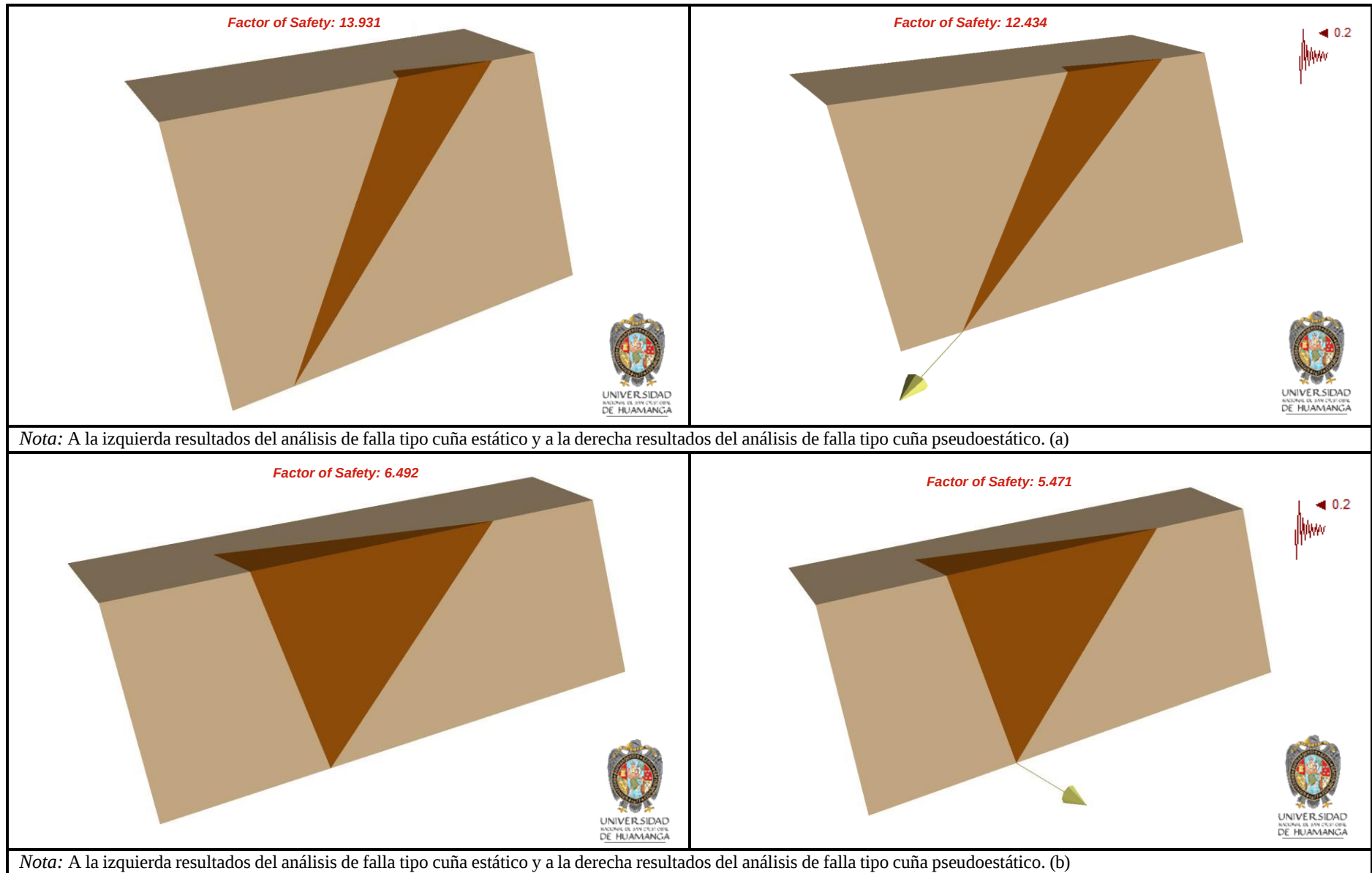
Nota: A la izquierda resultados del análisis de falla tipo cuña estático y a la derecha resultados del análisis de falla tipo cuña pseudoestático. (a)



Nota: A la izquierda resultados del análisis de falla tipo cuña estático y a la derecha resultados del análisis de falla tipo cuña pseudoestático. (b)

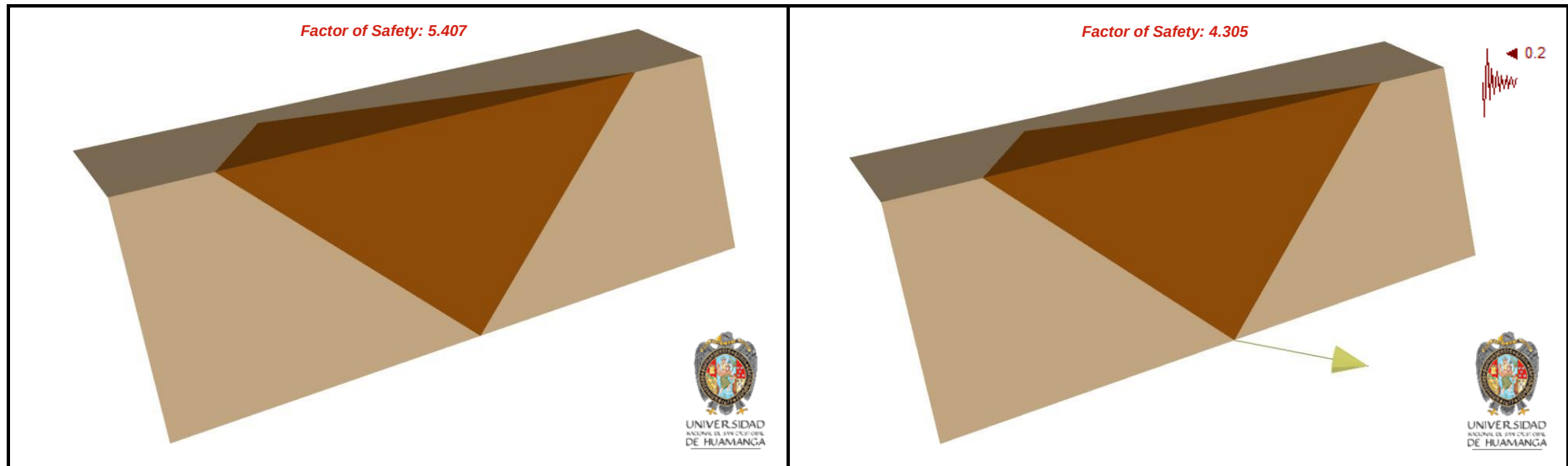
## Anexo 2.5

Análisis de estabilidad de falla tipo cuña Dip de talud  $65^\circ$  - Dip Dir  $300^\circ$ , familia de diaclasas J1 y j8 (a) - familia de diaclasas j8 y j10(b)

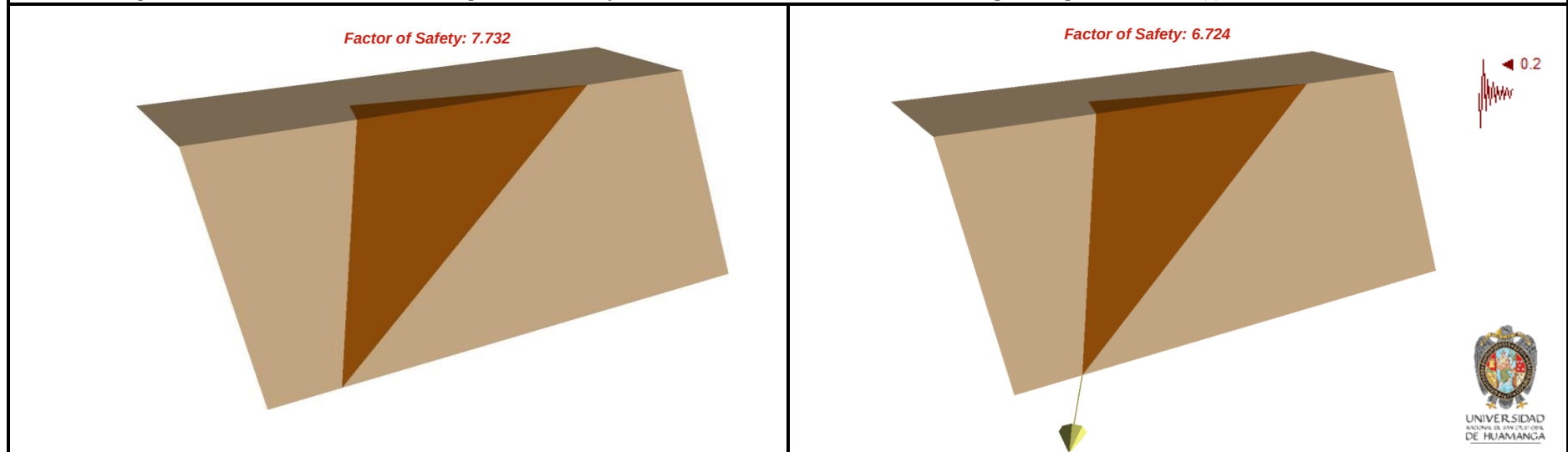


## Anexo 2.6

Análisis de estabilidad de falla tipo cuña Dip de talud 65° - Dip Dir 300°, familia de diaclasas j8 y j11 (a) - familia de diaclasas j8 y j12(b)



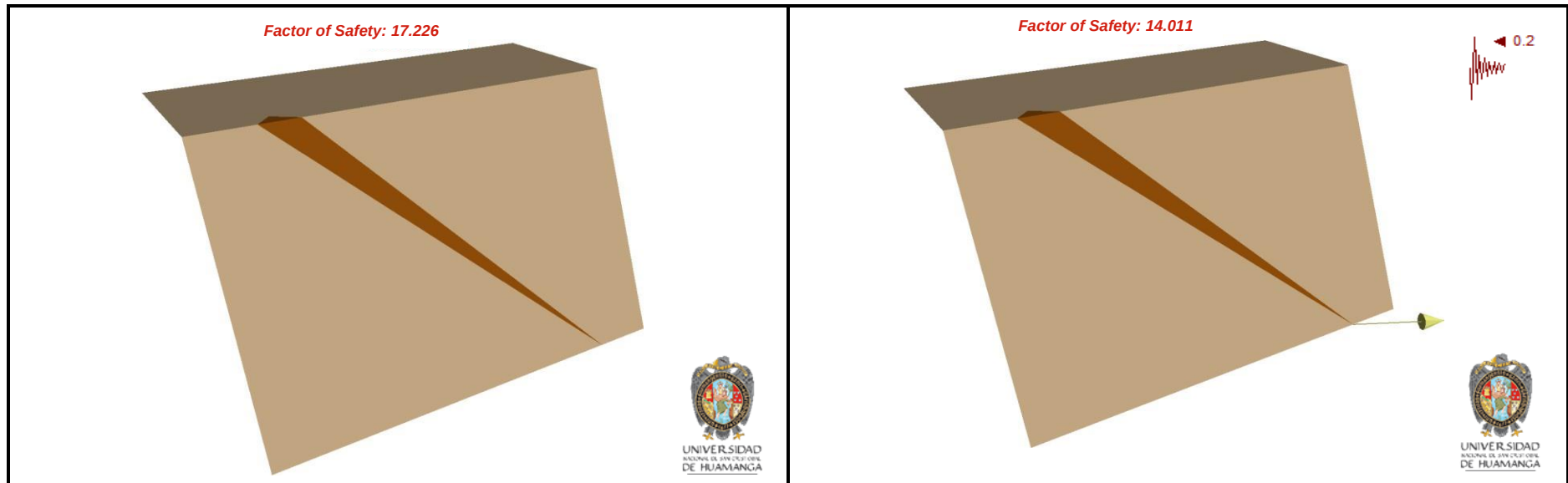
Nota: A la izquierda resultados del análisis de falla tipo cuña estático y a la derecha resultados del análisis de falla tipo cuña pseudoestático. (a)



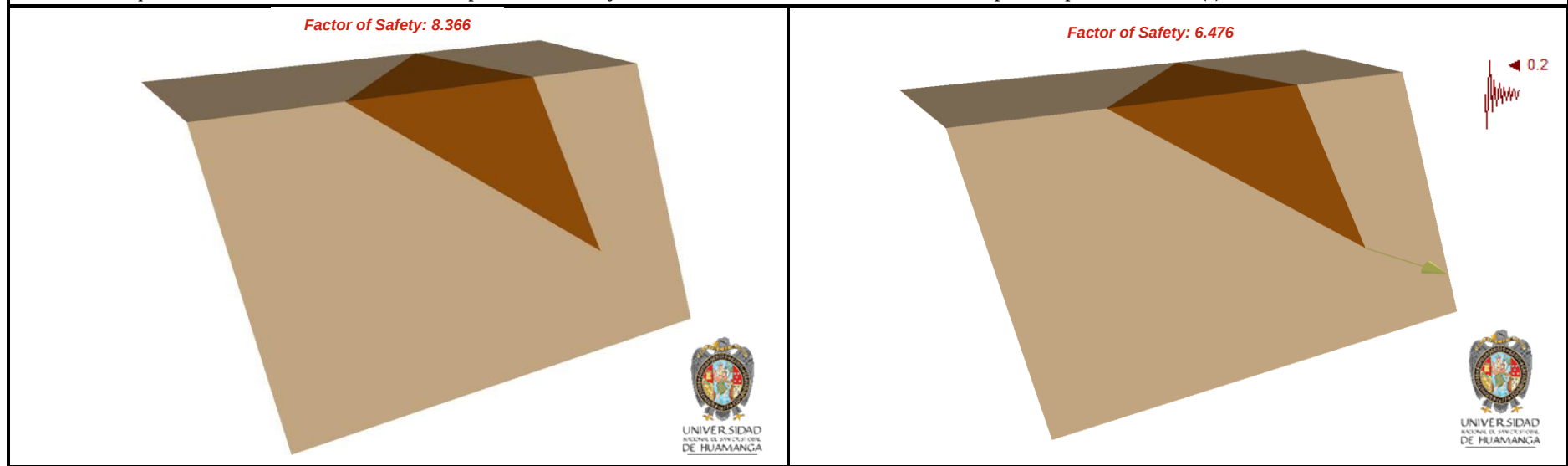
Nota: A la izquierda resultados del análisis de falla tipo cuña estático y a la derecha resultados del análisis de falla tipo cuña pseudoestático. (b)

## Anexo 2.7

Análisis de estabilidad de falla tipo cuña Dip de talud  $65^\circ$  - Dip Dir  $300^\circ$ , familia de diaclasas j9 y j11 (a) - familia de diaclasas j10 y j11(b)



Nota: A la izquierda resultados del análisis de falla tipo cuña estático y a la derecha resultados del análisis de falla tipo cuña pseudoestático. (a)



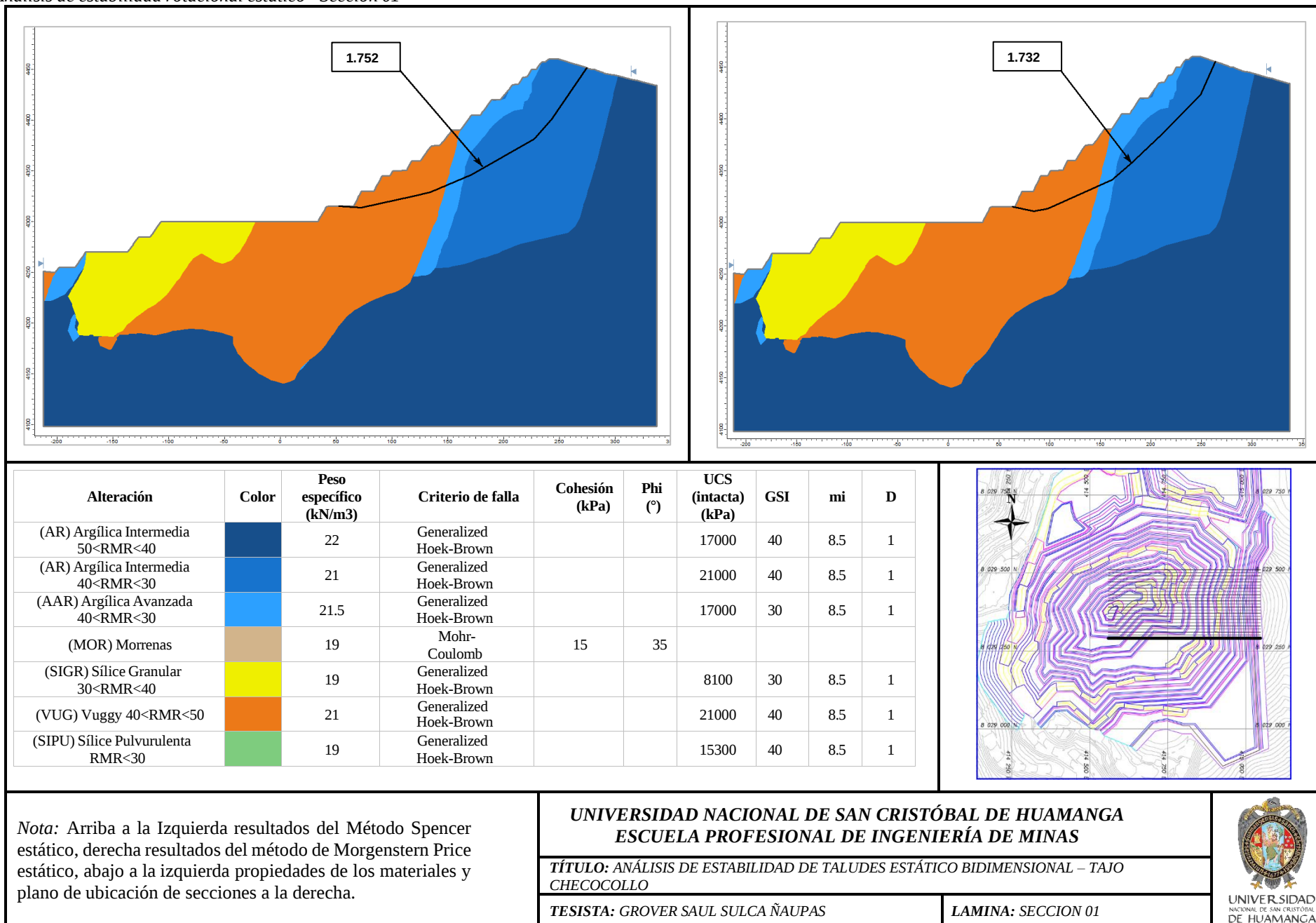
Nota: A la izquierda resultados del análisis de falla tipo cuña estático y a la derecha resultados del análisis de falla tipo cuña pseudoestático. (b)

### **Anexo 3.0**

*Análisis de estabilidad rotacional estático*

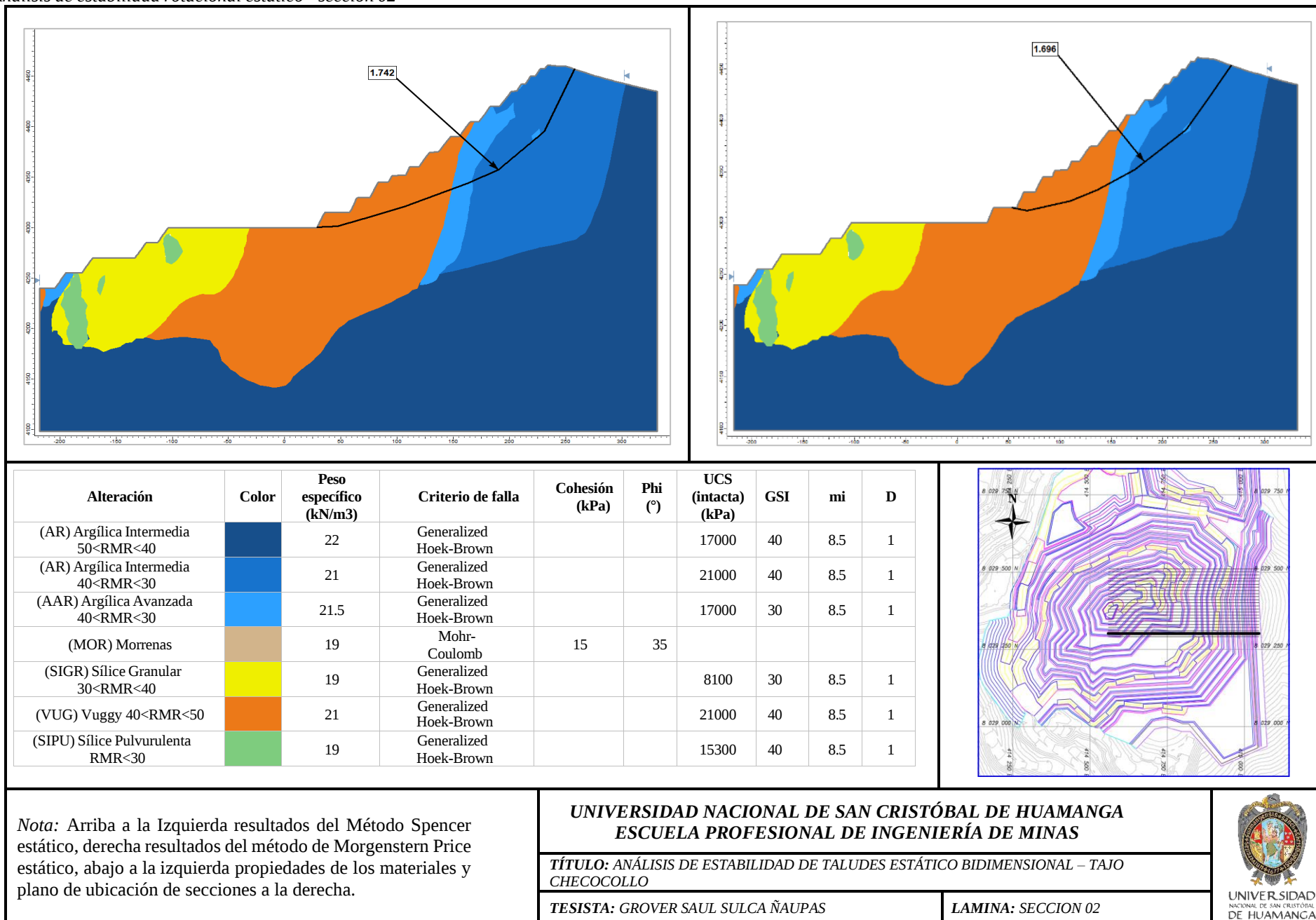
### Anexo 3.1

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - Sección 01



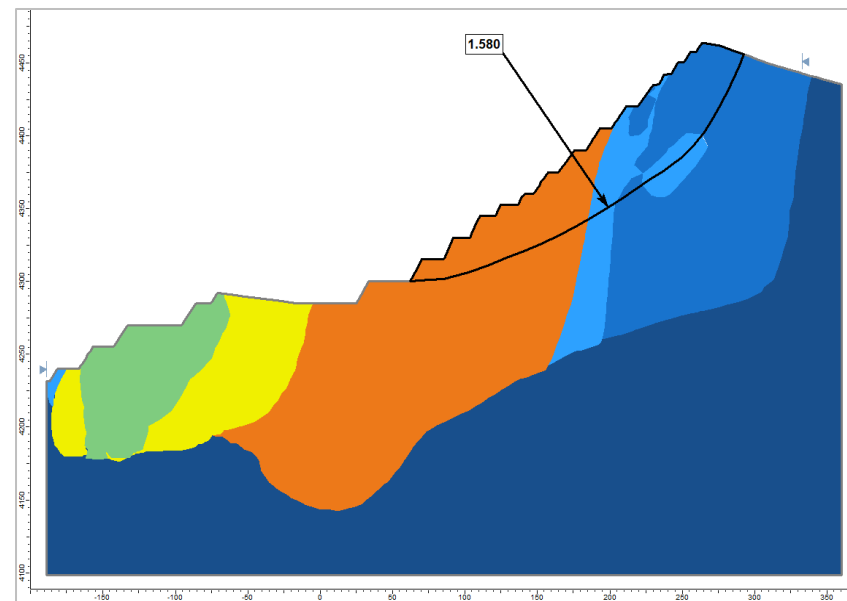
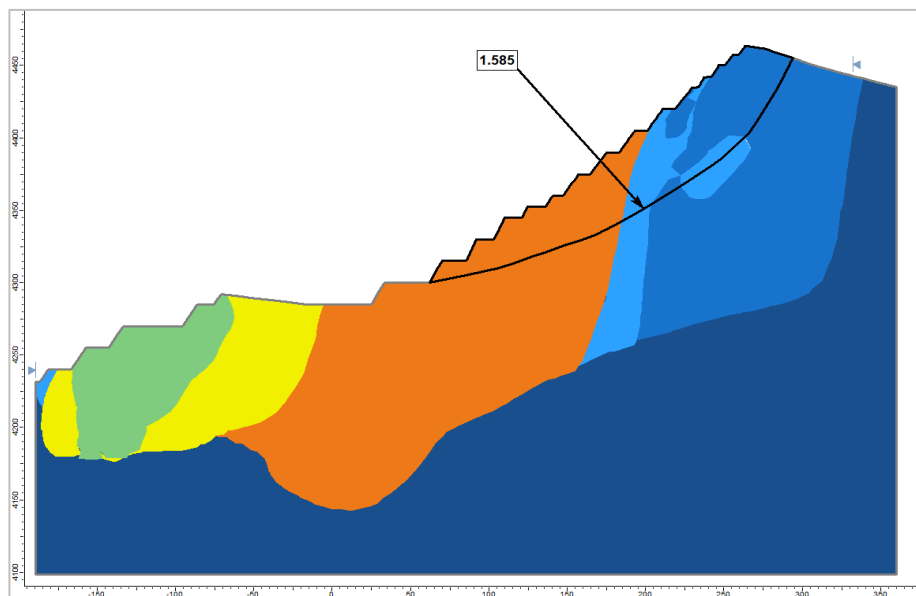
## Anexo 3.2

### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 02

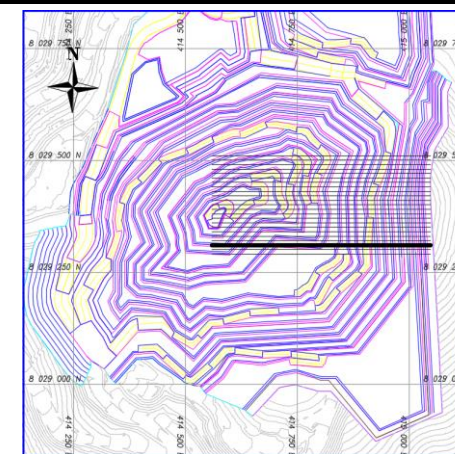


### Anexo 3.3

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 03



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

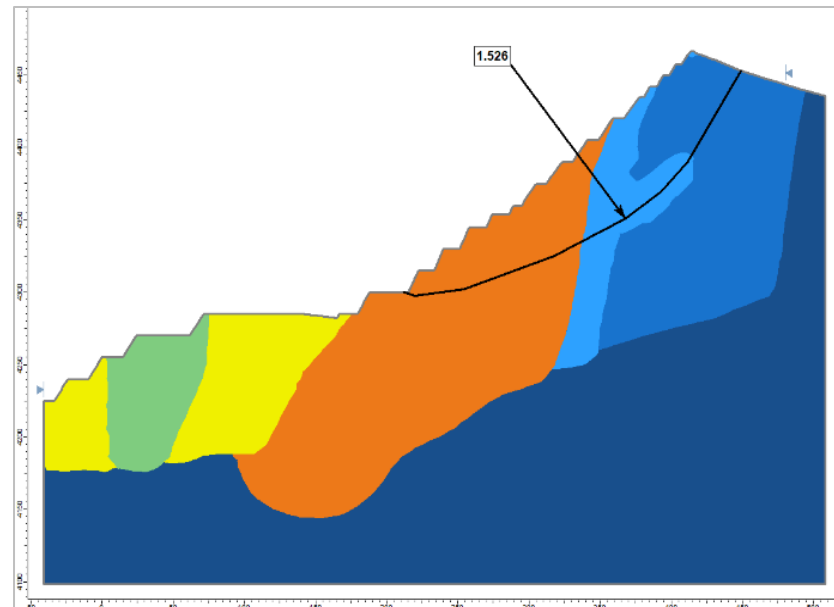
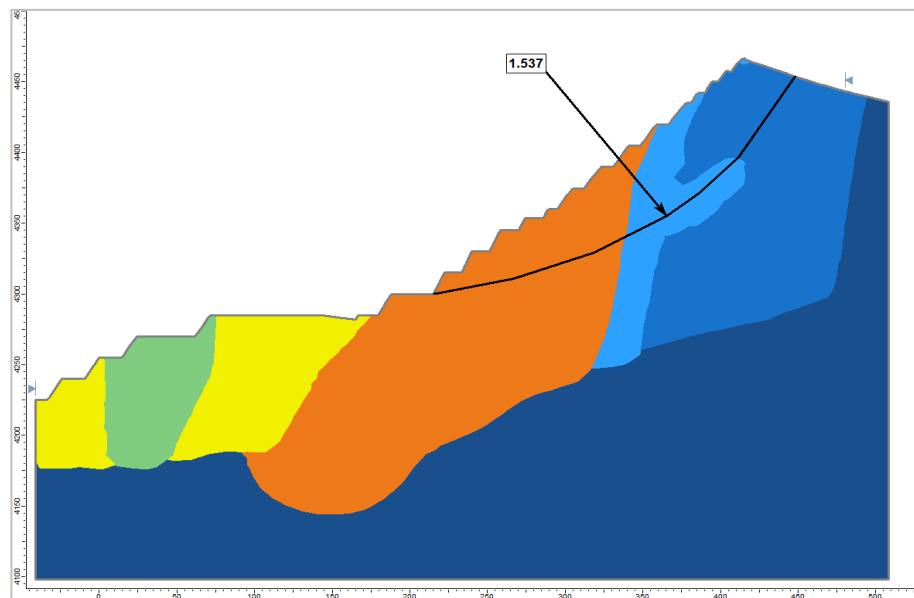
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 03

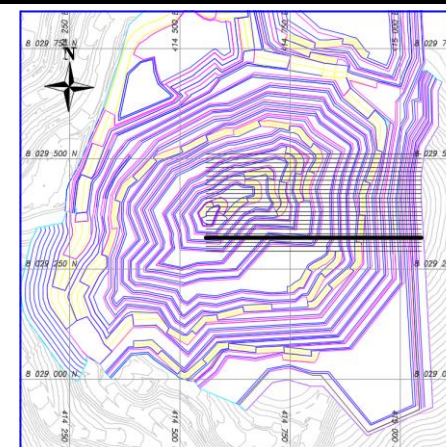


### Anexo 3.4

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 04



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvulenta RMR<30    |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

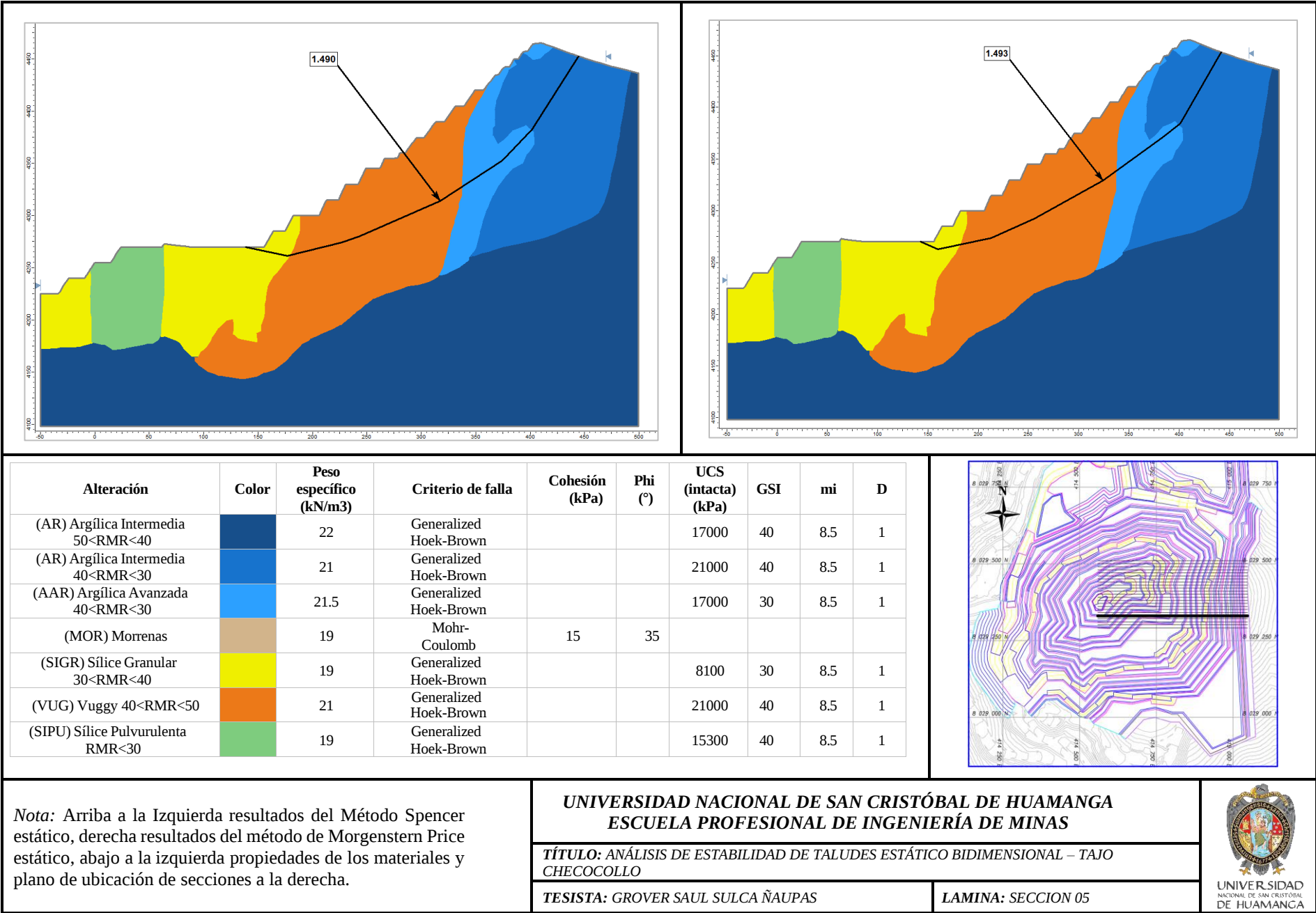
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 04



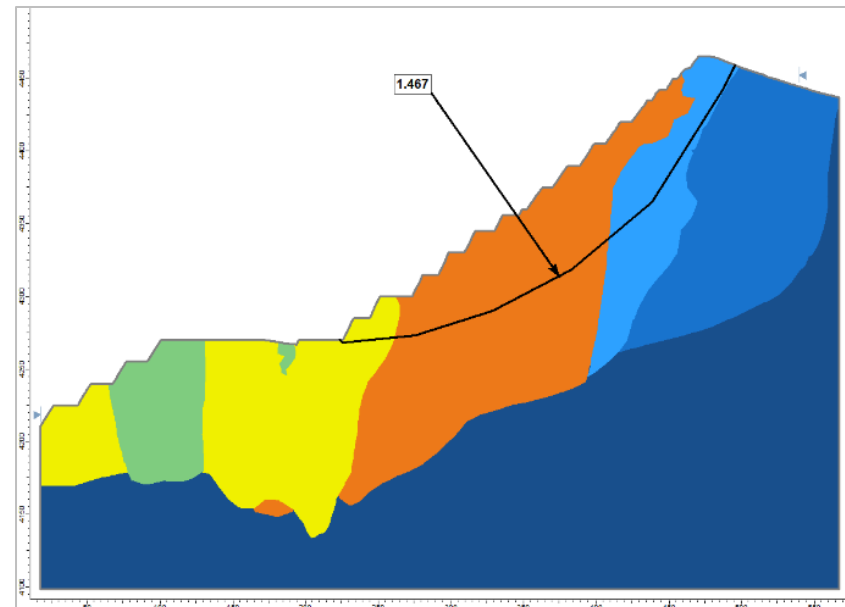
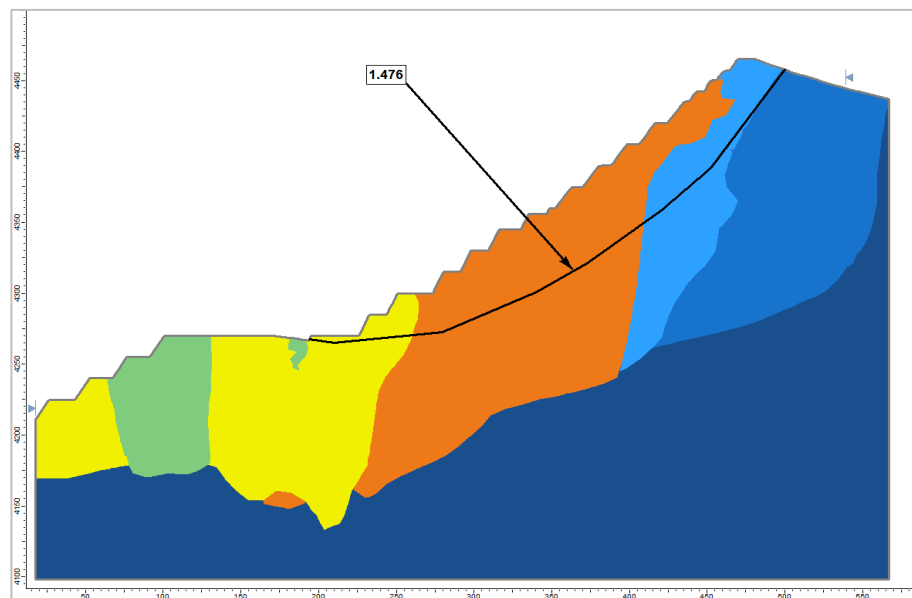
Anexo 3.5

Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 05

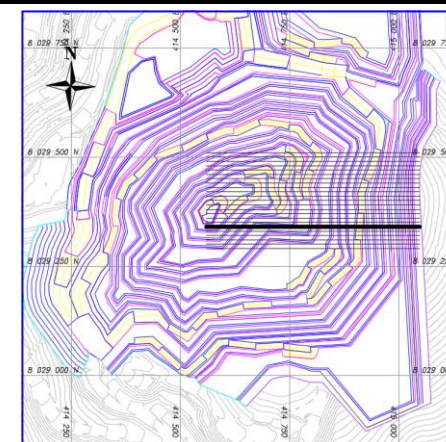


## Anexo 3.6

### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 06



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Light Blue | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

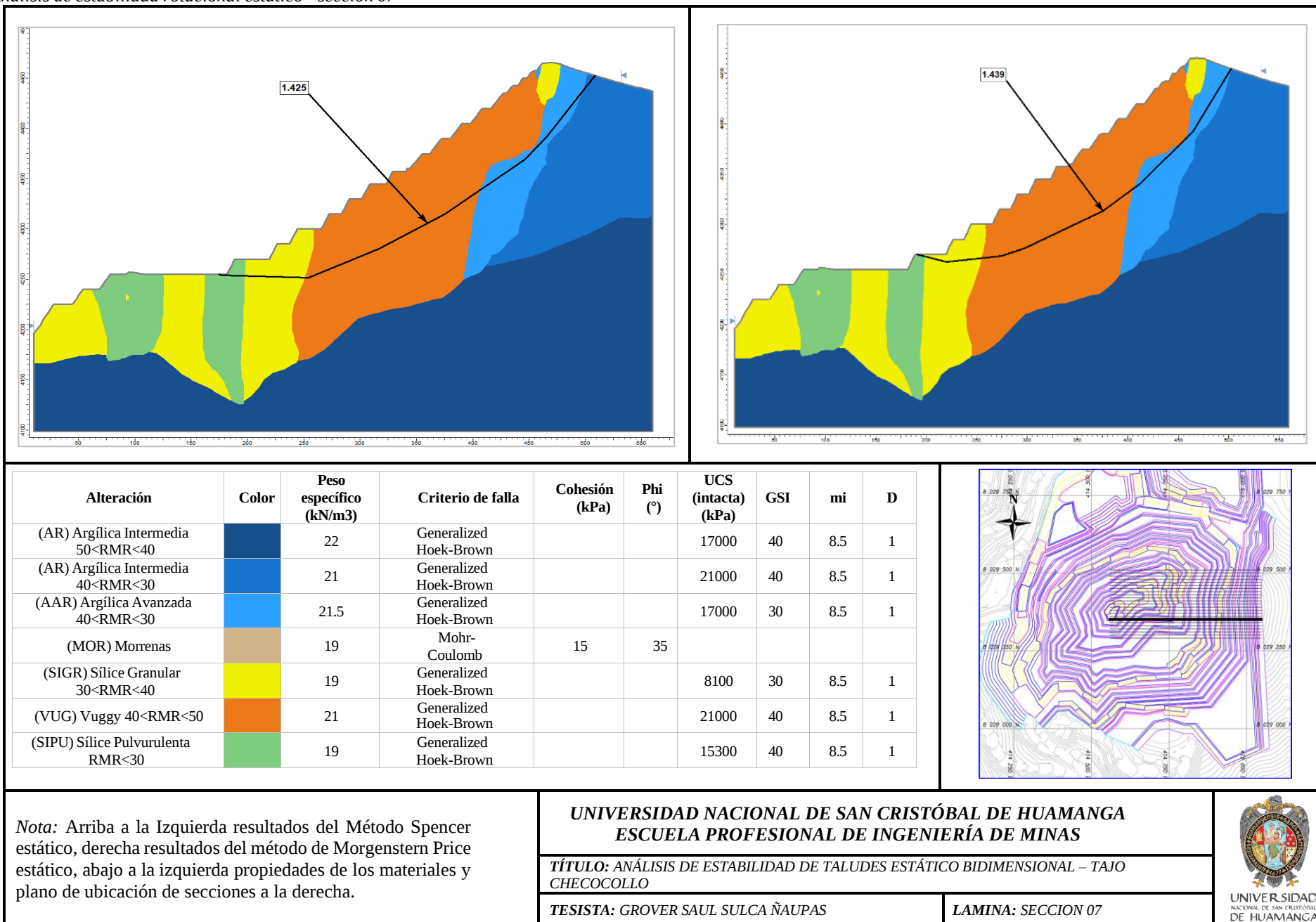
**LAMINA:** SECCION 06



UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA

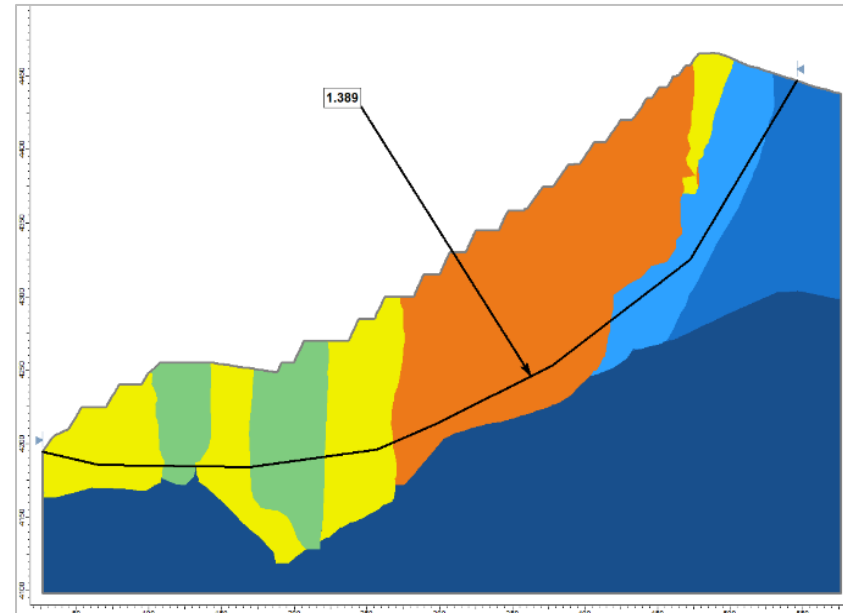
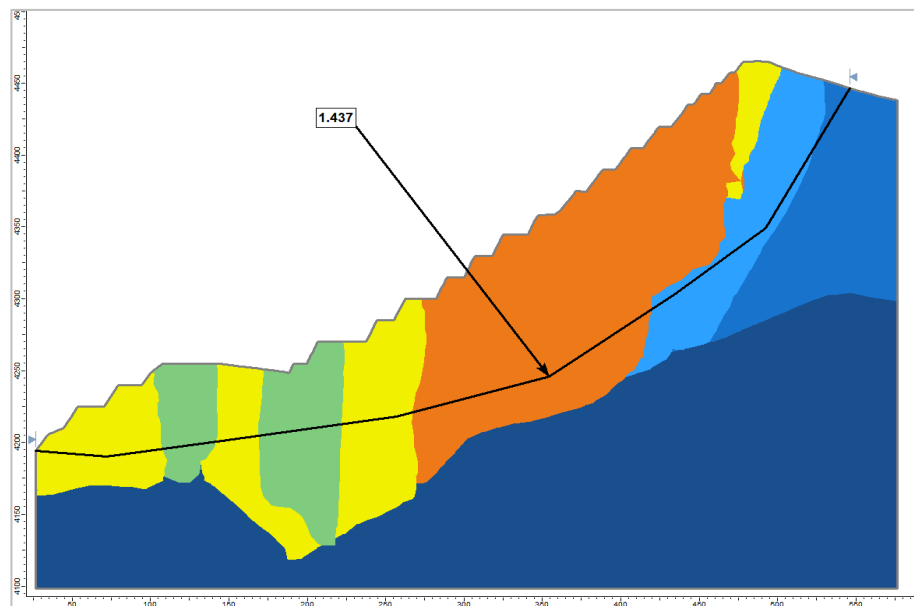
### Anexo 3.7

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 07

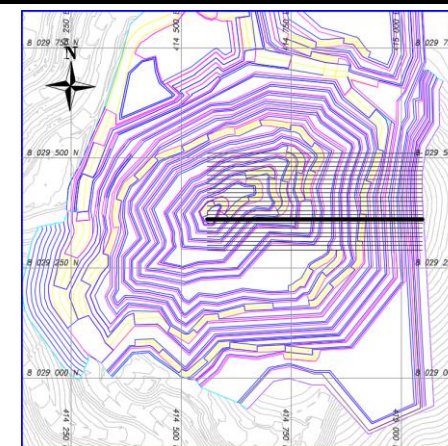


## Anexo 3.8

### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 08



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvulenta RMR<30    |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

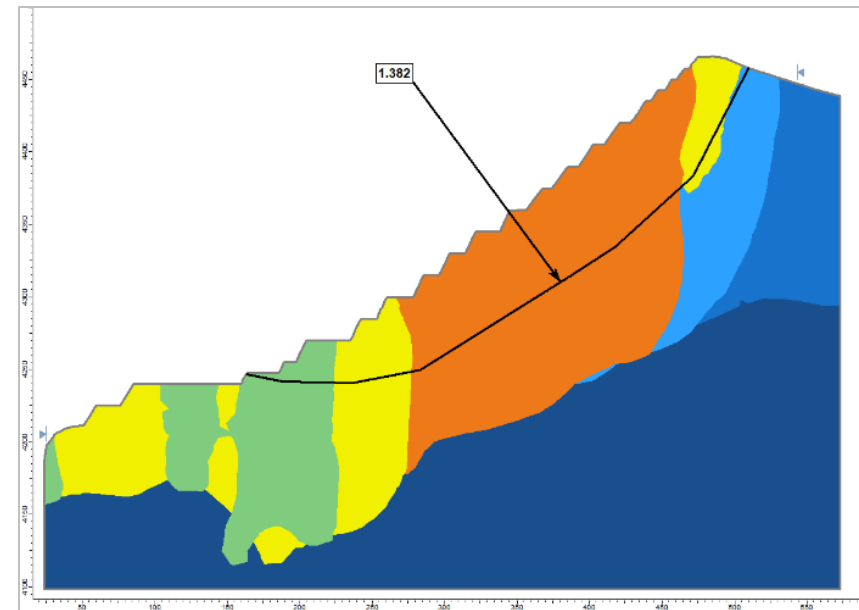
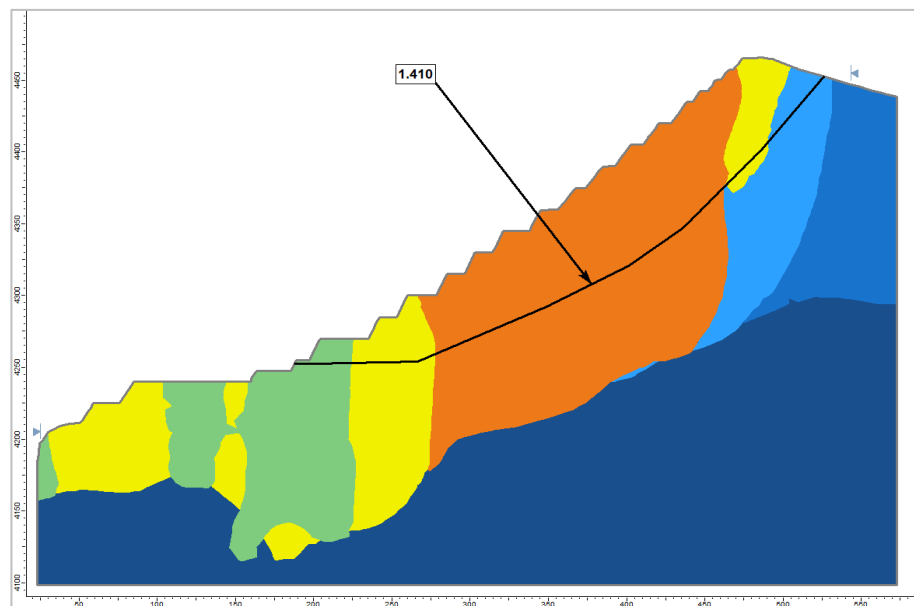
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 08

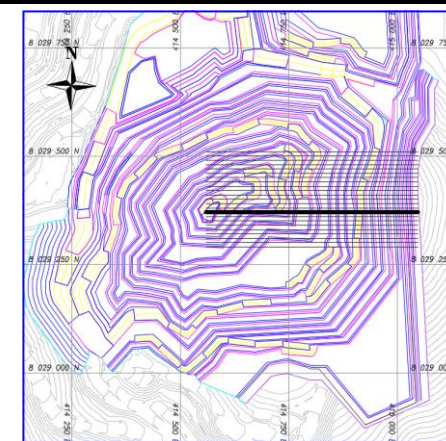


### Anexo 3.9

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 09



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

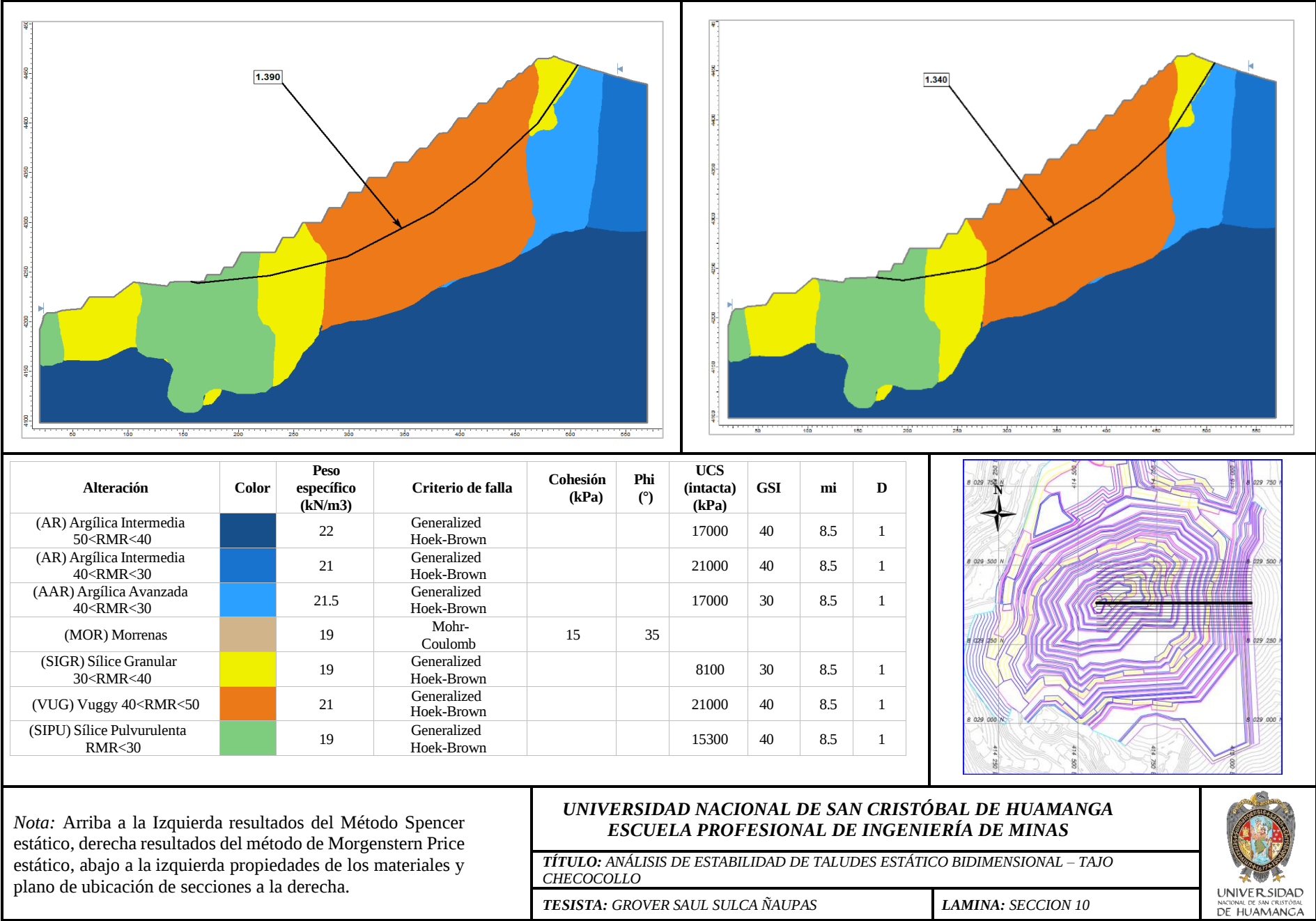
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 09



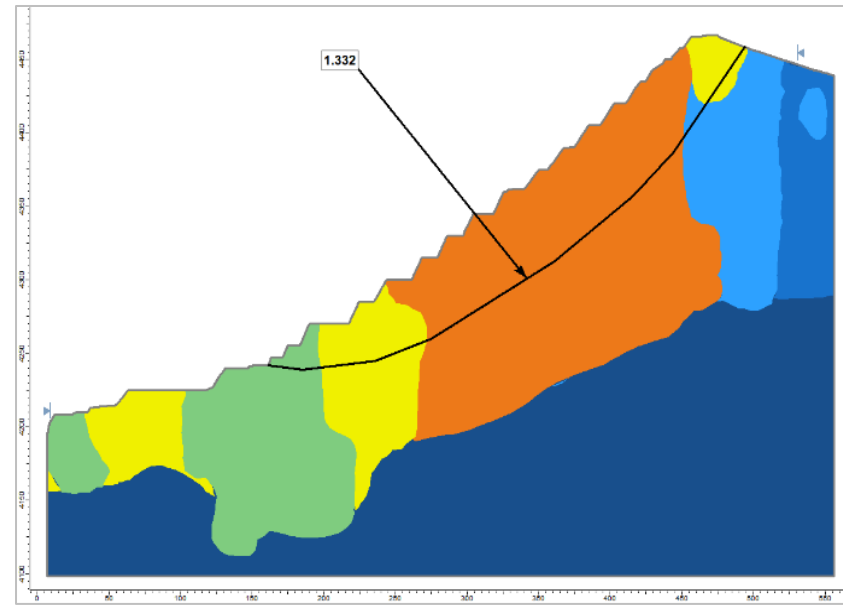
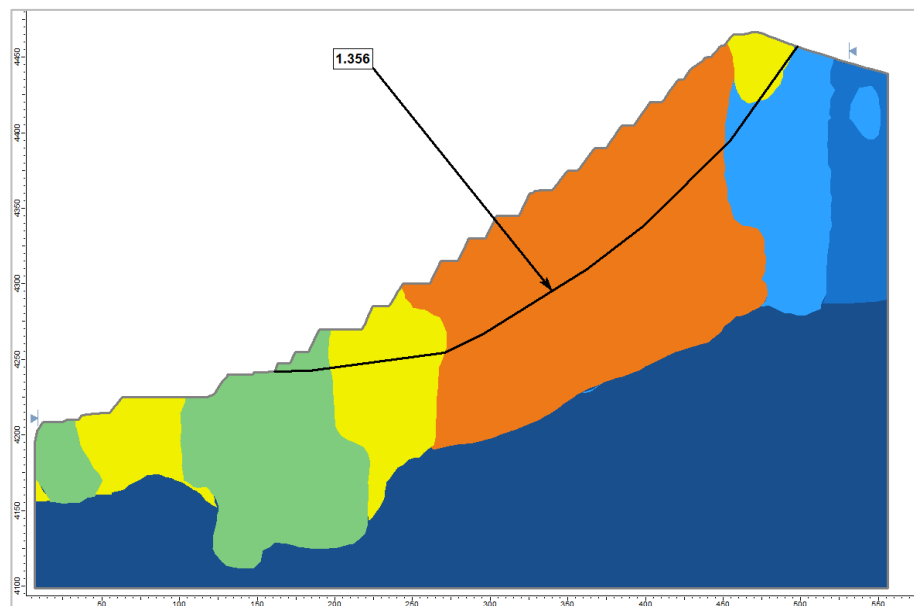
Anexo 3.10

Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 10

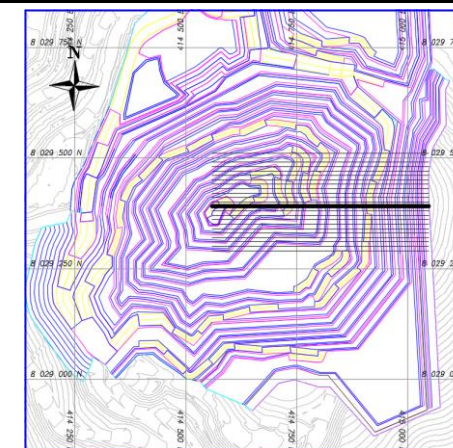


### Anexo 3.11

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 11



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Light Blue | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

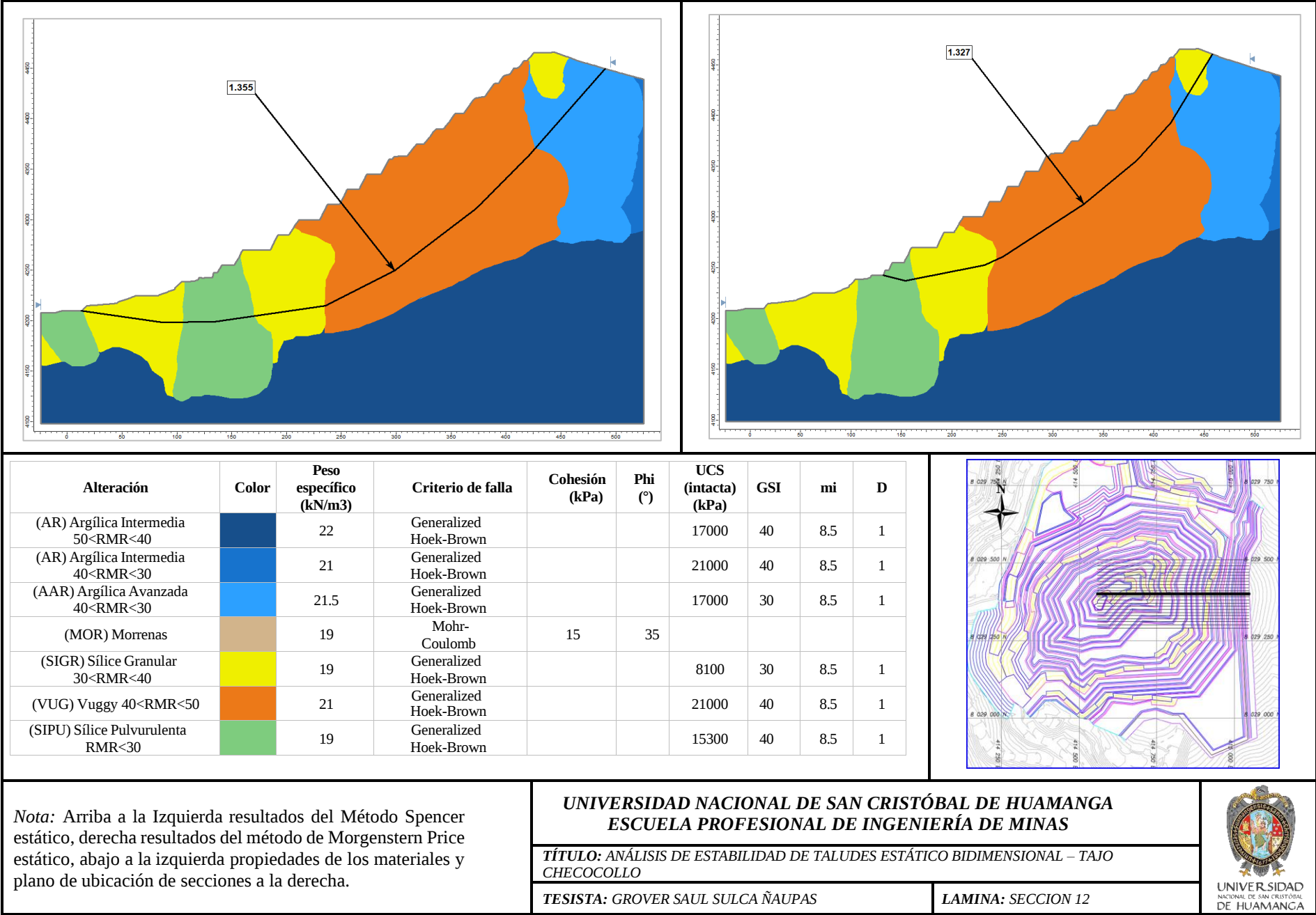
**LAMINA:** SECCION 11



UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA

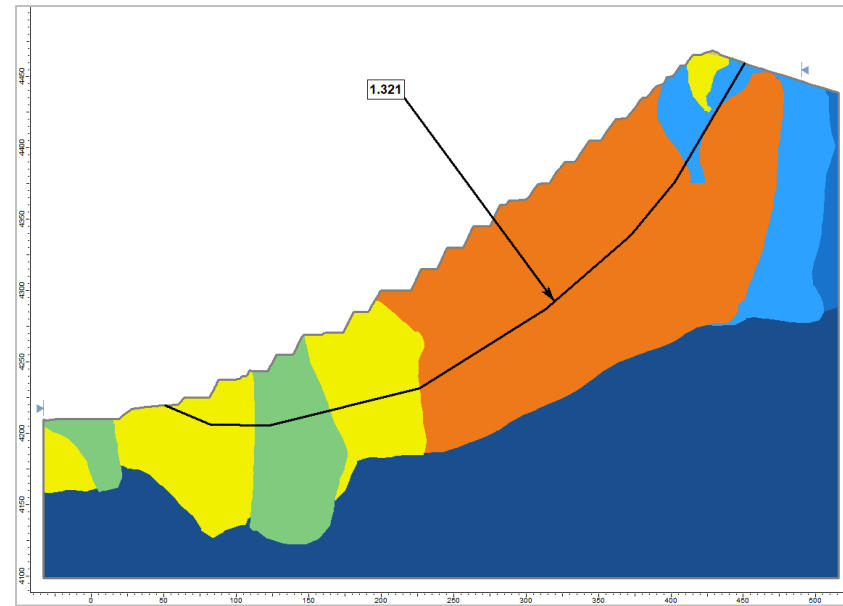
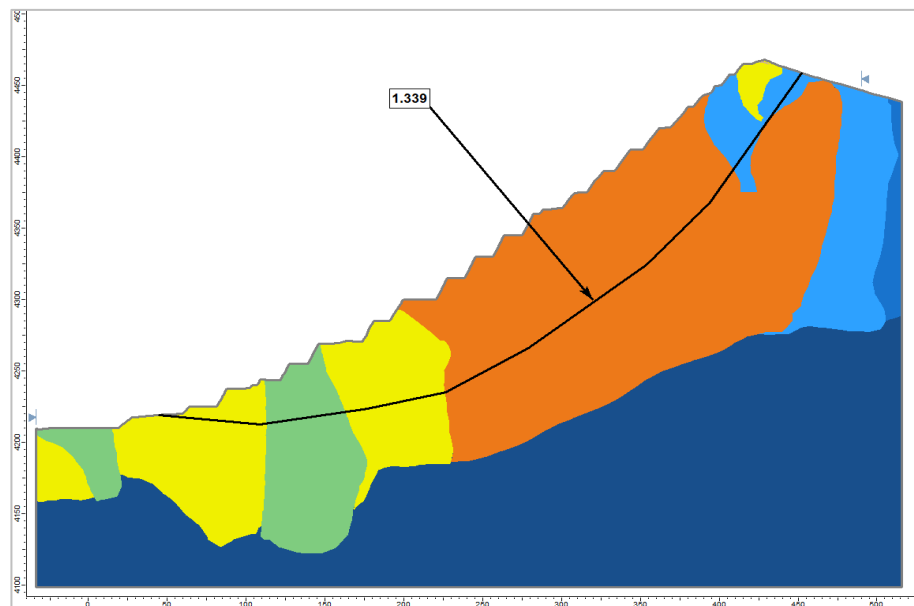
Anexo 3.12

Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 12

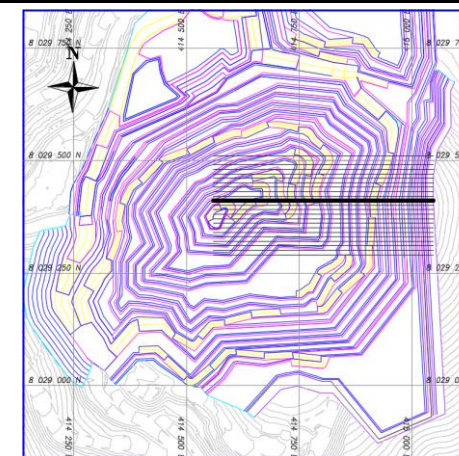


### Anexo 3.13

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 13



| Alteración                         | Color  | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|--------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Blue   | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue   | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Blue   | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown  | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green  | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

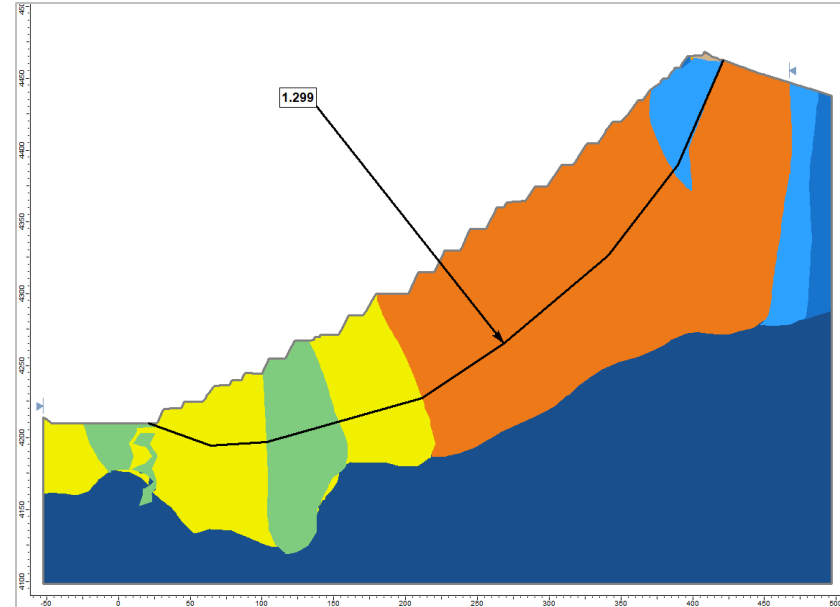
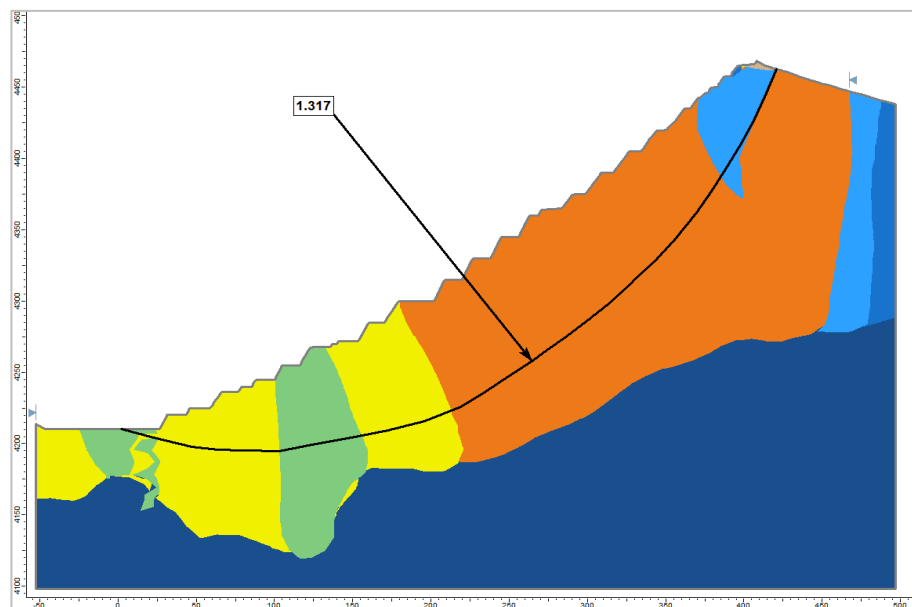
**LAMINA:** SECCION 13



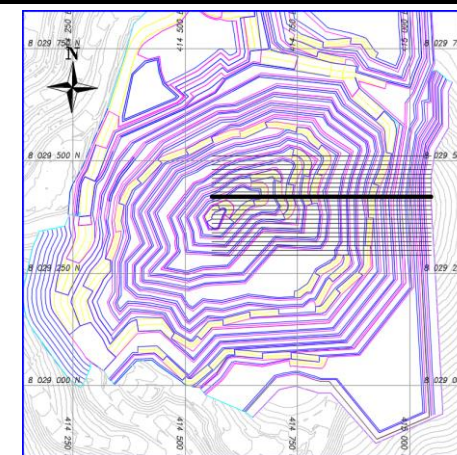
UNIVERSIDAD  
 NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
 DE HUAMANGA

## Anexo 3.14

### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 14



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Light Blue | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

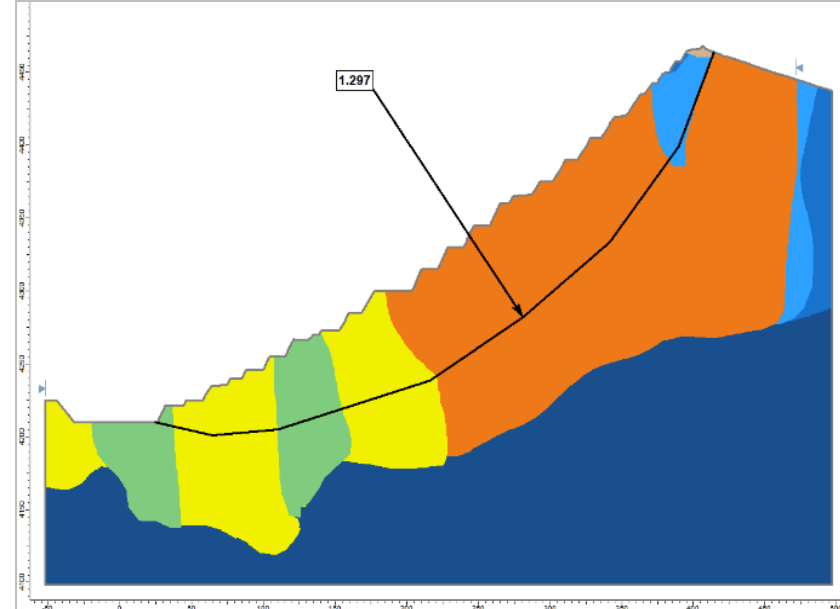
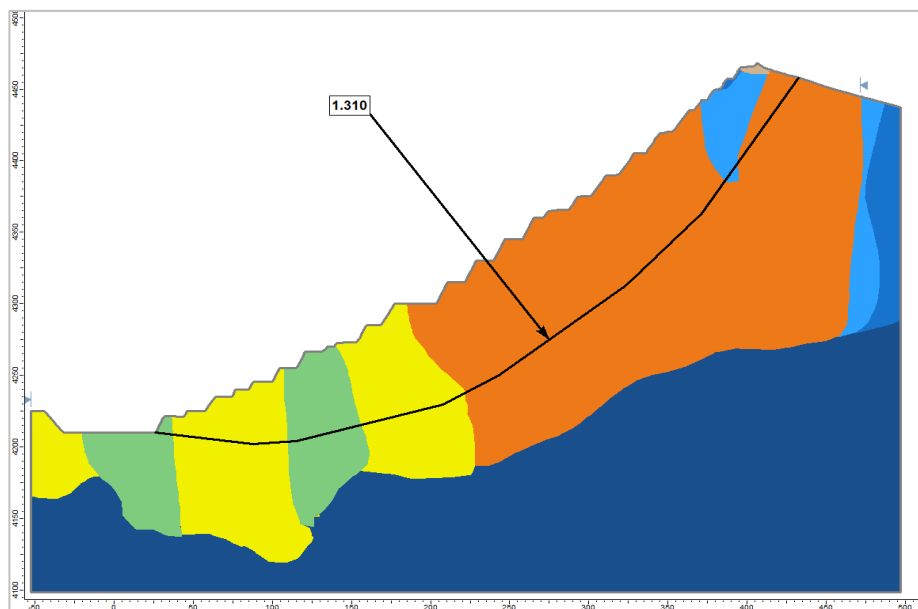
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 14

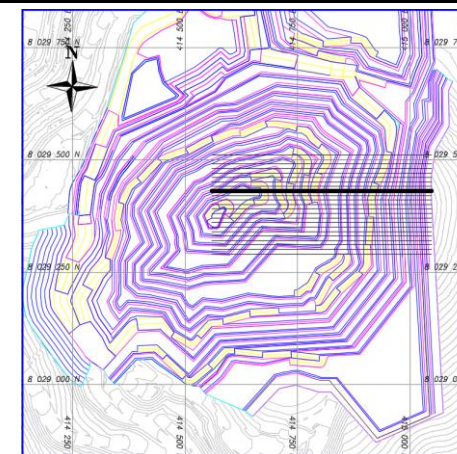


### Anexo 3.15

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 15



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Light Blue | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

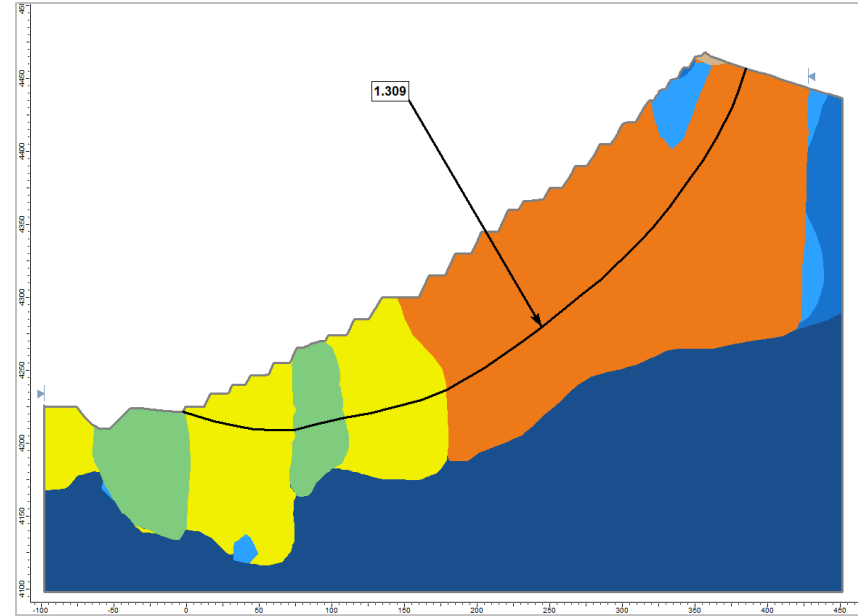
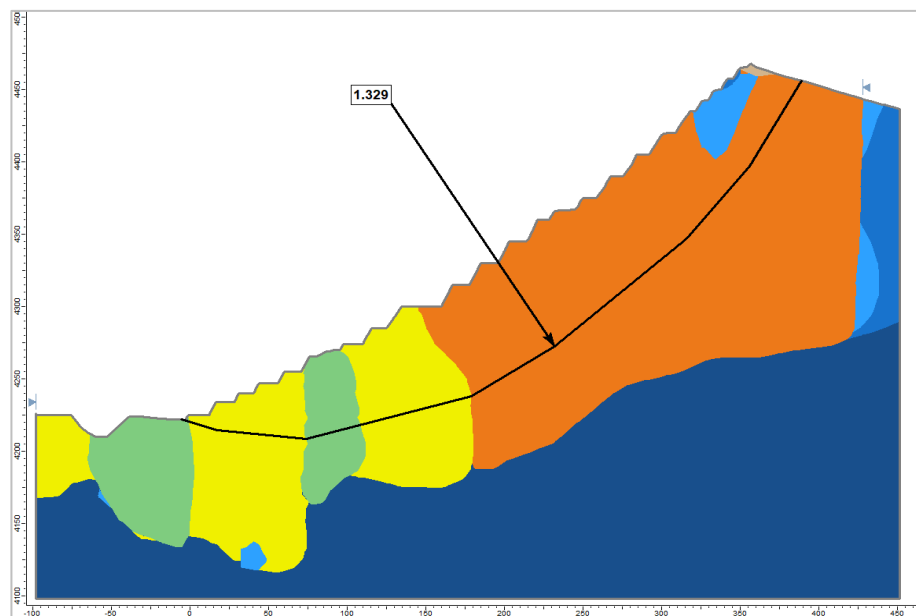
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 15

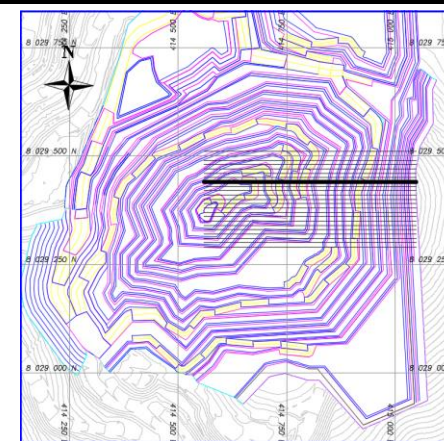


### Anexo 3.16

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 16



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

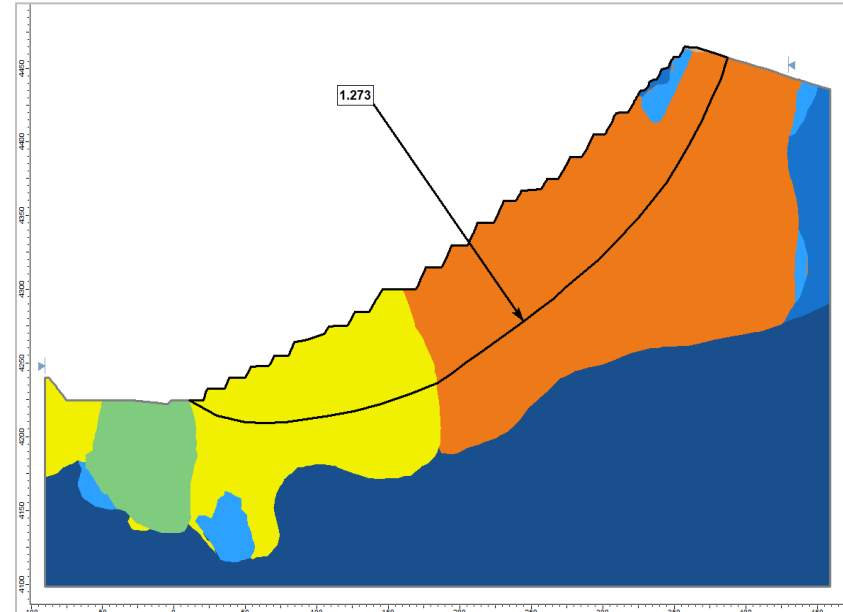
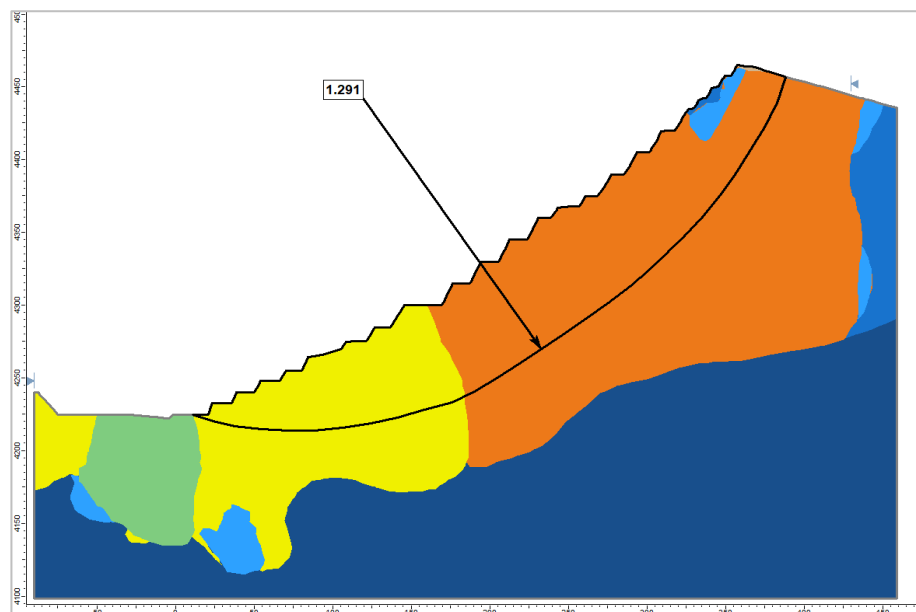
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 16

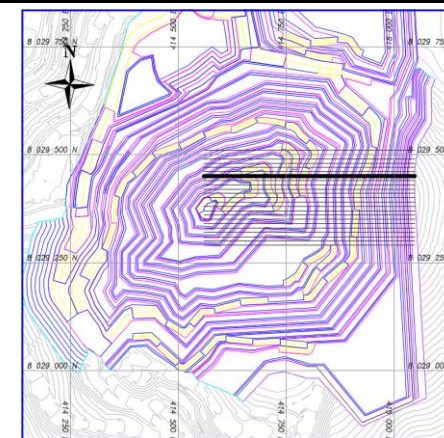


### Anexo 3.17

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 17



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (Sigr) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

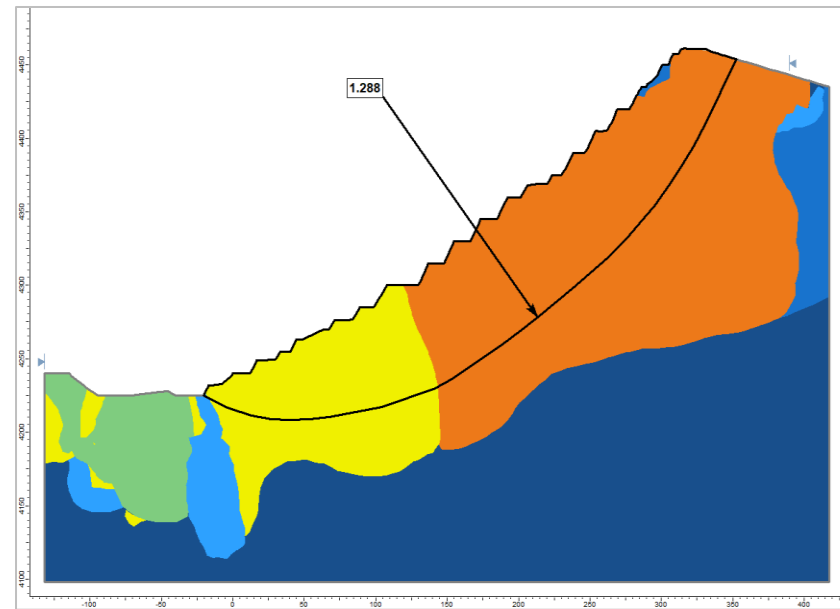
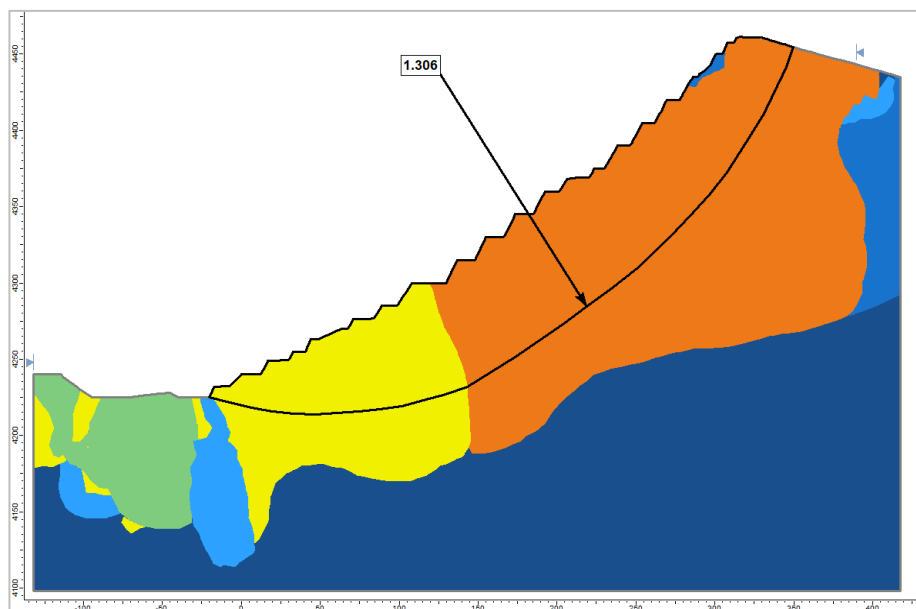
**LAMINA:** SECCION 17



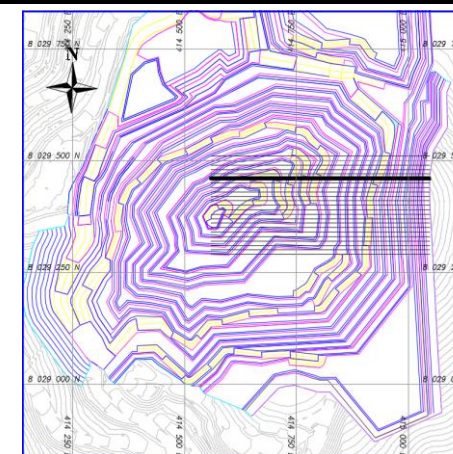
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA

### Anexo 3.18

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 18



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

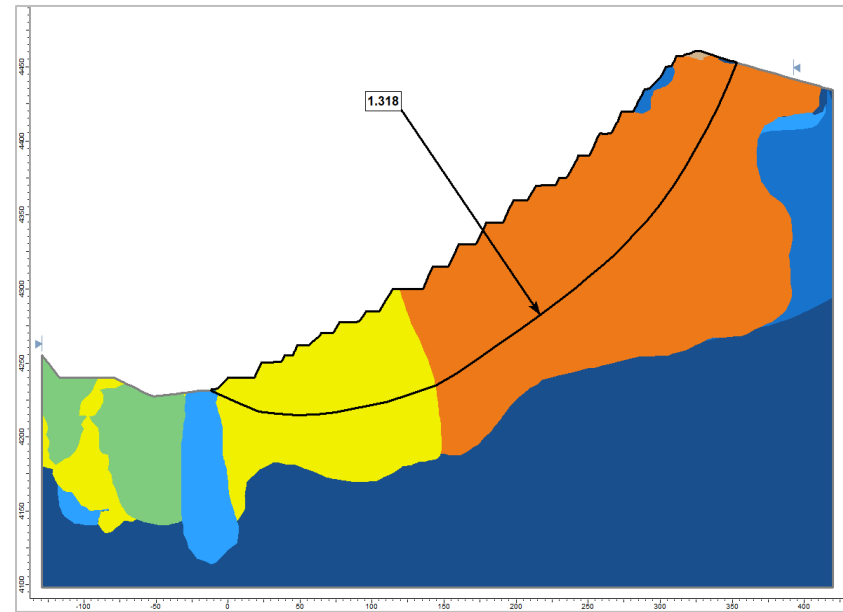
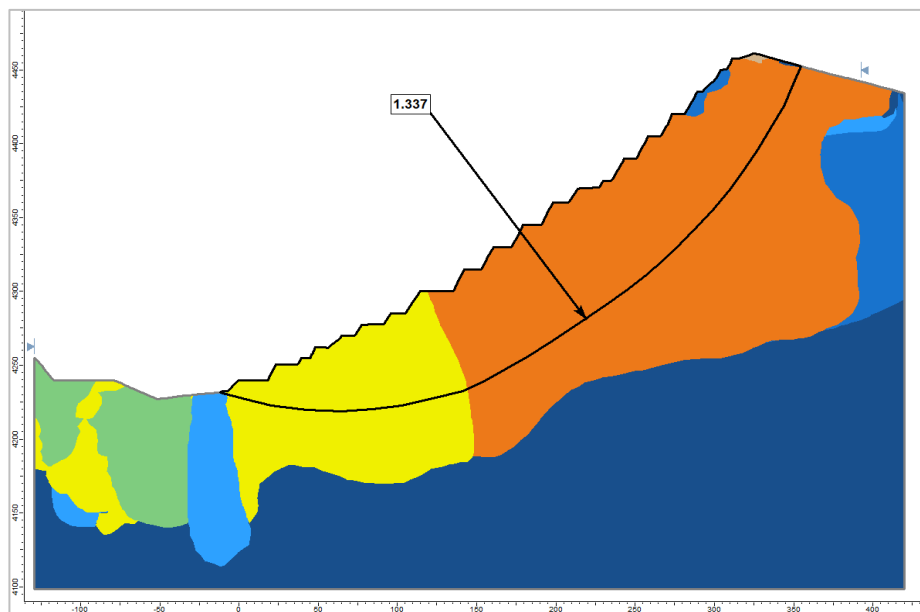
**LAMINA:** SECCION 18



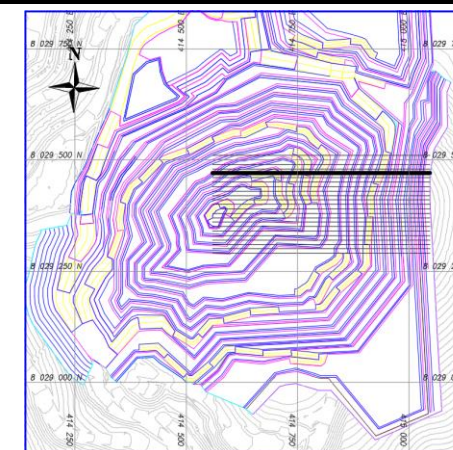
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA

### Anexo 3.19

#### Análisis de estabilidad rotacional estático - sección 19



| Alteración                         | Color  | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|--------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Blue   | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue   | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Blue   | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown  | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green  | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO  
CHECOCOLLO

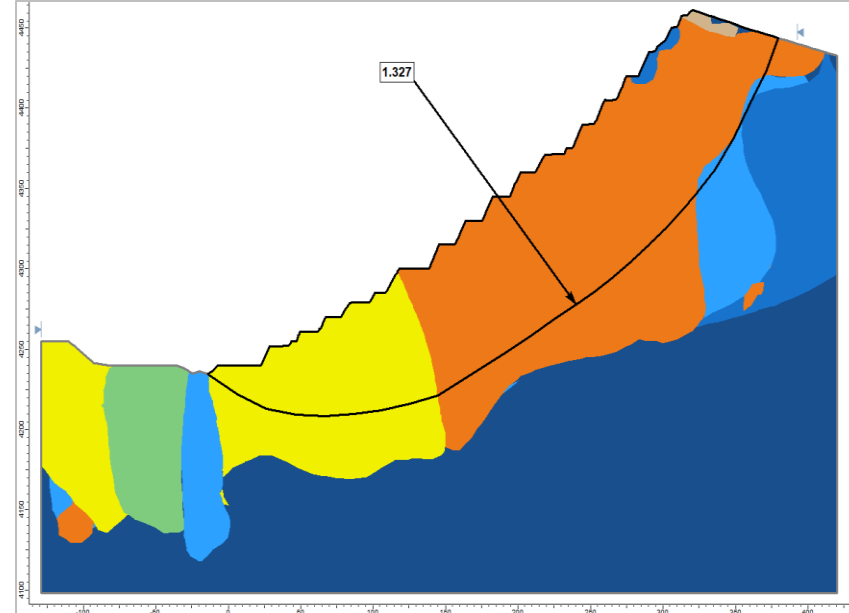
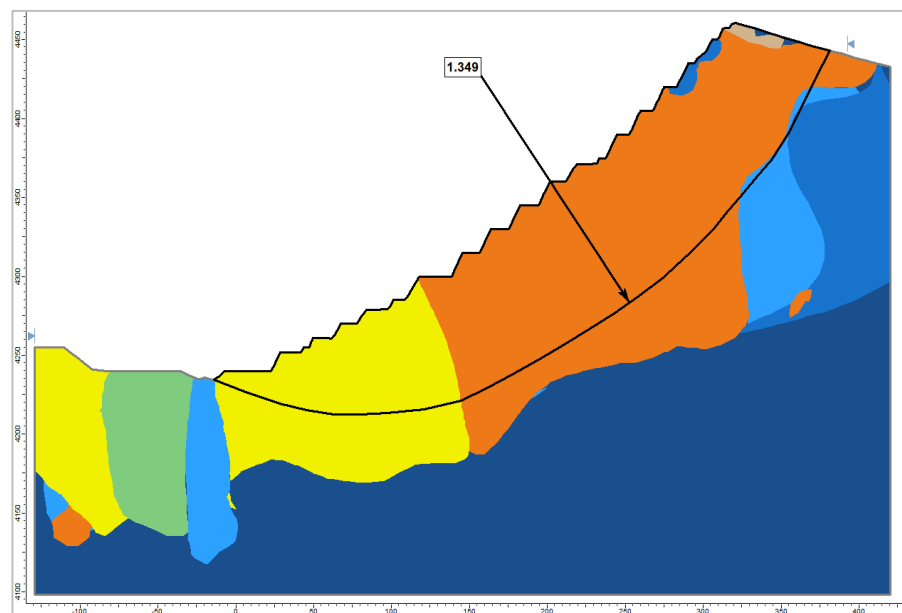
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 19

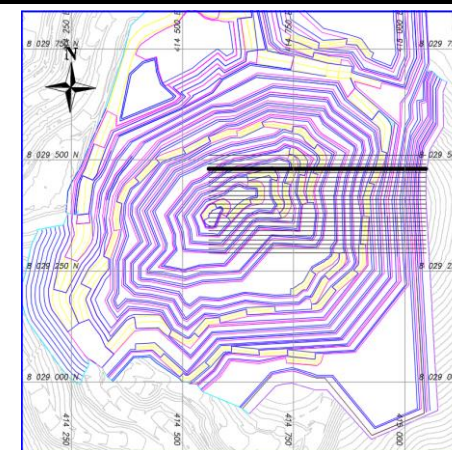


## Anexo 3.20

### Análisis de estabilidad rotacional estático - Sección 20



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO  
**CHECOCOLLO**

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

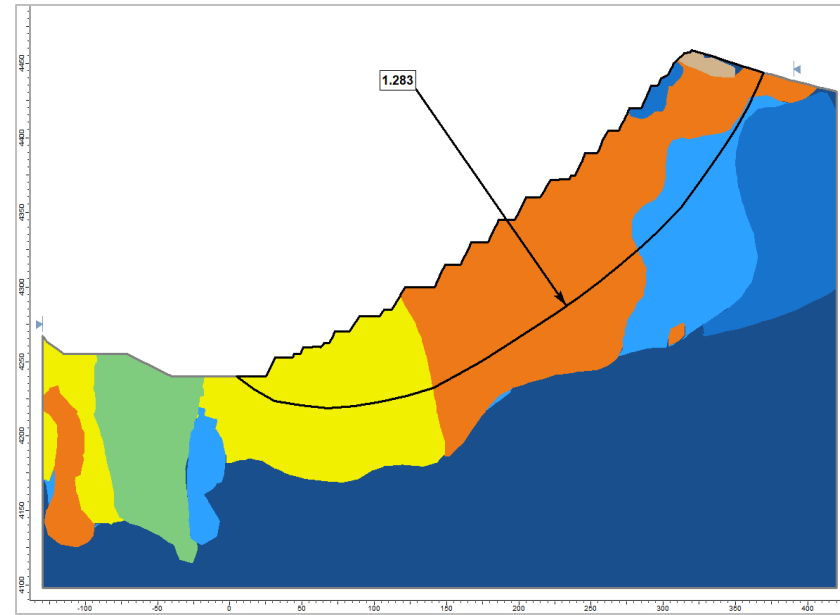
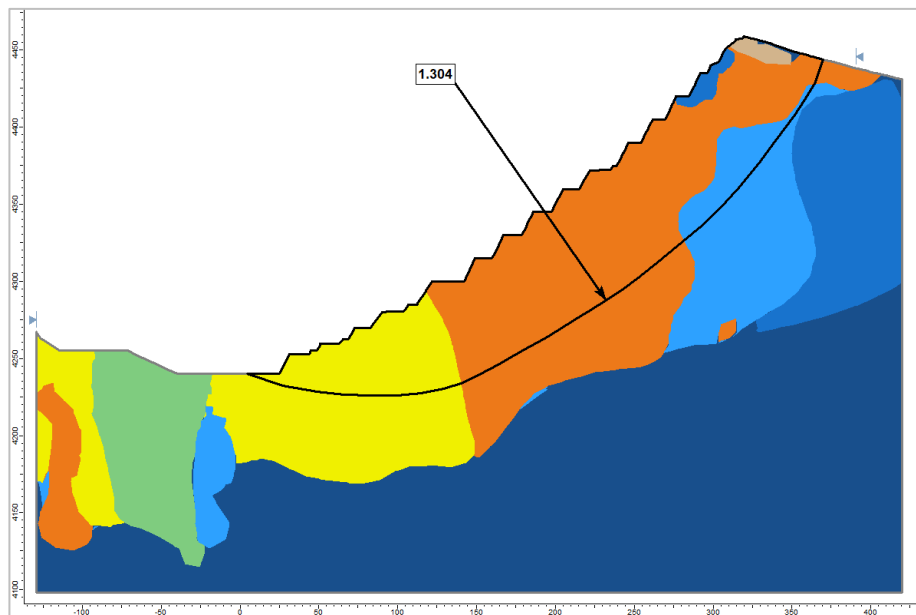
**LAMINA:** SECCION 20



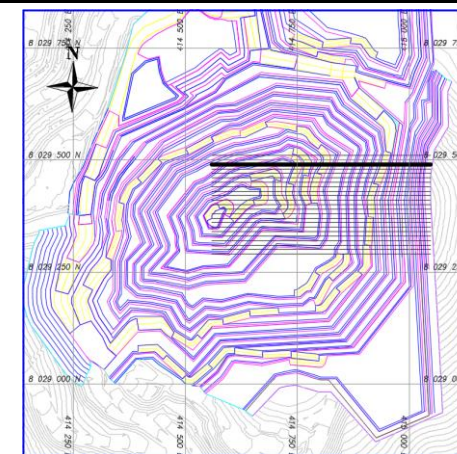
UNIVERSIDAD  
 NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
 DE HUAMANGA

## Anexo 3.21

### Análisis de estabilidad rotacional estático - Sección 21



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

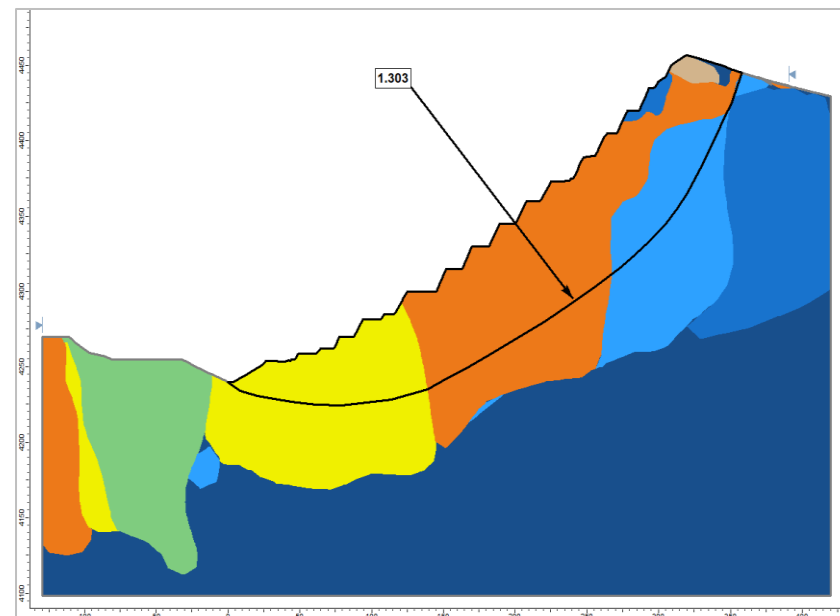
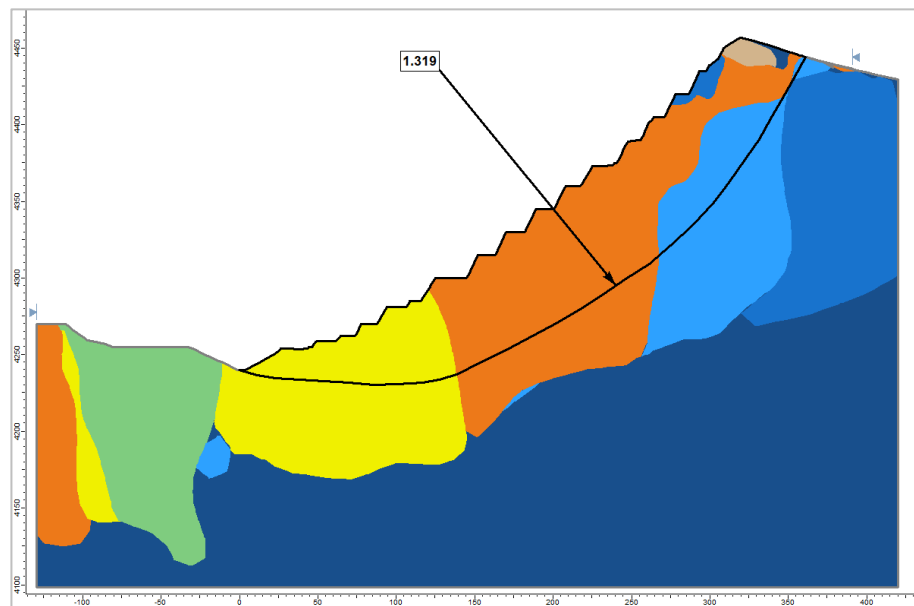
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 21

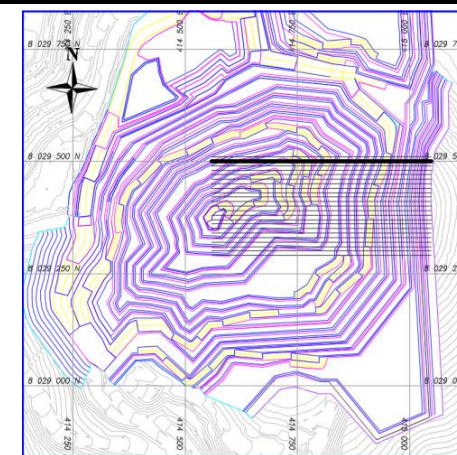


## Anexo 3.22

### Análisis de estabilidad rotacional estático - Sección 22



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer estático, derecha resultados del método de Morgenstern Price estático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO**

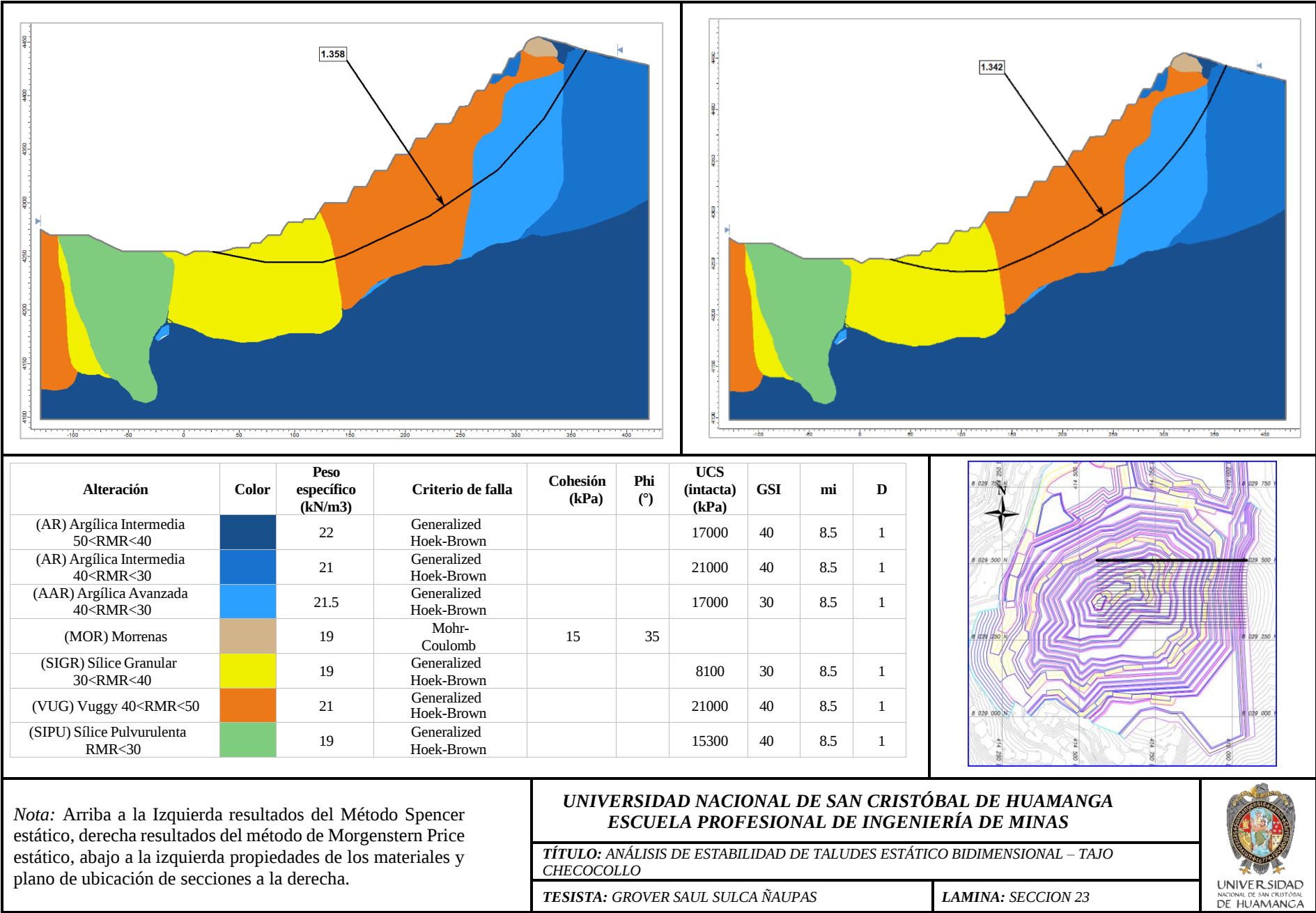
**TESISTA: GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS**

**LAMINA: SECCION 22**



Anexo 3.23

Análisis de estabilidad rotacional estático - Sección 23

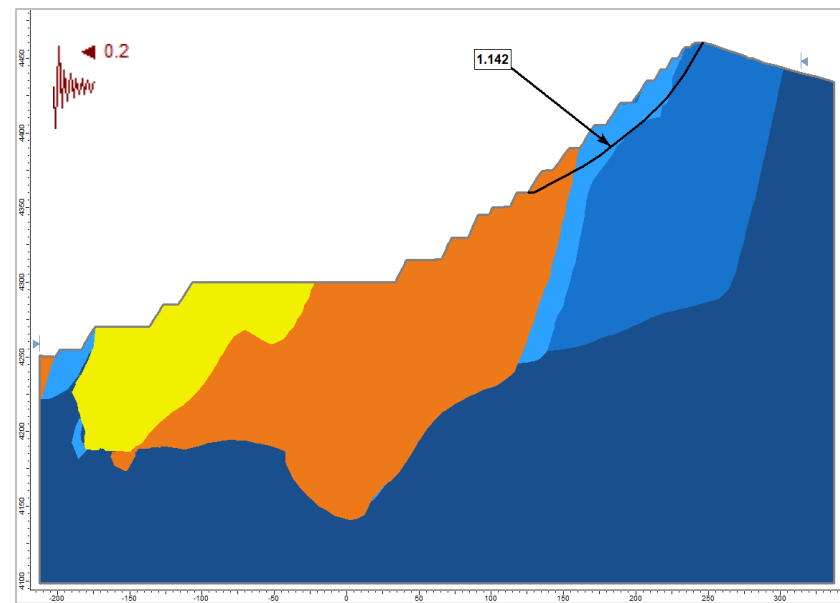
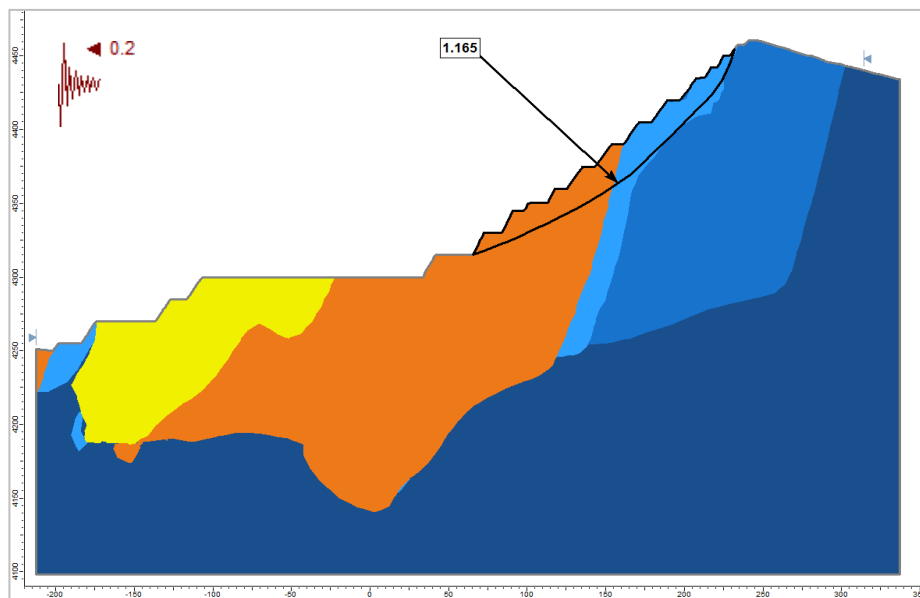


#### **Anexo 4.0**

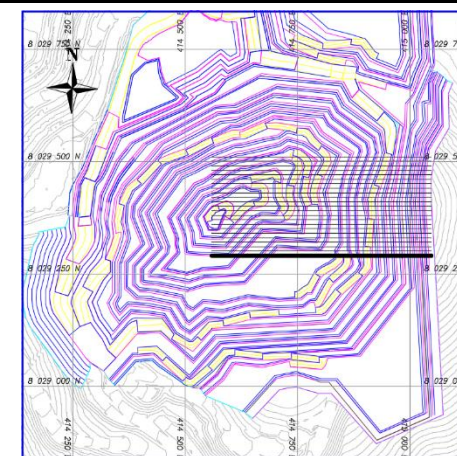
*Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático*

## Anexo 4.1

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 01



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Light Blue | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático,, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

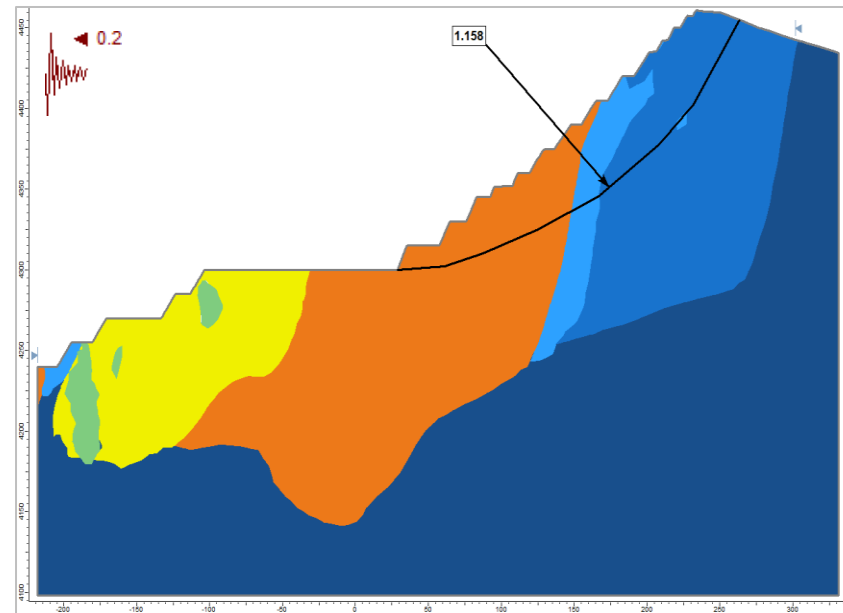
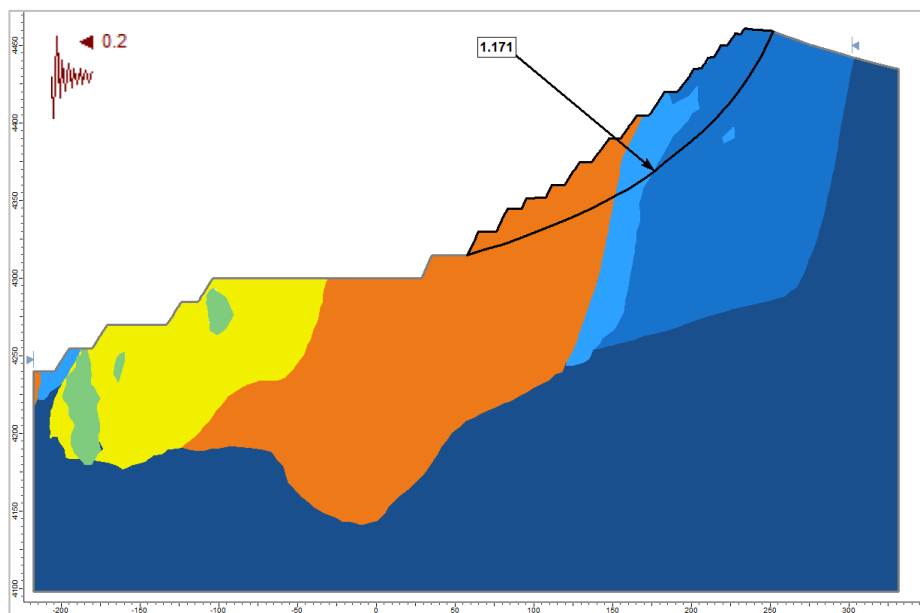
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 01

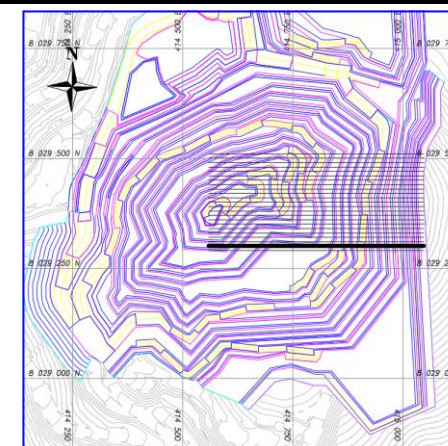


## Anexo 4.2

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 02



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Light Blue | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Orange     | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

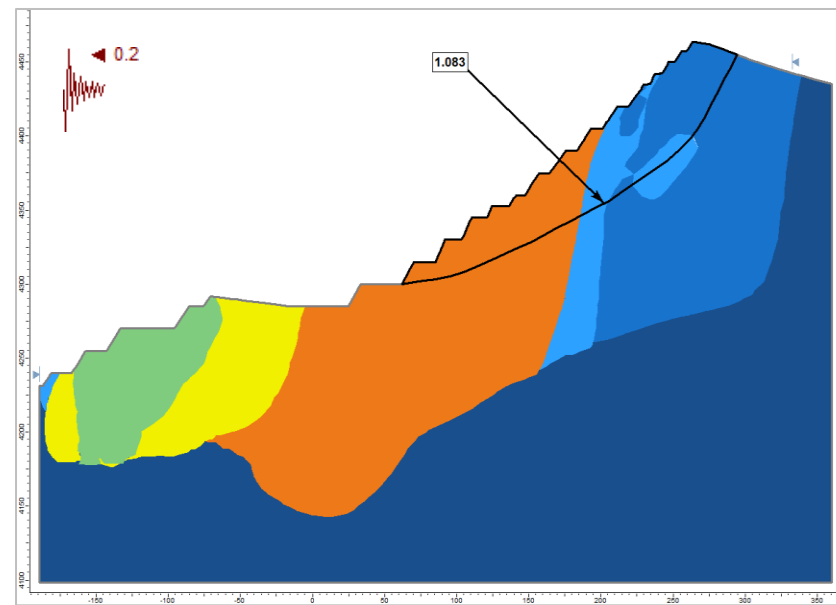
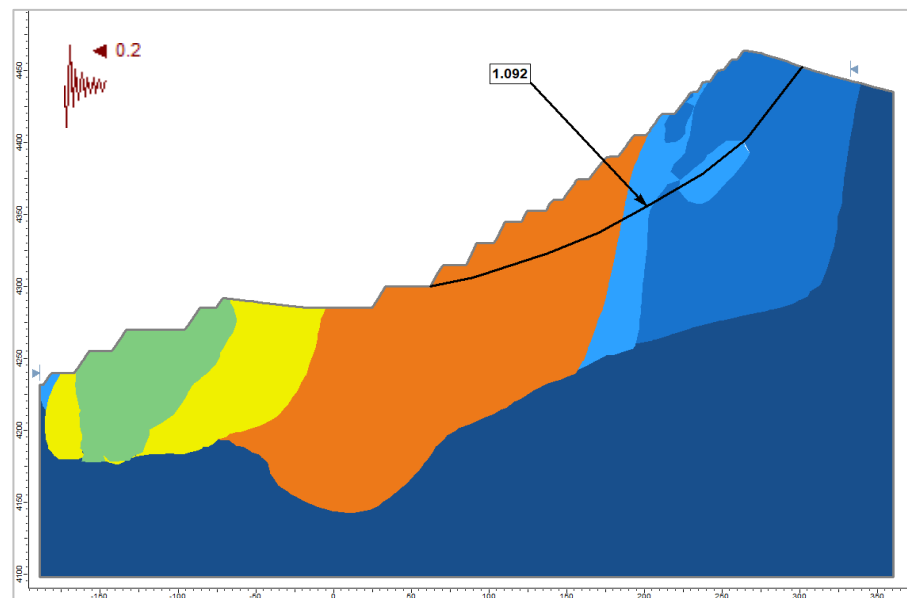
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 02

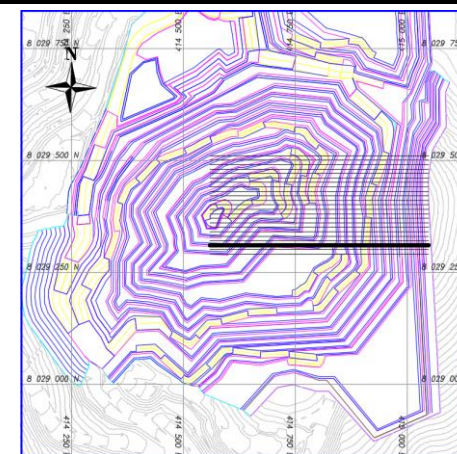


### Anexo 4.3

#### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 03



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

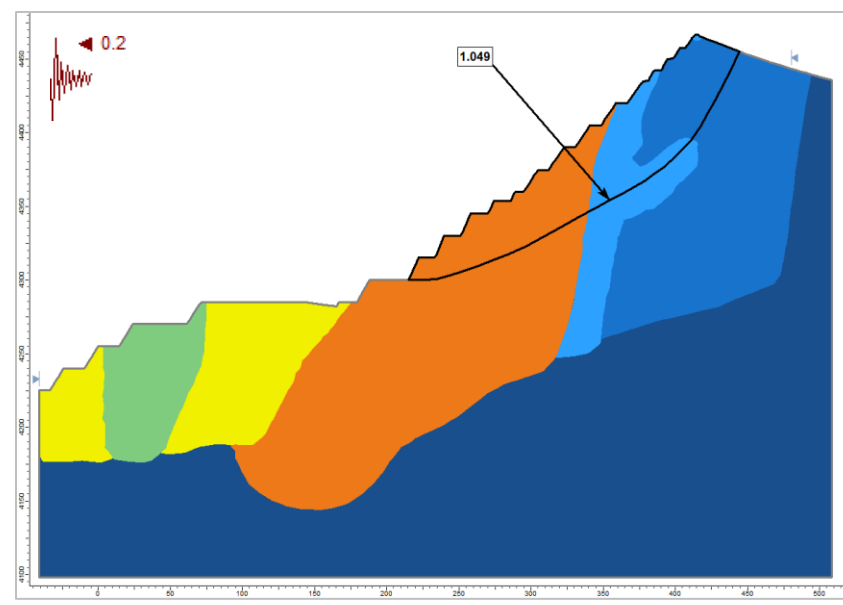
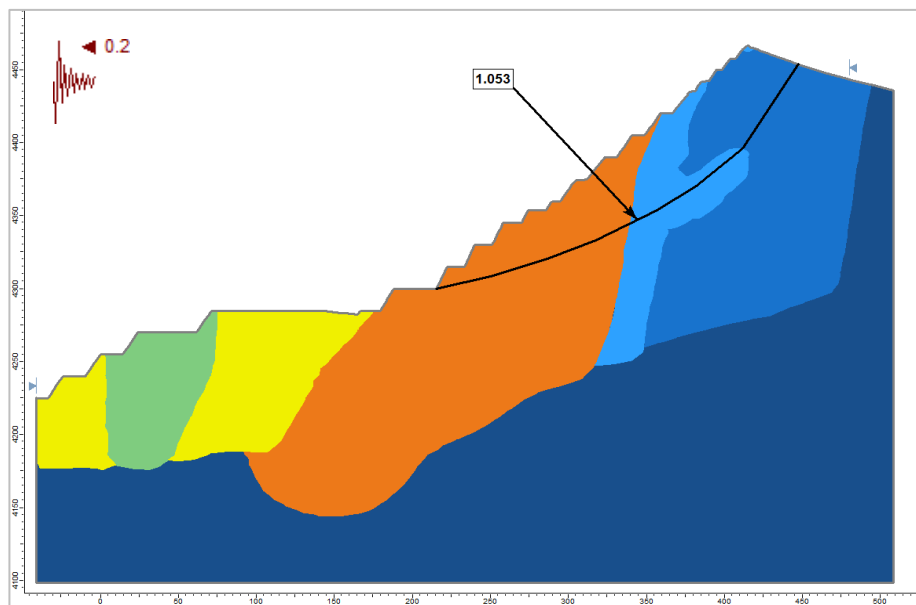
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 03

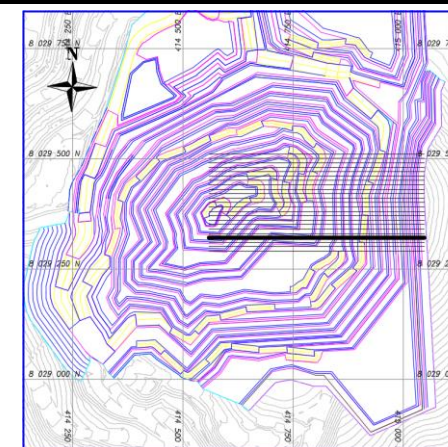


## Anexo 4.4

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 04



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

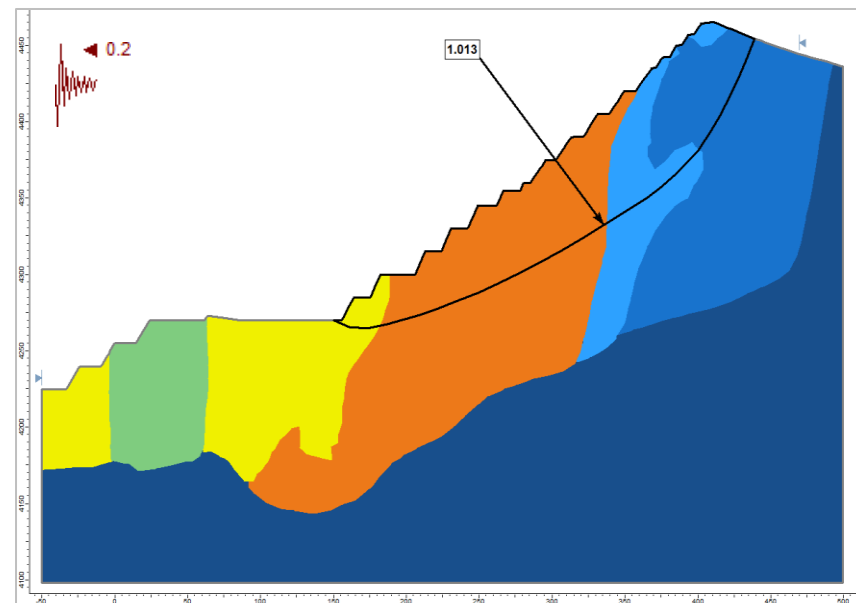
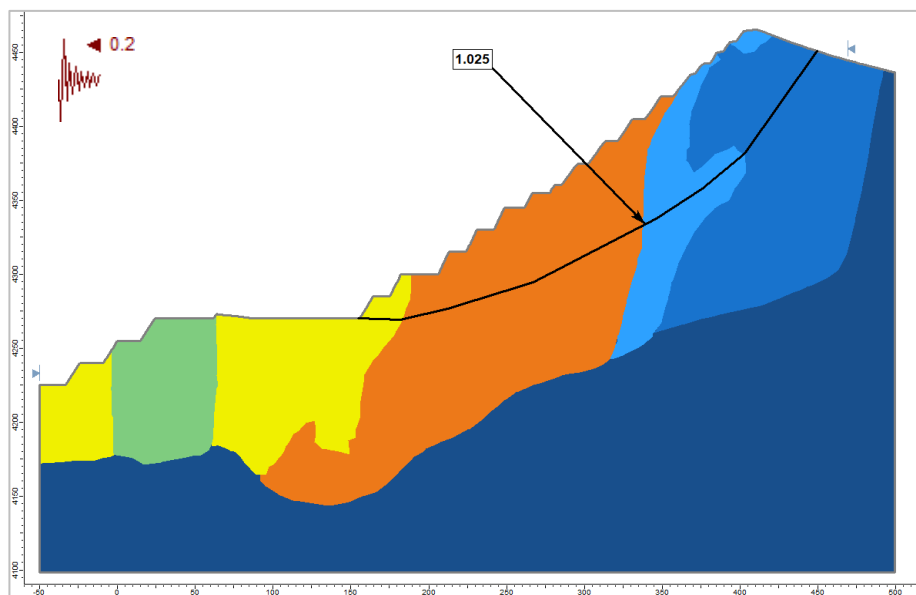
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 04

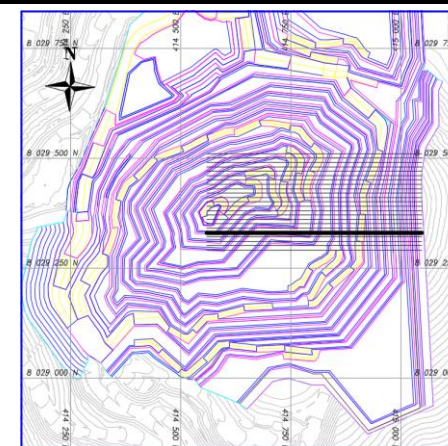


## Anexo 4.5

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 05



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Light Blue | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

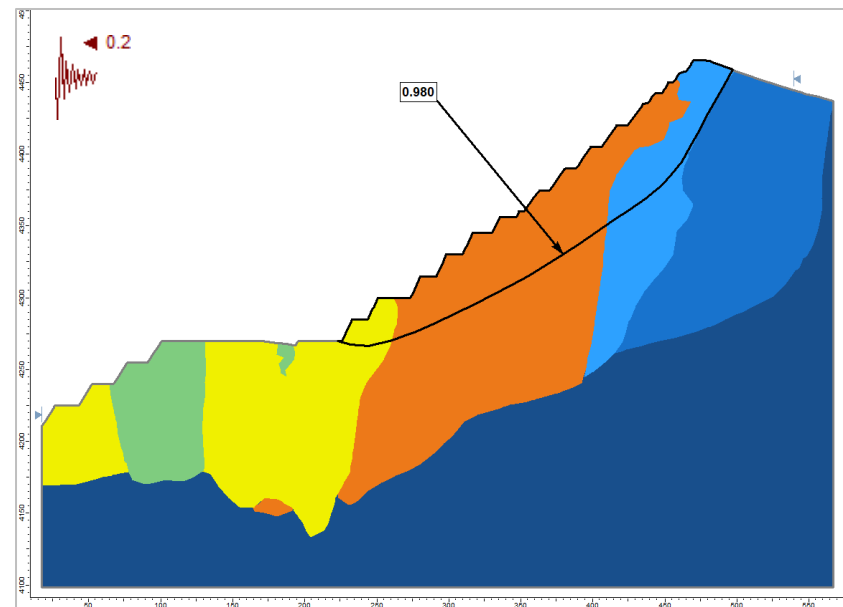
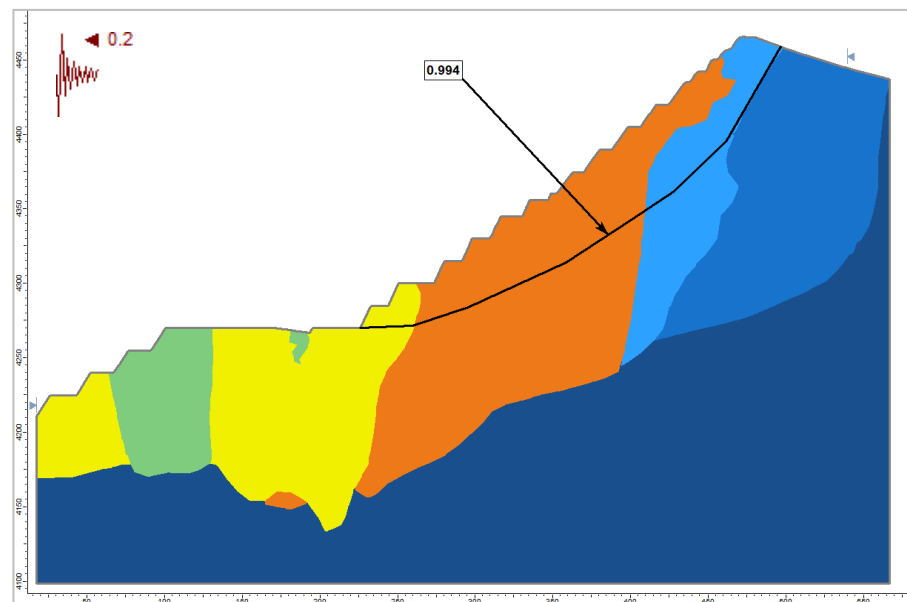
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 05

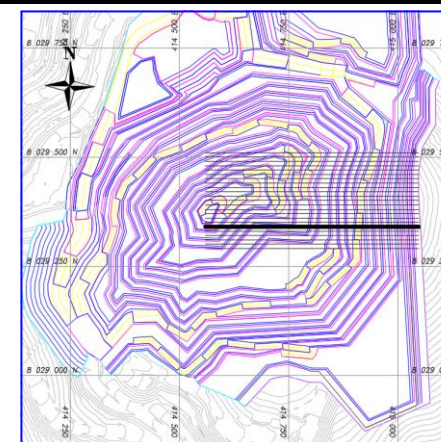


## Anexo 4.6

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 06



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO**

**TESISTA: GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS**

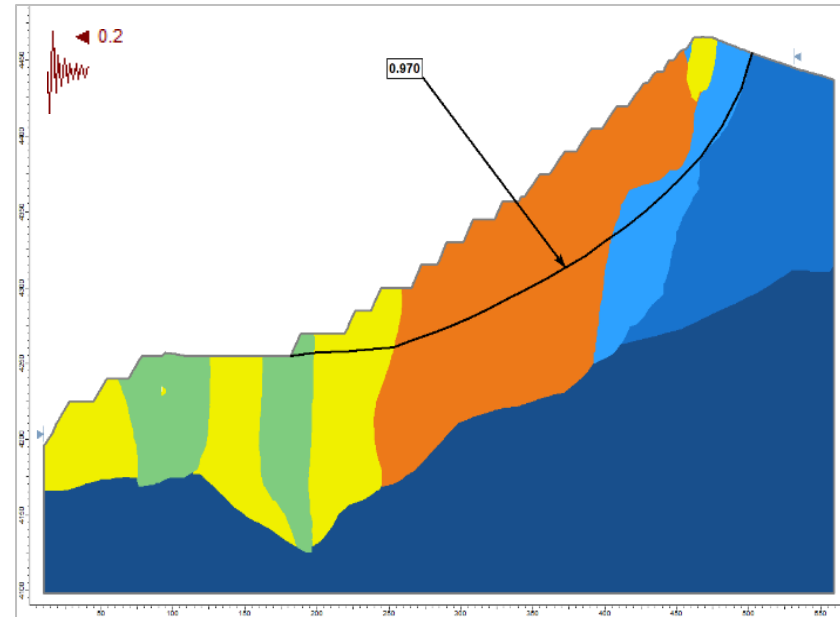
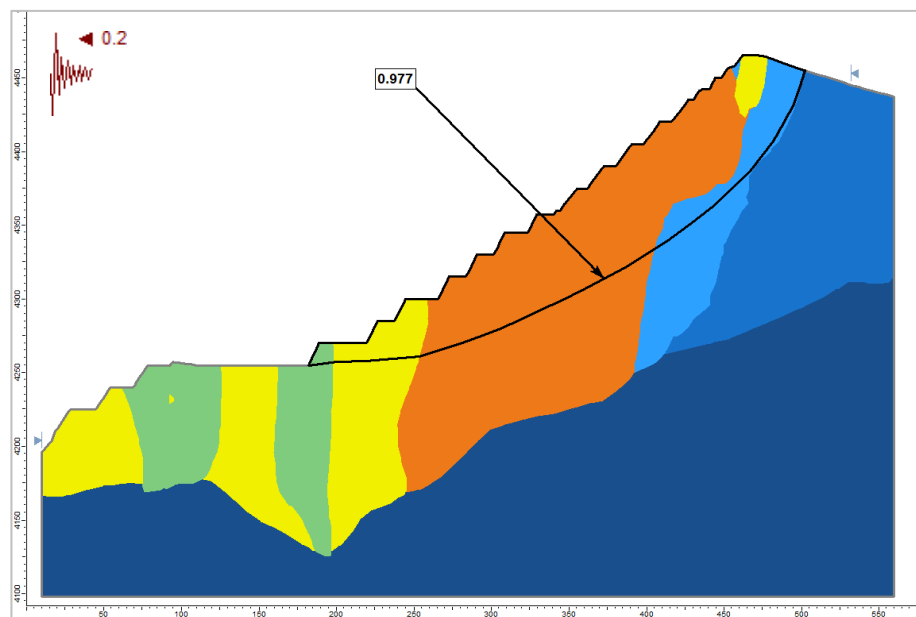
**LAMINA: SECCION 06**



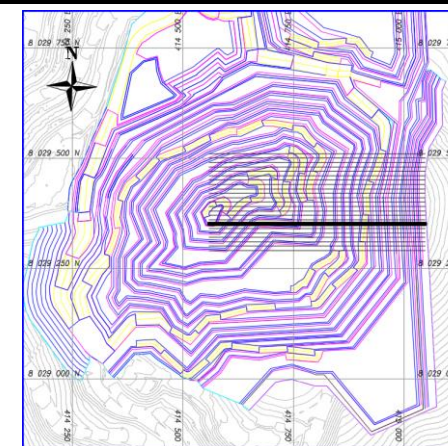
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA

## Anexo 4.7

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 07



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

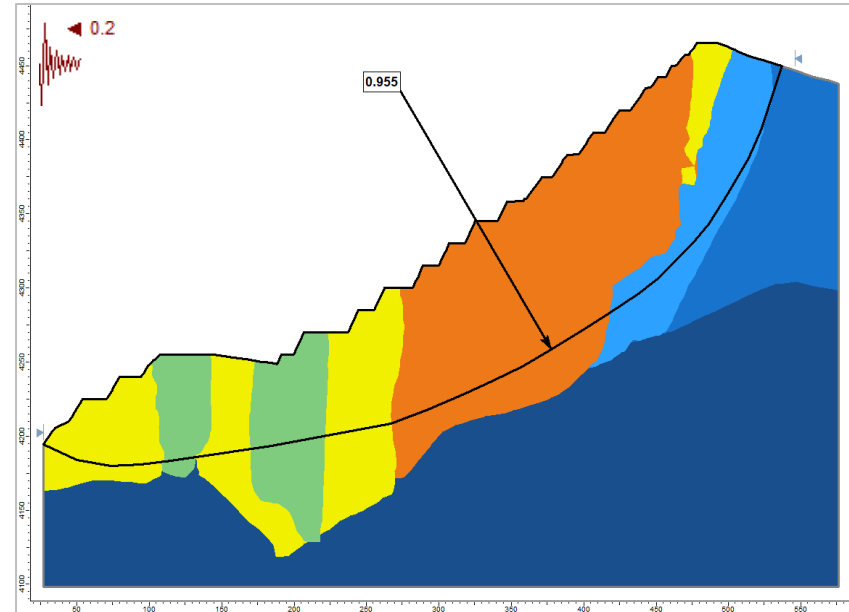
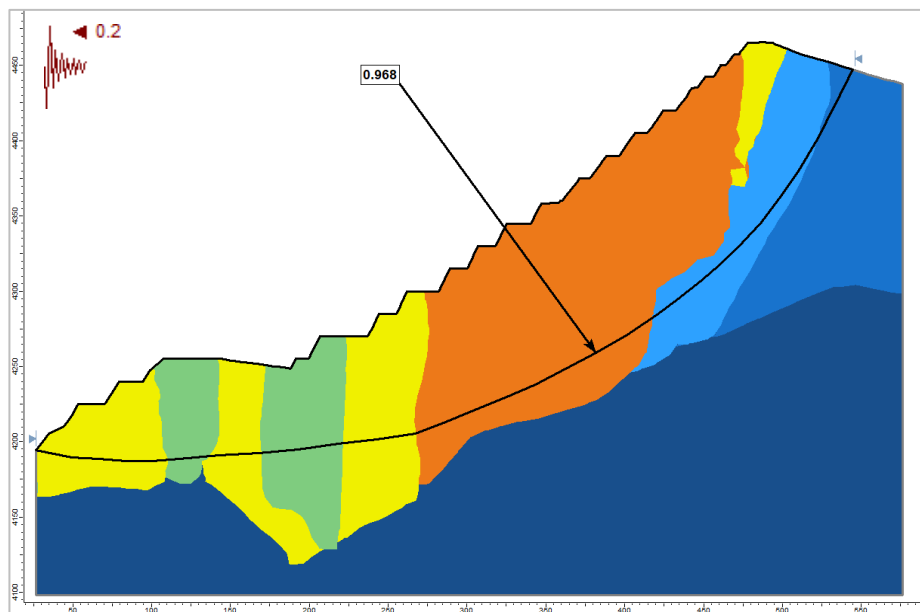
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 07

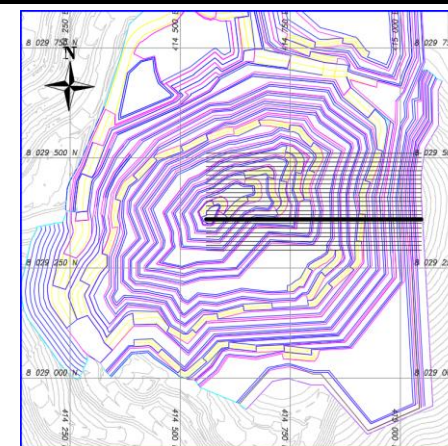


## Anexo 4.8

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 08



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Light Blue | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Orange     | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

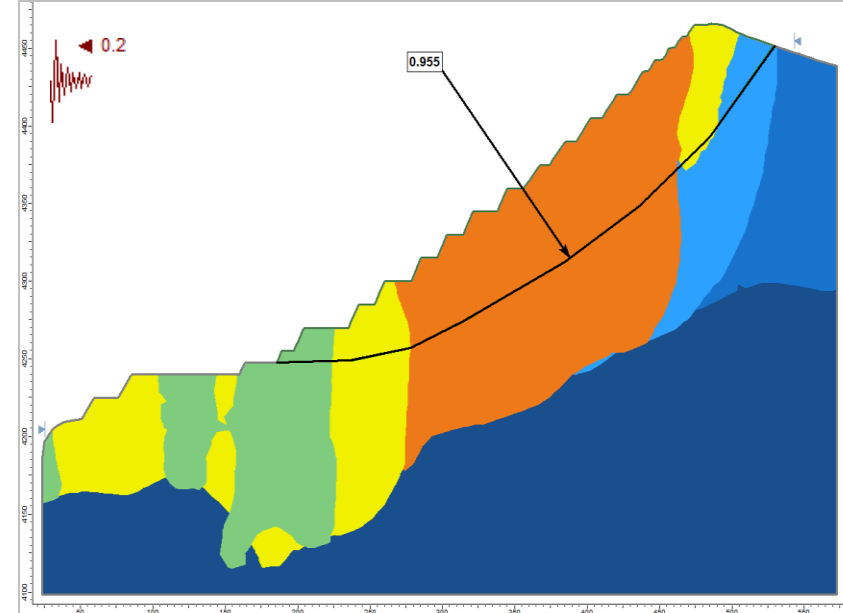
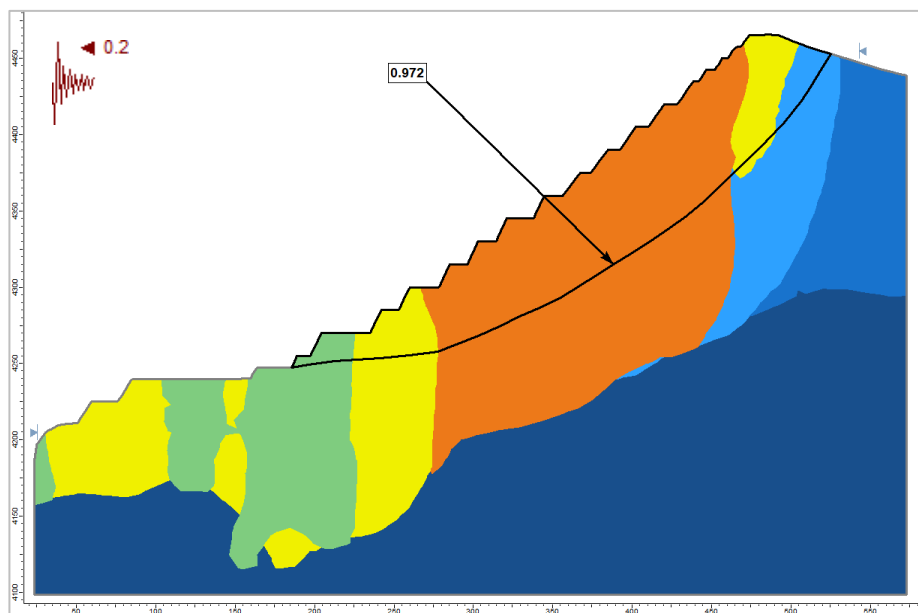
**LAMINA:** SECCION 08



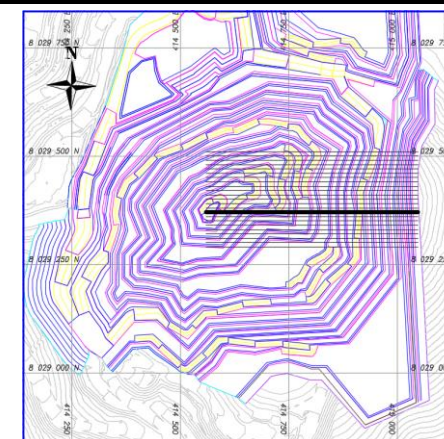
UNIVERSIDAD  
 NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
 DE HUAMANGA

## Anexo 4.1

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 09



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvulenta RMR<30    |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

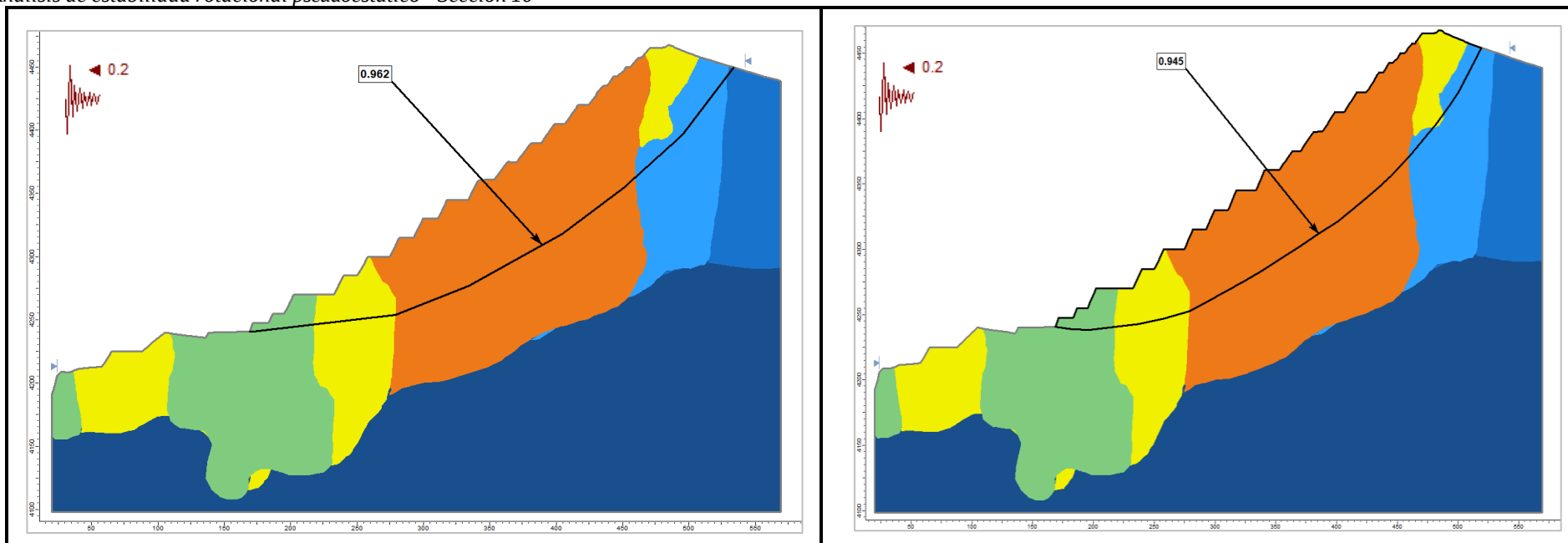
**LAMINA:** SECCION 09



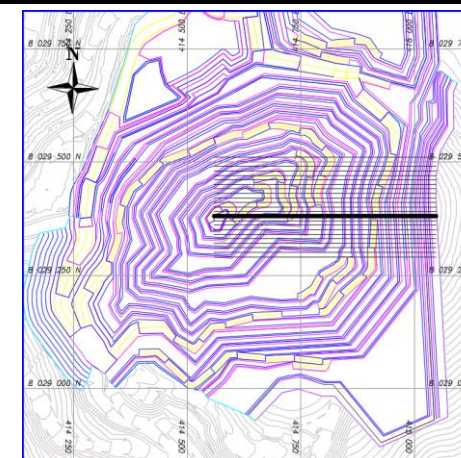
UNIVERSIDAD  
 NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
 DE HUAMANGA

## Anexo 4.10

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 10



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

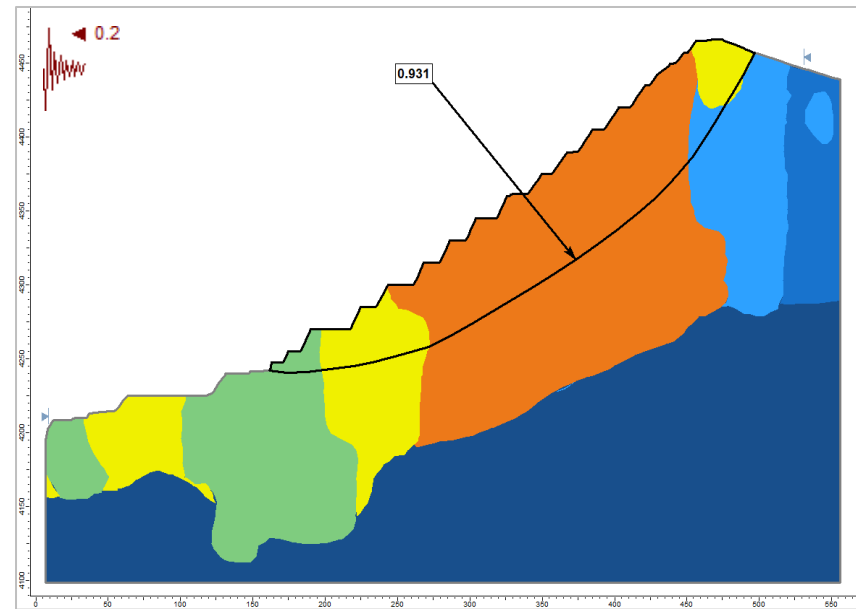
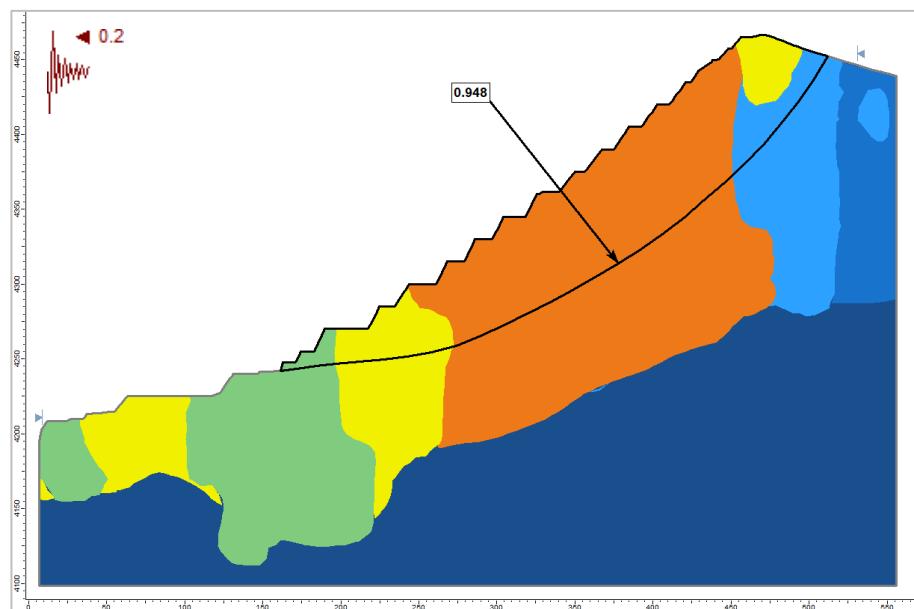
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 10

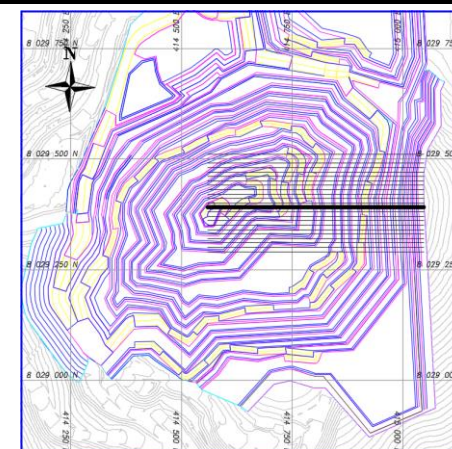


## Anexo 4.11

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 11



| Alteración                         | Color      | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Dark Blue  | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Light Blue | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown      | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow     | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange     | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green      | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

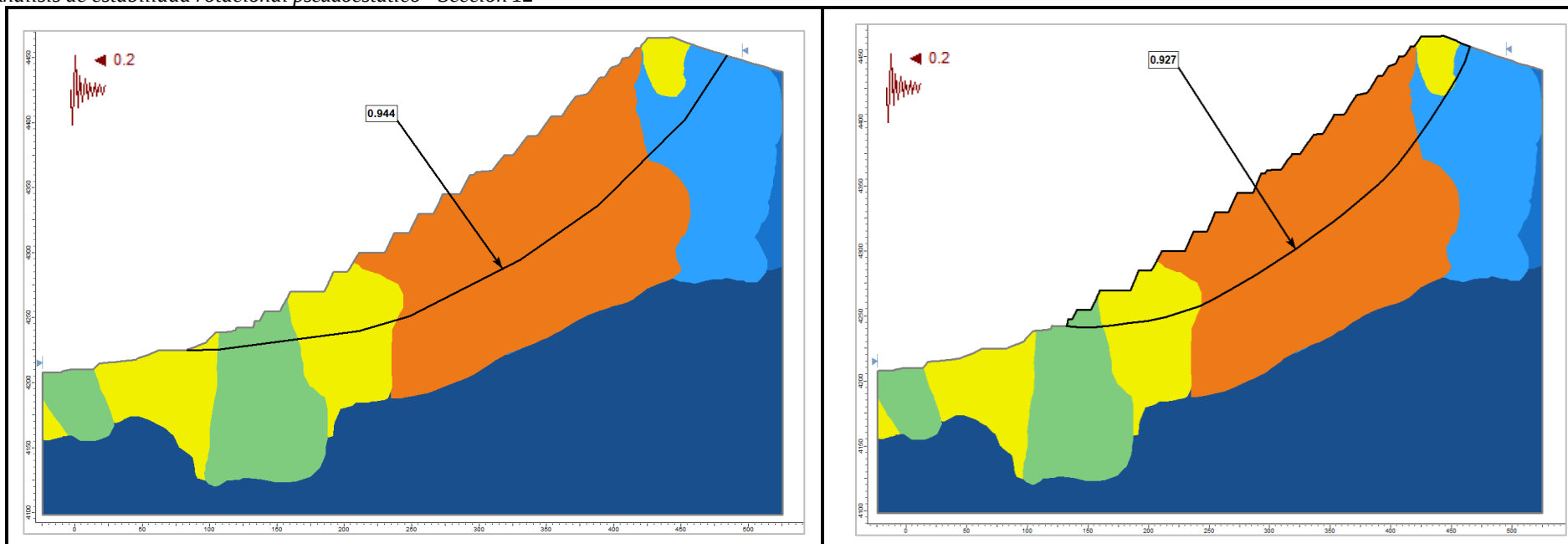
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 11

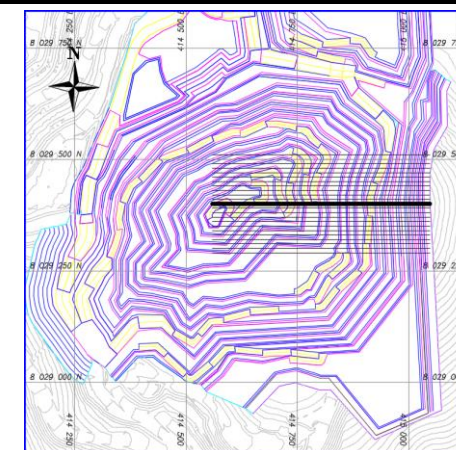


## Anexo 4.12

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 12



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (Sigr) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulverulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



*Nota:* Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

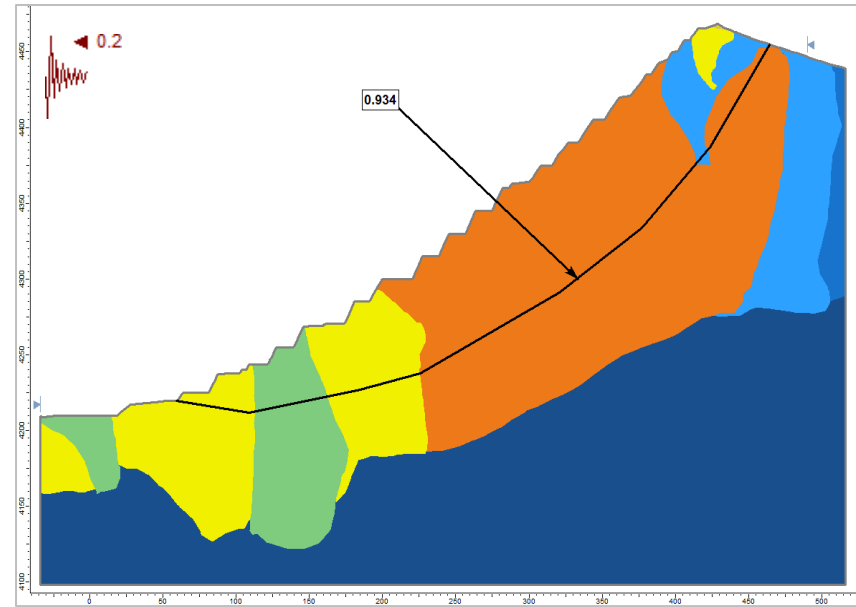
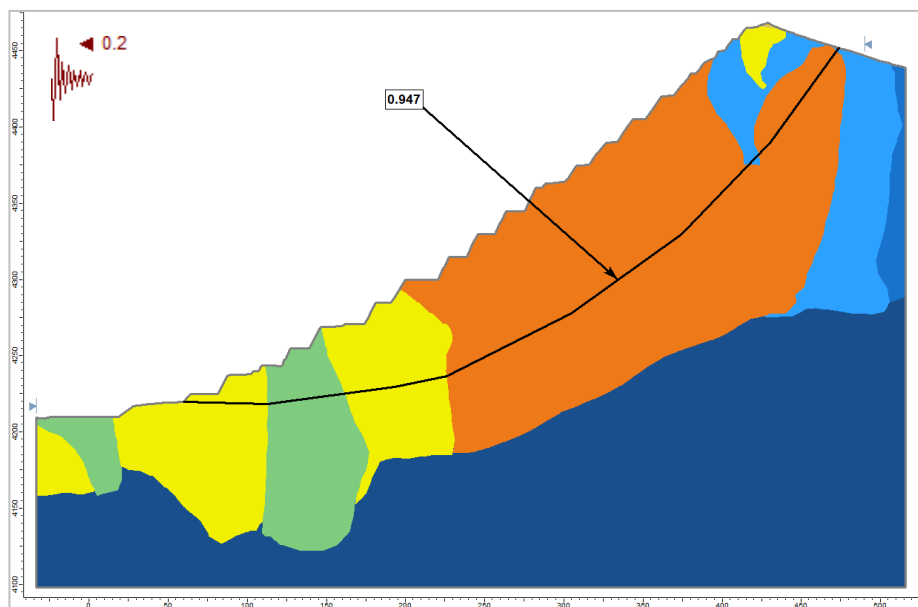
**LAMINA:** SECCION 12



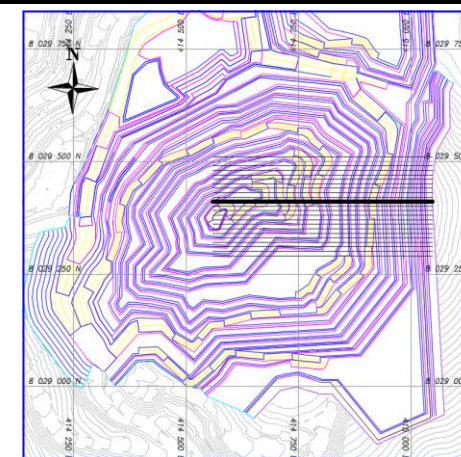
UNIVERSIDAD  
 NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
 DE HUAMANGA

## Anexo 4.13

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 13



| Alteración                         | Color  | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|--------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 | Blue   | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 | Blue   | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  | Blue   | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     | Brown  | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   | Yellow | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              | Orange | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  | Green  | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

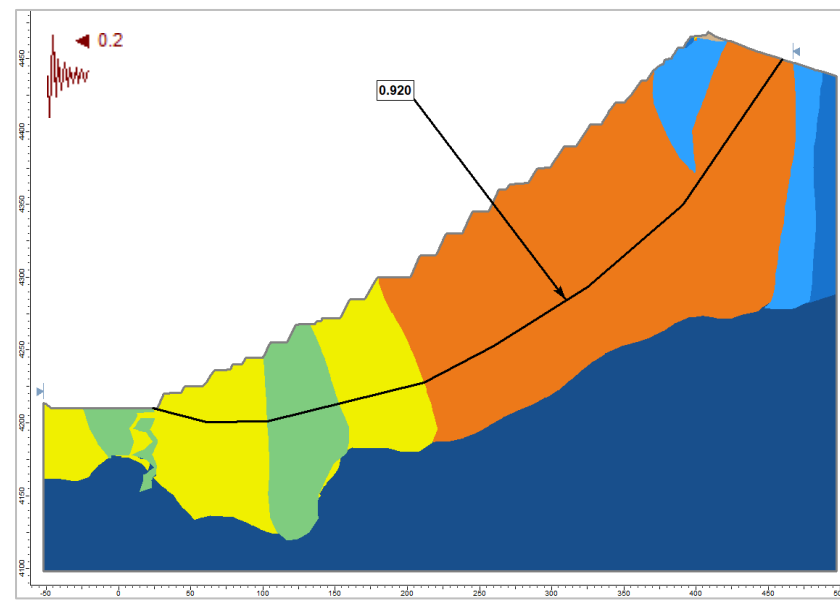
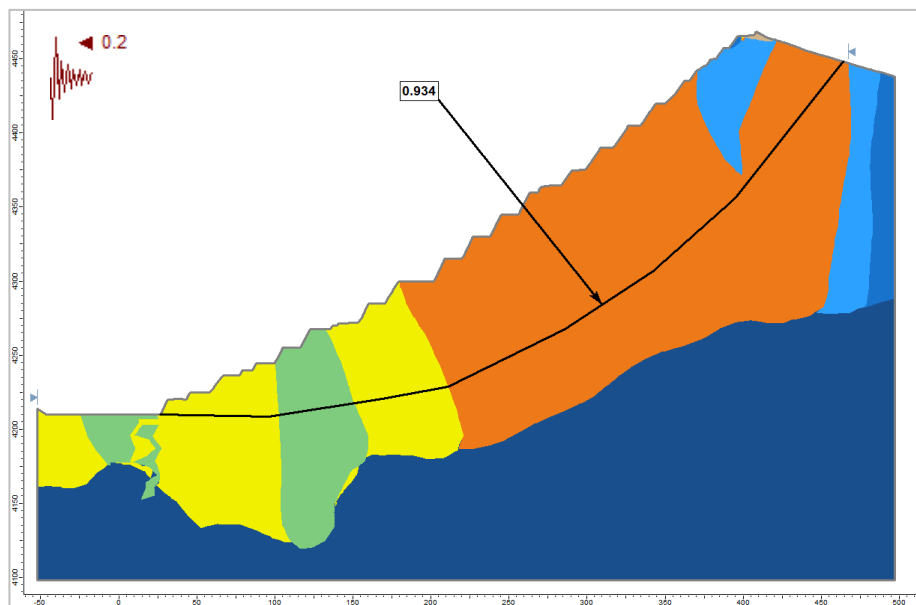
**LAMINA:** SECCION 13



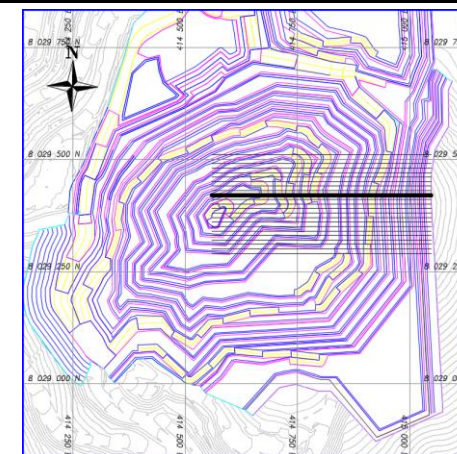
UNIVERSIDAD  
 NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
 DE HUAMANGA

## Anexo 4.14

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 14



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

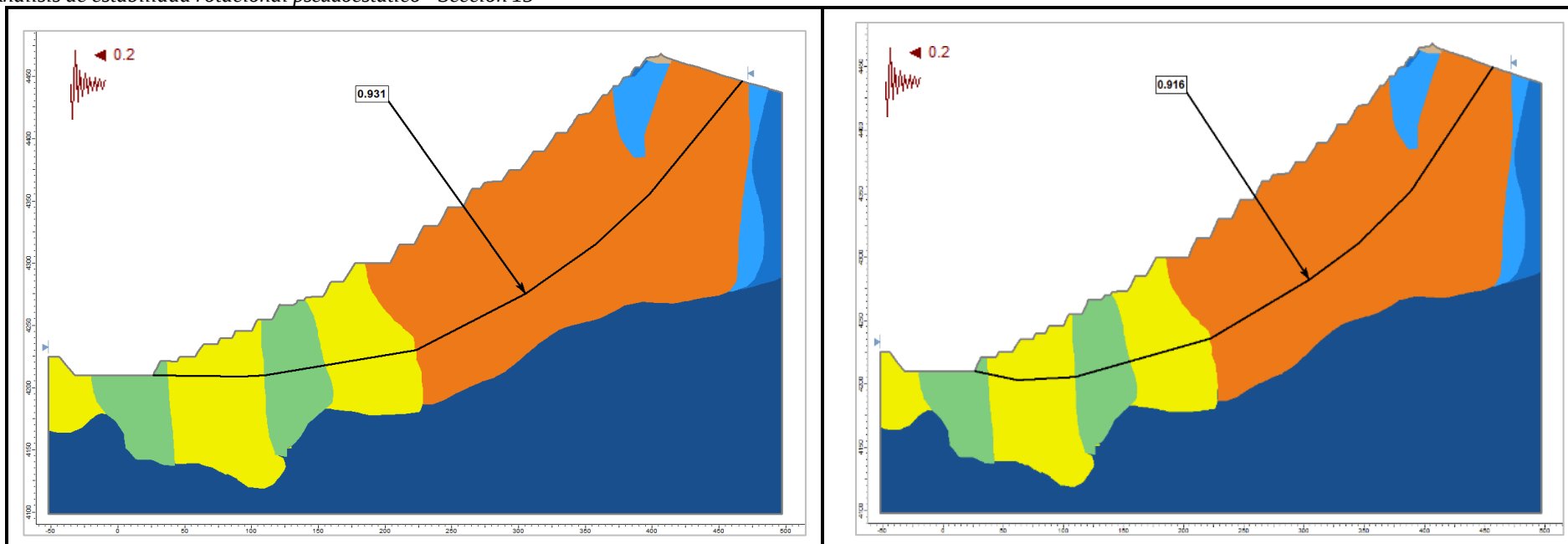
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 14

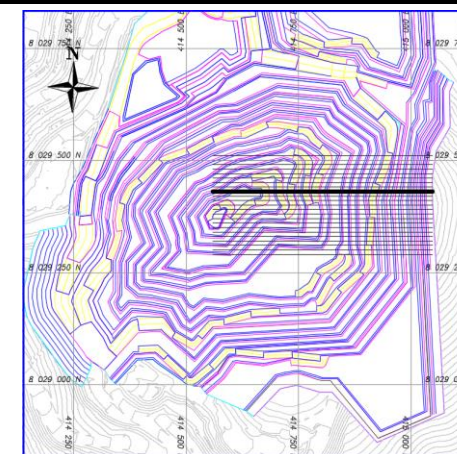


## Anexo 4.15

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 15



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (Sigr) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO

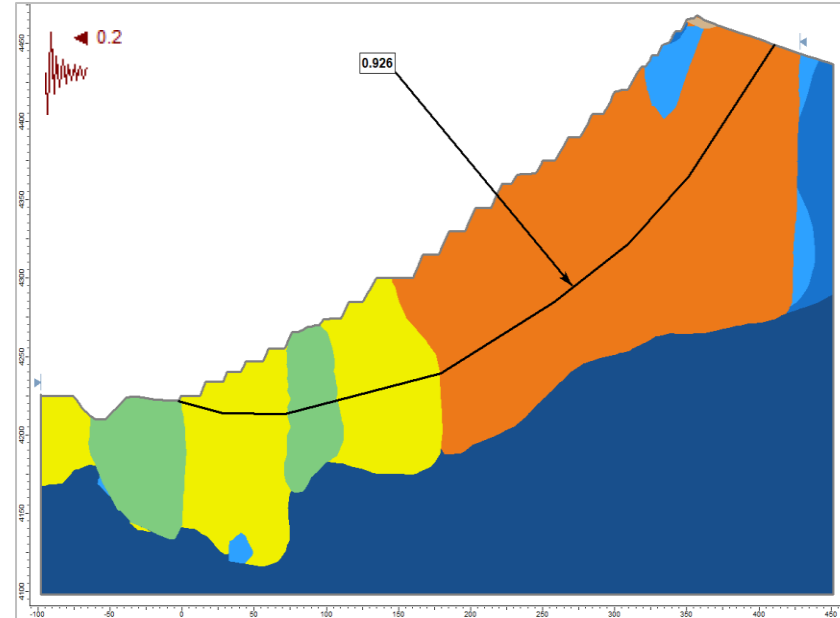
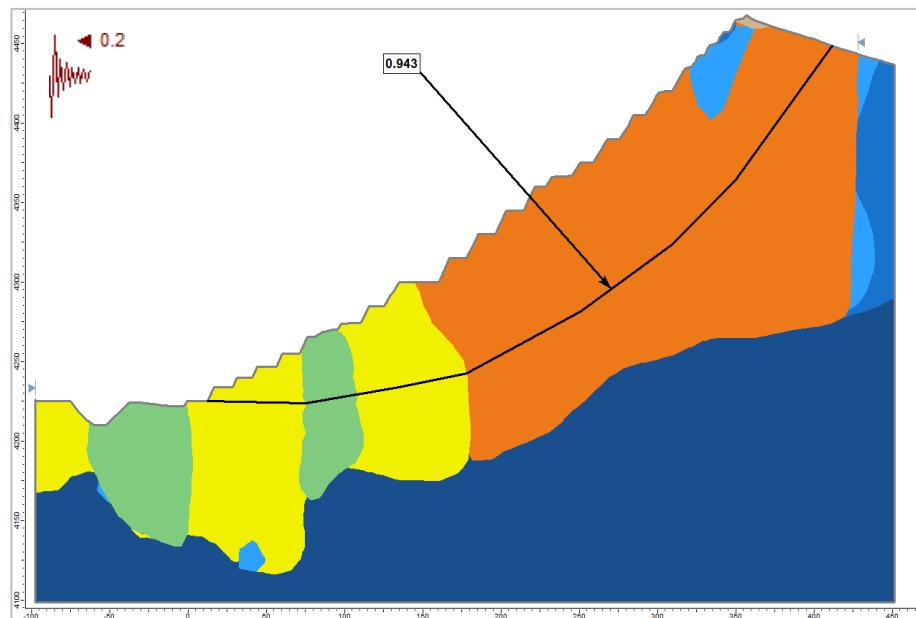
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 15

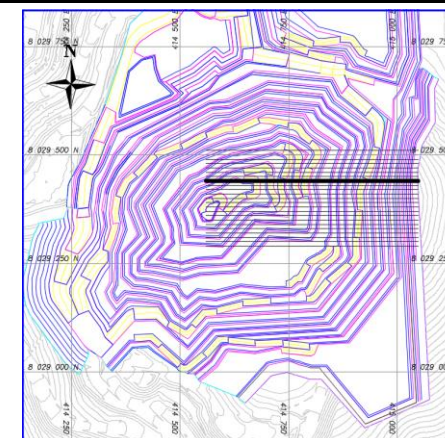


## Anexo 4.16

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 16



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático o, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO**

**TESISTA: GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS**

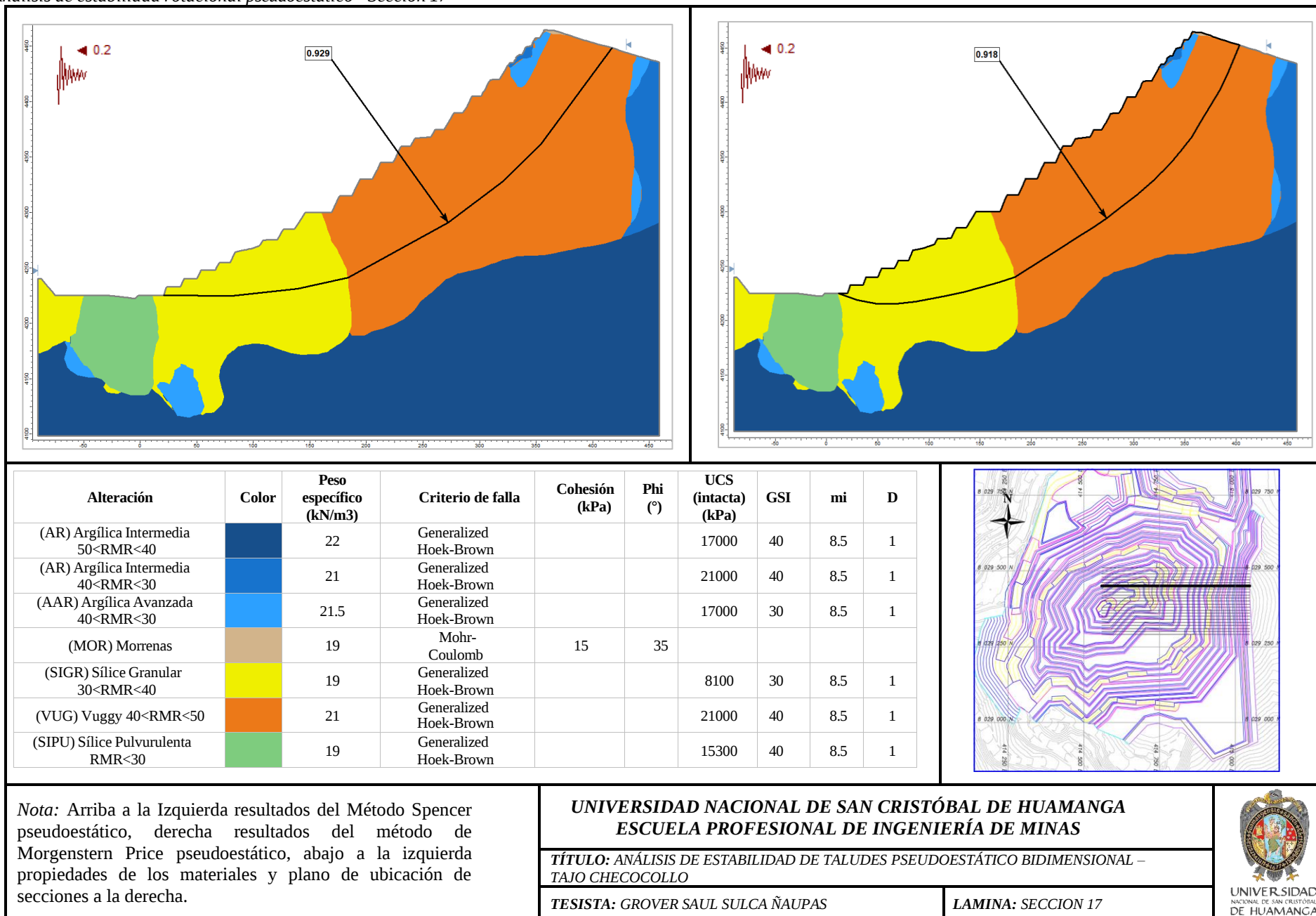
**LAMINA: SECCION 16**



UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA

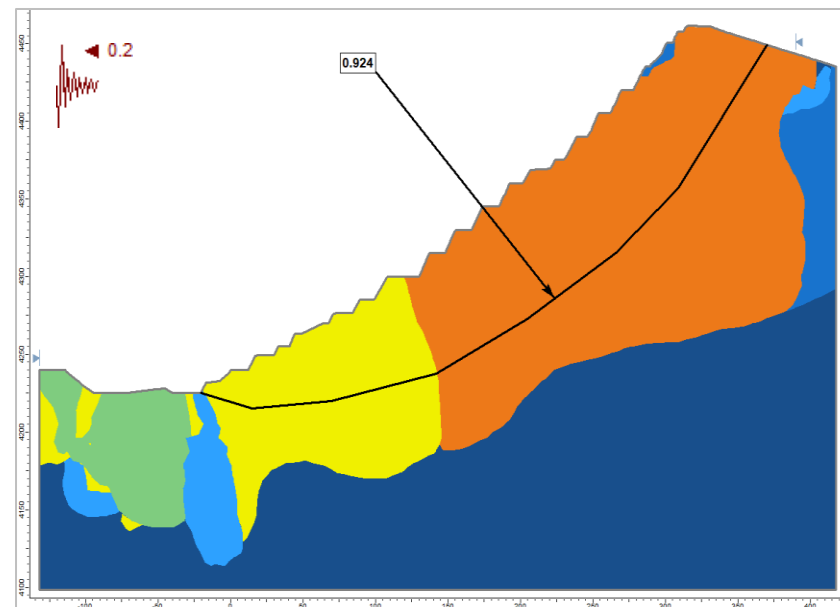
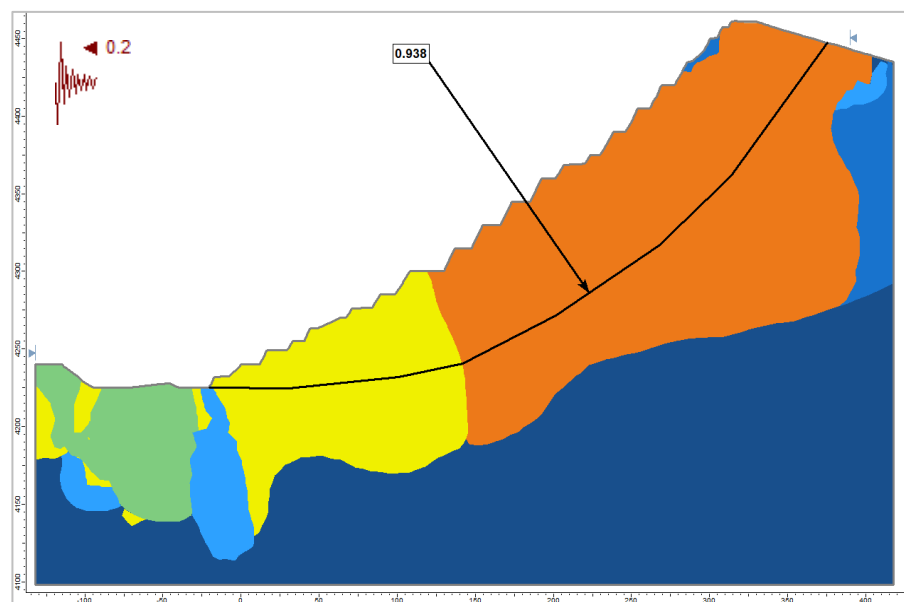
## Anexo 4.17

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 17

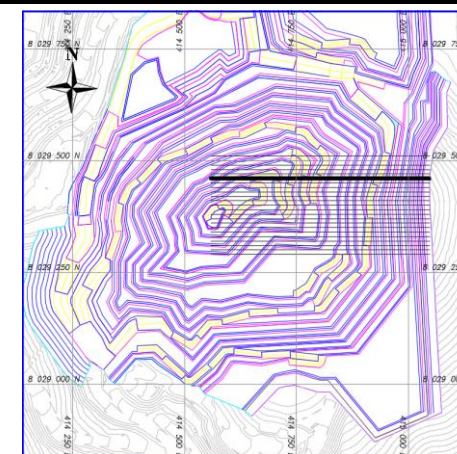


## Anexo 4.18

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 18



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
 TAJO CHECOCOLLO

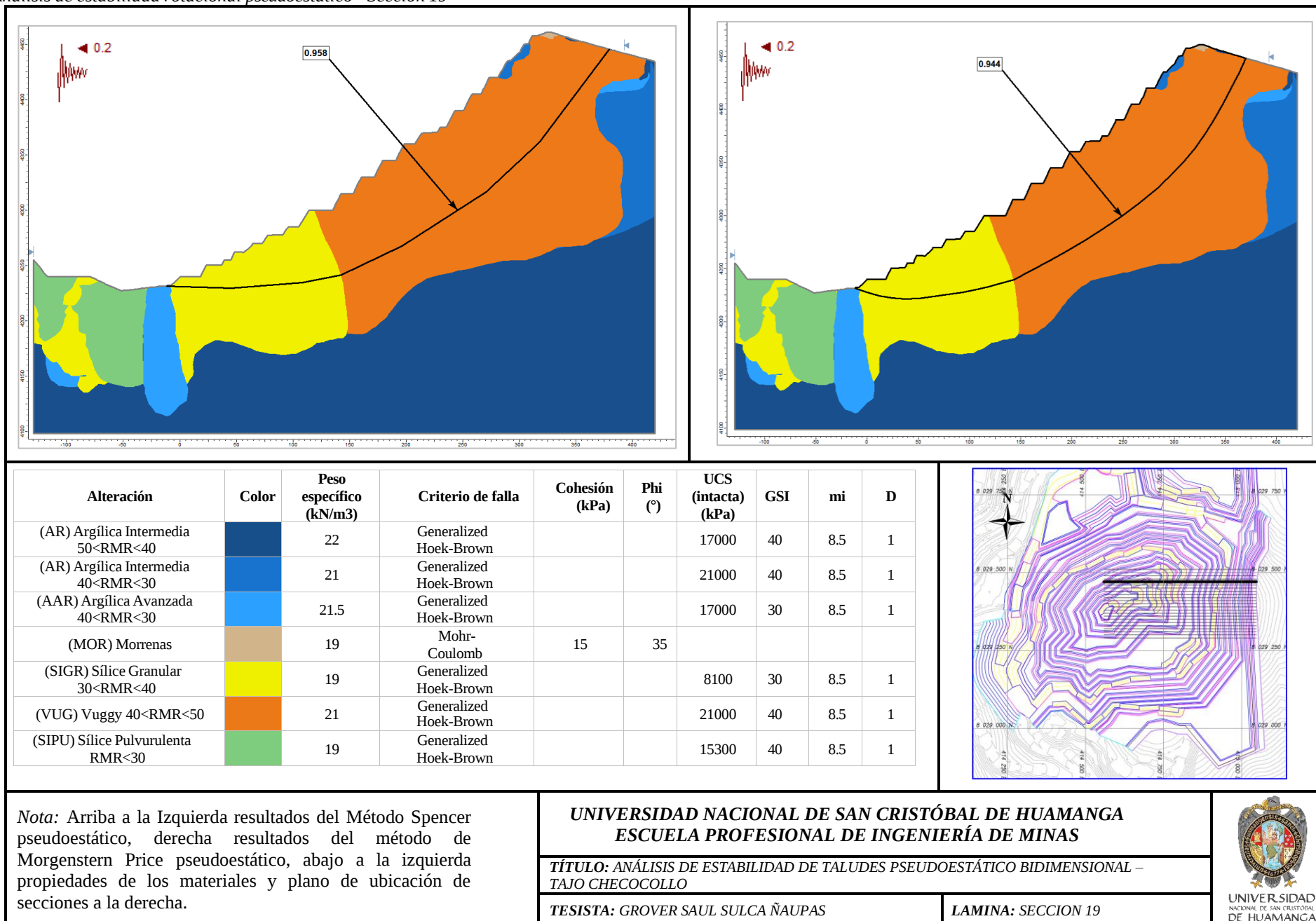
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 18



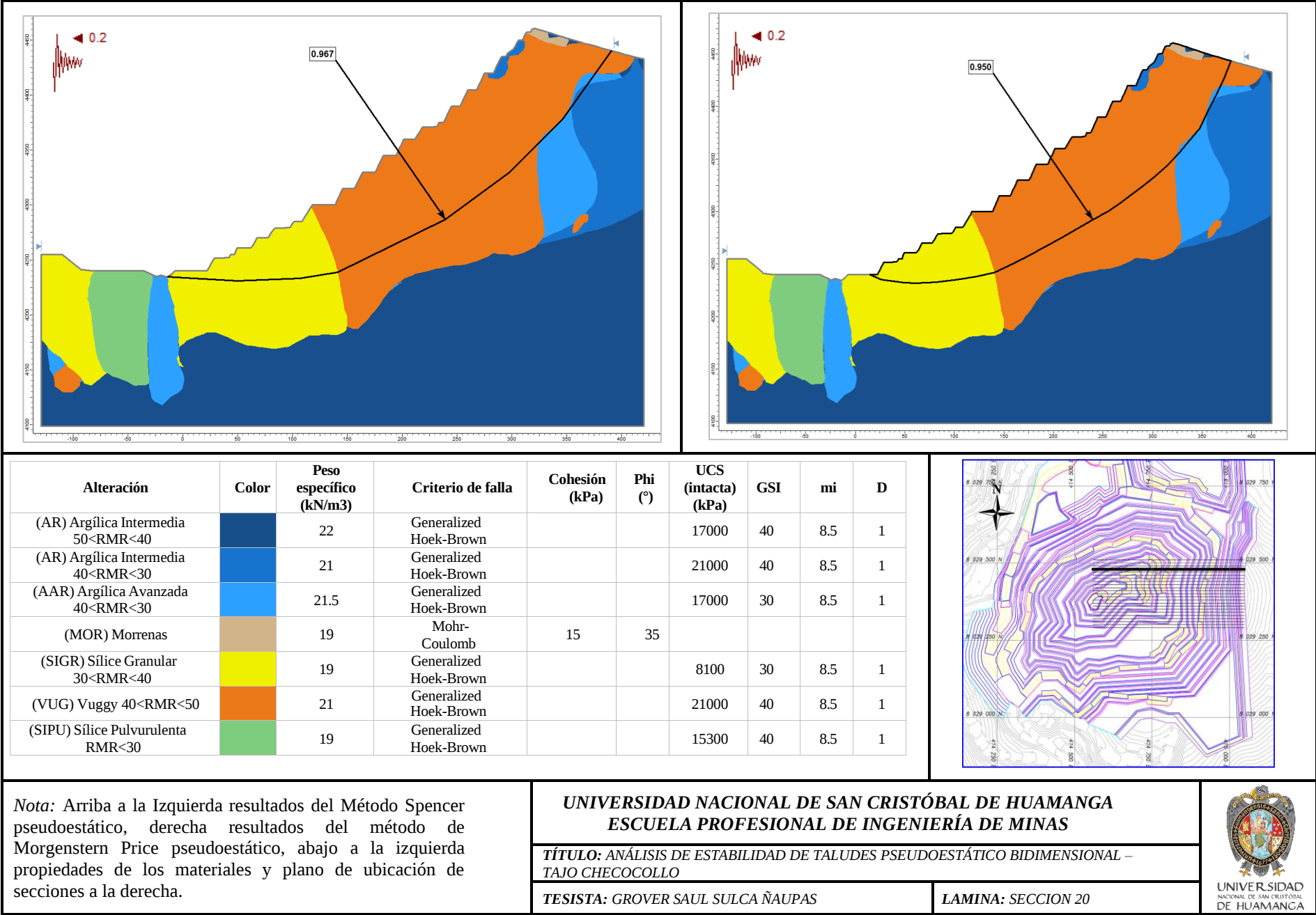
## Anexo 4.19

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 19



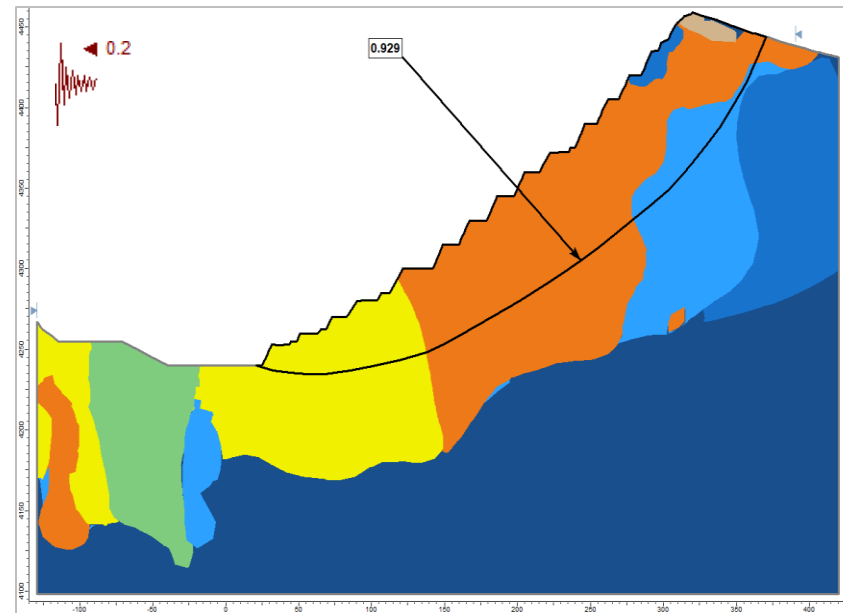
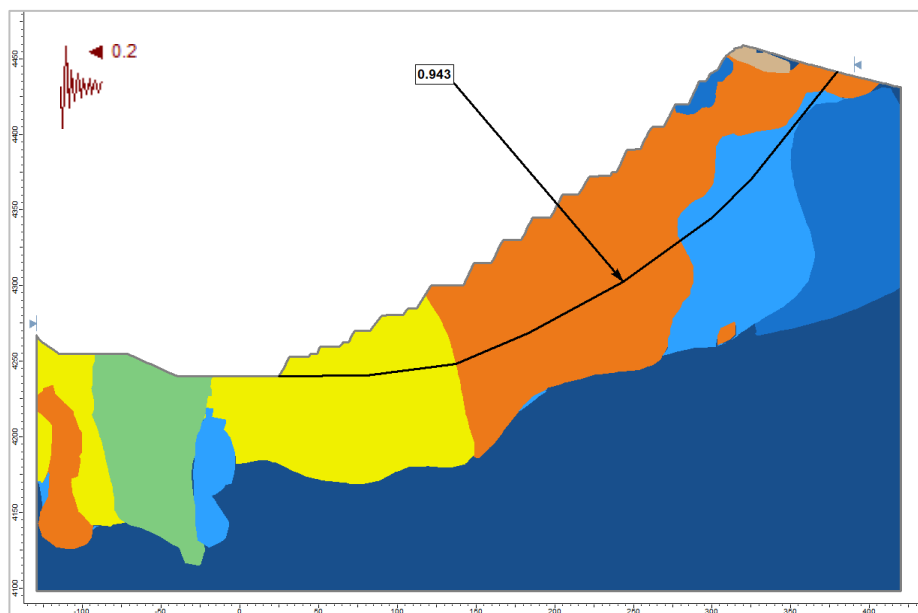
Anexo 4.20

Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 20

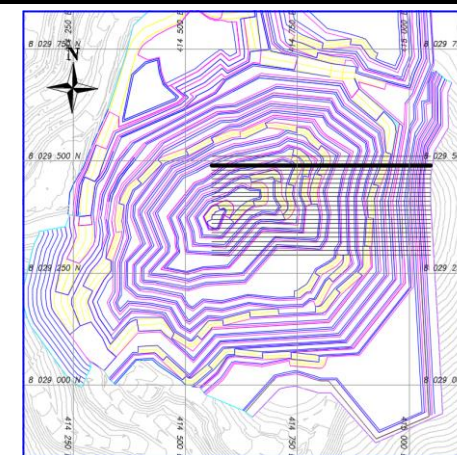


## Anexo 4.21

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 21



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL – TAJO CHECOCOLLO**

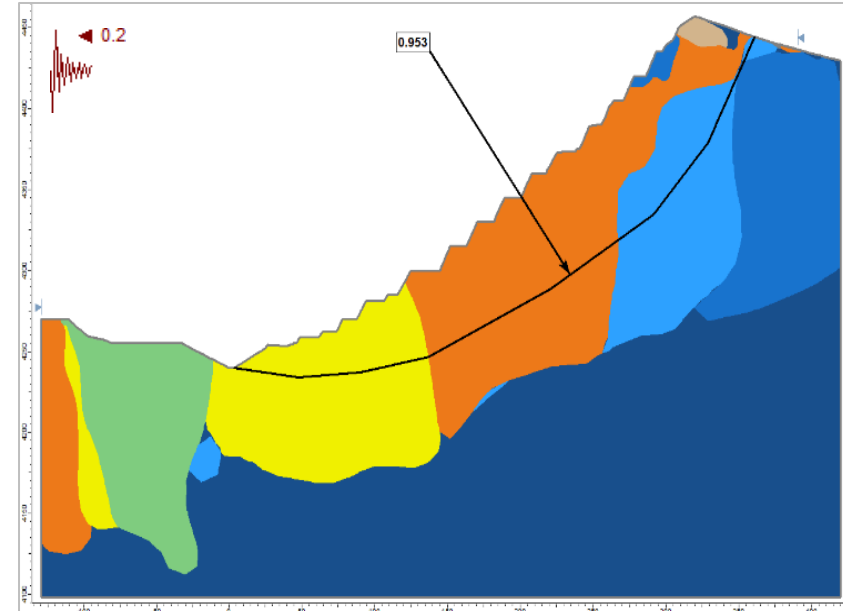
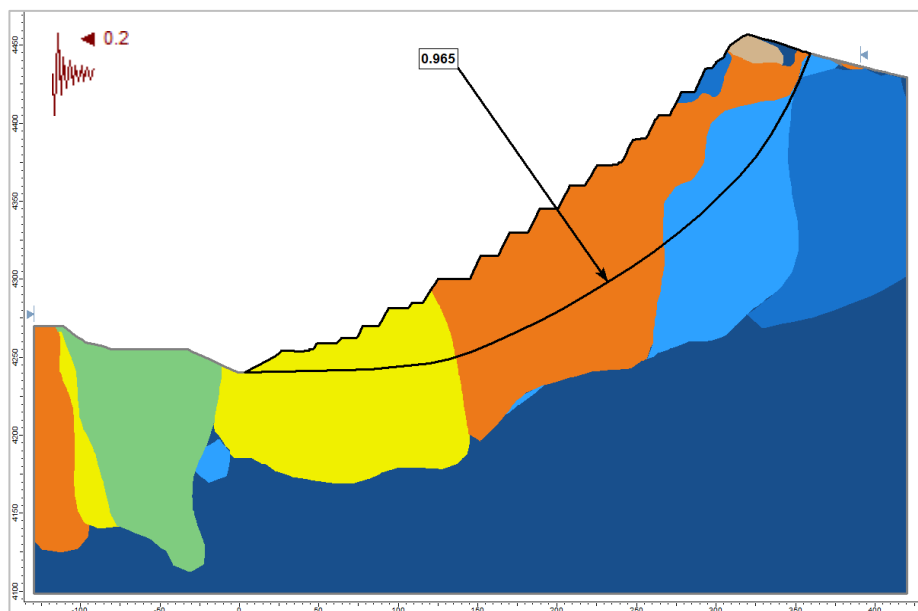
**TESISTA: GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS**

**LAMINA: SECCION 21**

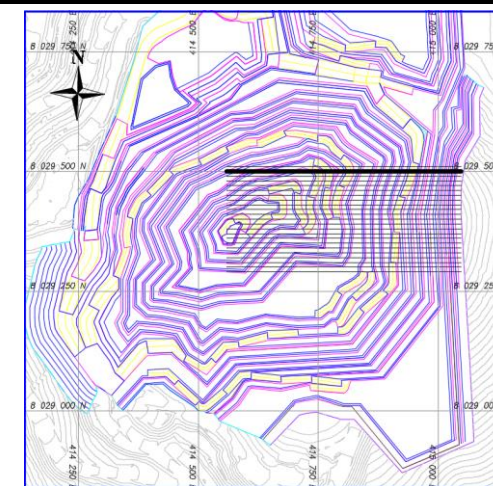


## Anexo 4.22

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 22



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvurulenta RMR<30  |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

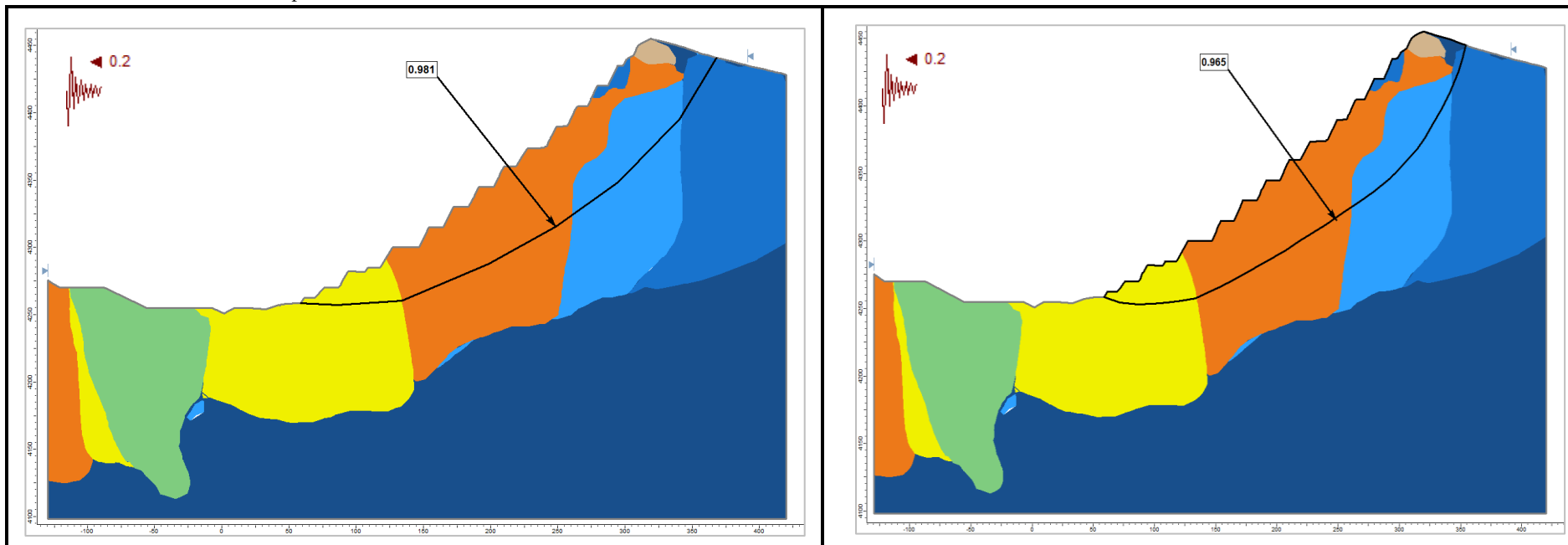
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 22

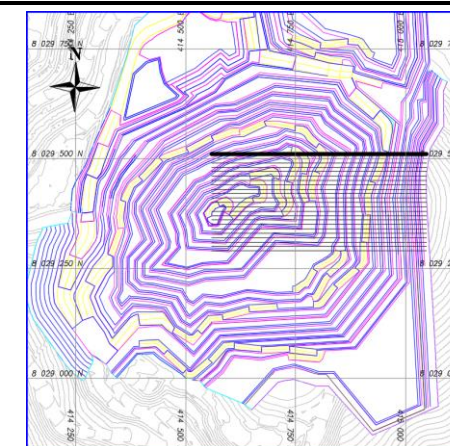


## Anexo 4.23

### Análisis de estabilidad rotacional pseudoestático - Sección 23



| Alteración                         | Color | Peso específico (kN/m <sup>3</sup> ) | Criterio de falla      | Cohesión (kPa) | Phi (°) | UCS (intacta) (kPa) | GSI | mi  | D |
|------------------------------------|-------|--------------------------------------|------------------------|----------------|---------|---------------------|-----|-----|---|
| (AR) Argílica Intermedia 50<RMR<40 |       | 22                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AR) Argílica Intermedia 40<RMR<30 |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (AAR) Argílica Avanzada 40<RMR<30  |       | 21.5                                 | Generalized Hoek-Brown |                |         | 17000               | 30  | 8.5 | 1 |
| (MOR) Morrenas                     |       | 19                                   | Mohr-Coulomb           | 15             | 35      |                     |     |     |   |
| (SIGR) Sílice Granular 30<RMR<40   |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 8100                | 30  | 8.5 | 1 |
| (VUG) Vuggy 40<RMR<50              |       | 21                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 21000               | 40  | 8.5 | 1 |
| (SIPU) Sílice Pulvulenta RMR<30    |       | 19                                   | Generalized Hoek-Brown |                |         | 15300               | 40  | 8.5 | 1 |



Nota: Arriba a la Izquierda resultados del Método Spencer pseudoestático, derecha resultados del método de Morgenstern Price pseudoestático, abajo a la izquierda propiedades de los materiales y plano de ubicación de secciones a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO BIDIMENSIONAL –  
**TAJO CHECOCOLLO**

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** SECCION 23



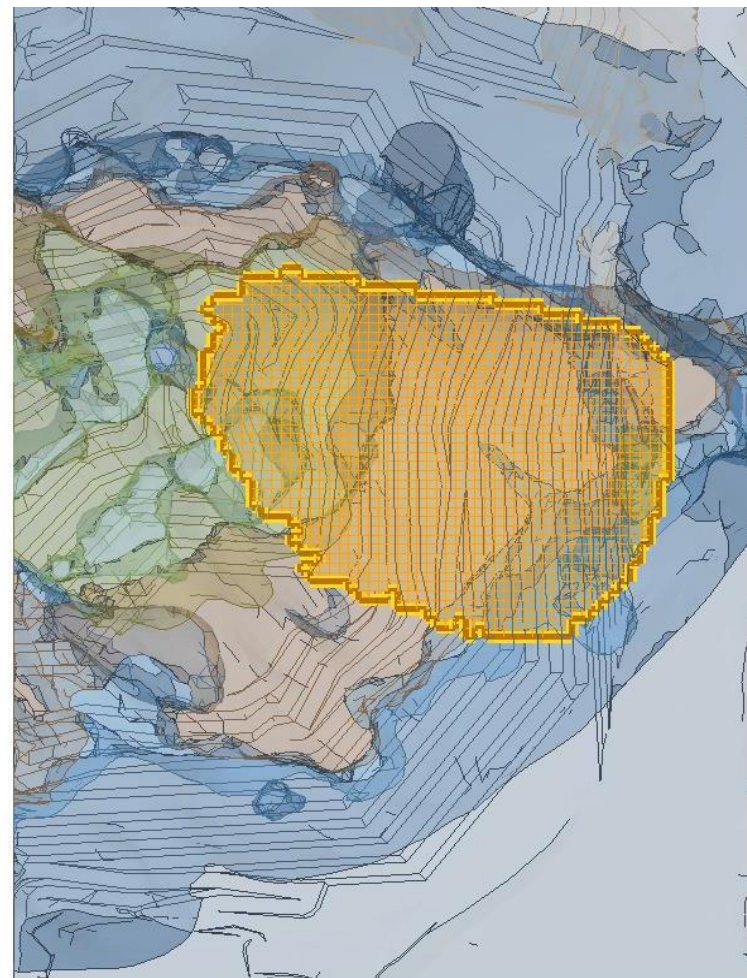
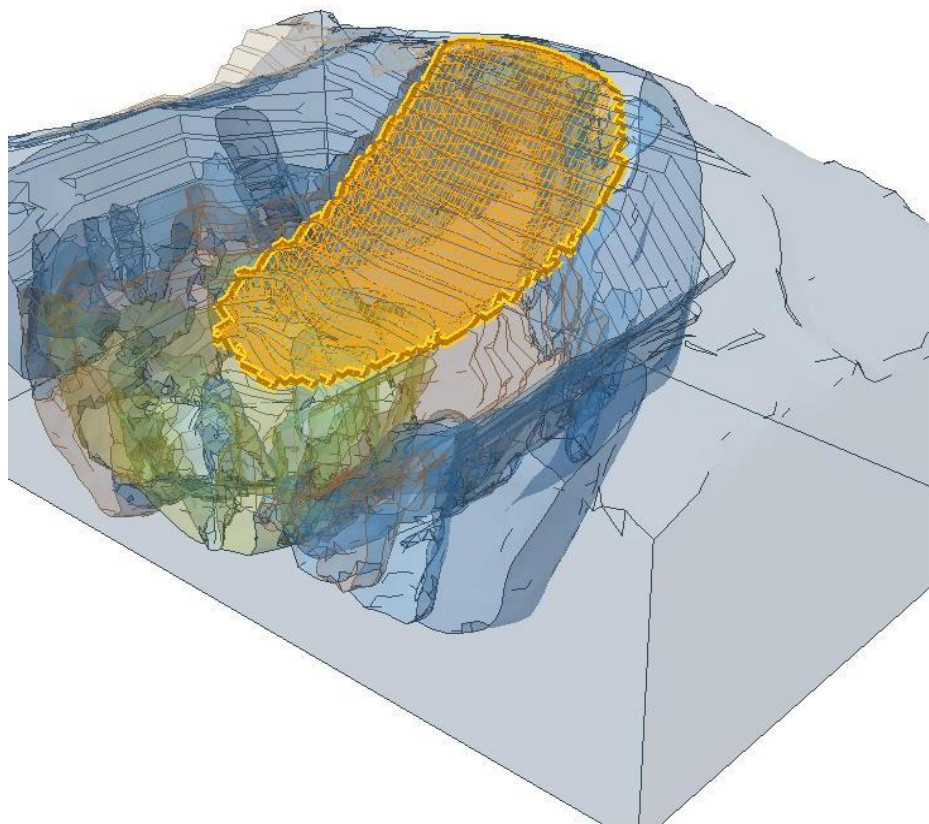
## **Anexo 5.0**

Análisis de estabilidad tridimensional estático

## Anexo 5.1

### Análisis de estabilidad tridimensional estático – Método de Spencer

FS: 1.556



*Nota:* Se muestra los resultados del análisis de estabilidad tridimensional por el método de Spencer, superficie de falla y factor de seguridad, isométrico a la izquierda y en planta a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO TRIDIMENSIONAL – TAJO  
CHECOCOLLO

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** 01

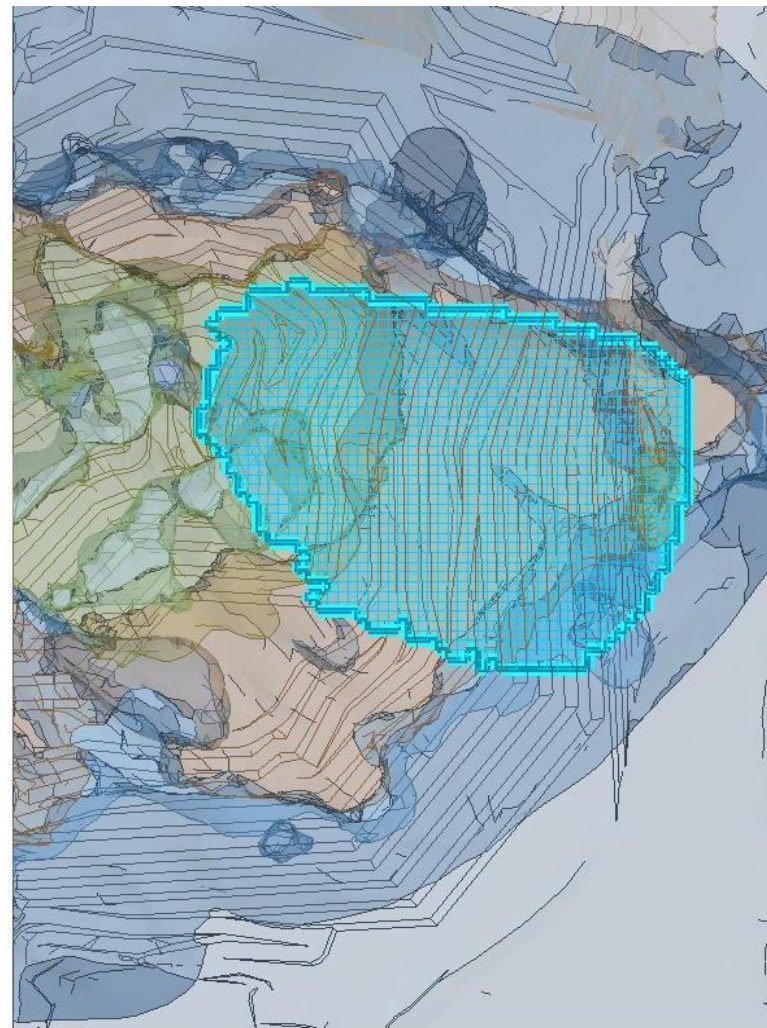
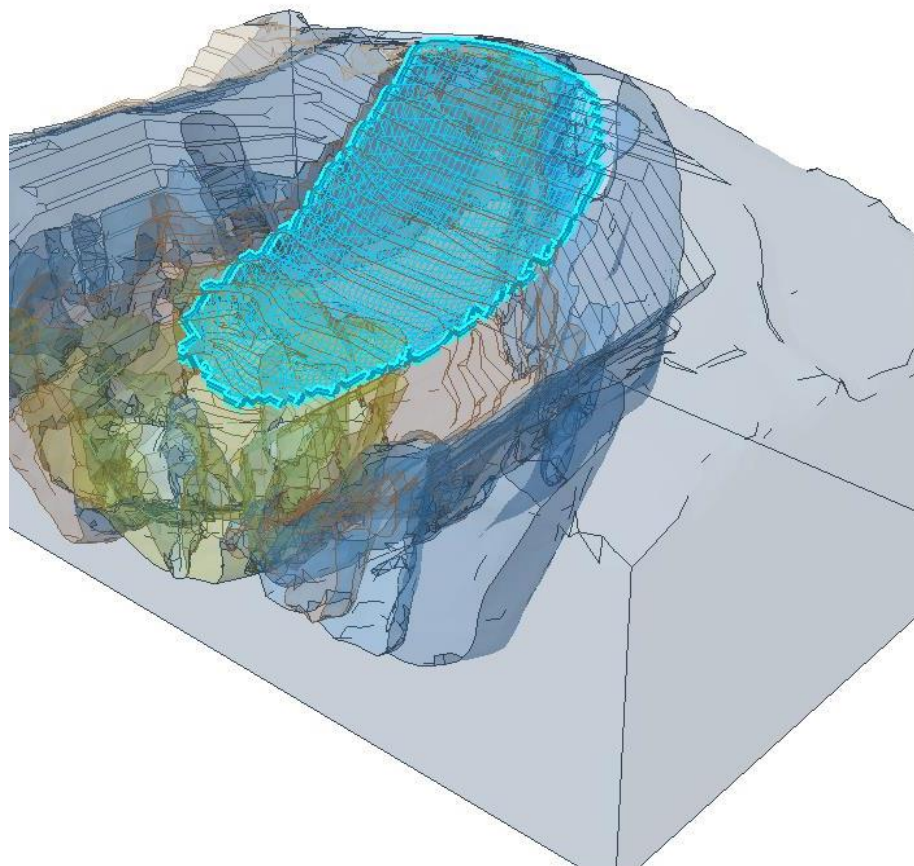


UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA

## Anexo 5.2

### Análisis de estabilidad tridimensional estático – Morgenstern Price

FS: 1.552



Nota: Se muestra los resultados del análisis de estabilidad tridimensional por el método de Morgenstern Price, superficie de falla y factor de seguridad, isométrico a la izquierda y en planta a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES ESTÁTICO TRIDIMENSIONAL – TAJO  
CHECOCOLLO

**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** 02

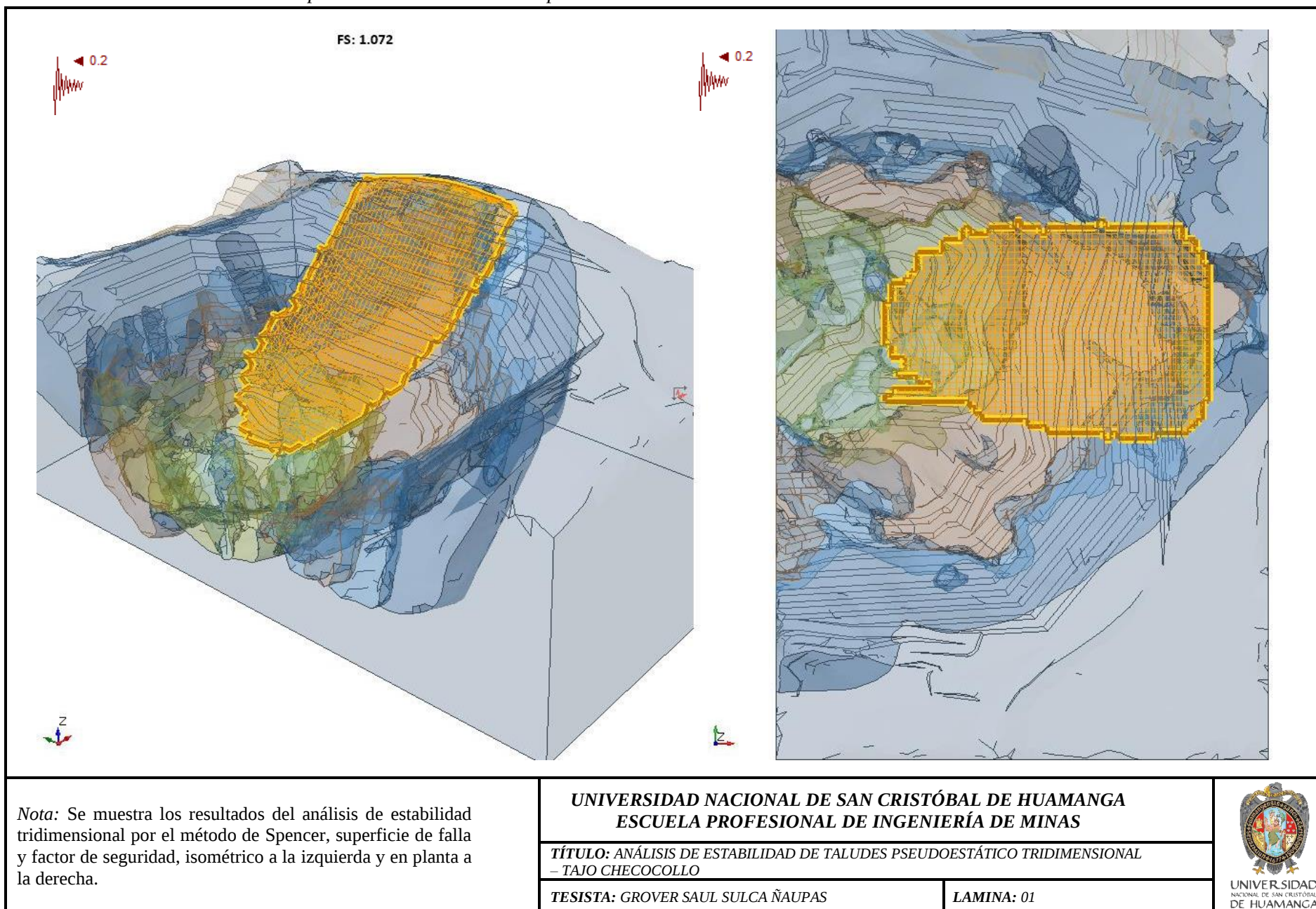


## **Anexo 6.0**

Análisis de estabilidad tridimensional pseudoestático

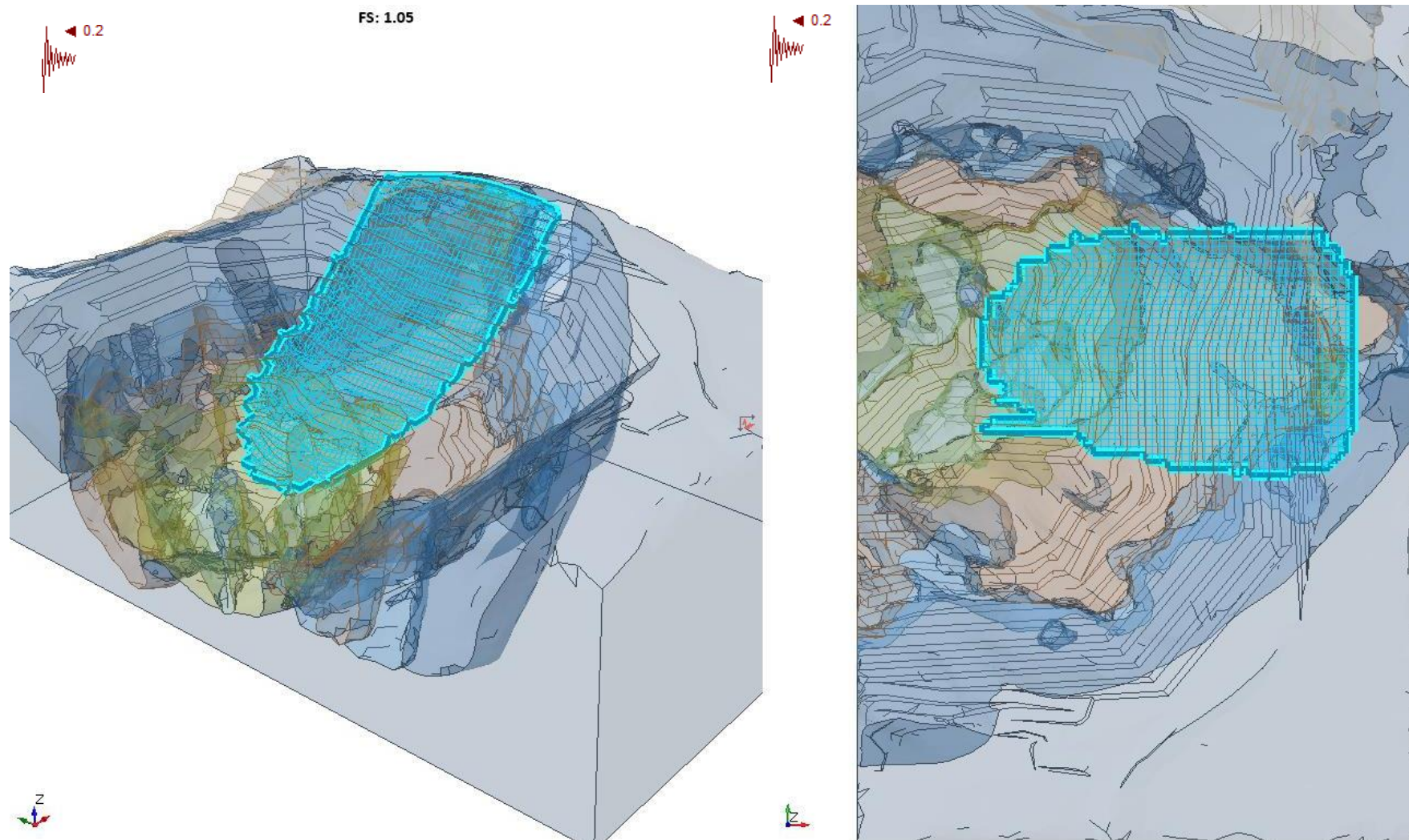
## Anexo 6.1

### Análisis de estabilidad tridimensional pseudoestático – Método de Spencer



## Anexo 6.2

### Análisis de estabilidad tridimensional pseudoestático – Morgenstern Price



Nota: Se muestra los resultados del análisis de estabilidad tridimensional por el método de Morgenstern Price, superficie de falla y factor de seguridad, isométrico a la izquierda y en planta a la derecha.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PSEUDOESTÁTICO TRIDIMENSIONAL  
– TAJO CHECOCOLLO

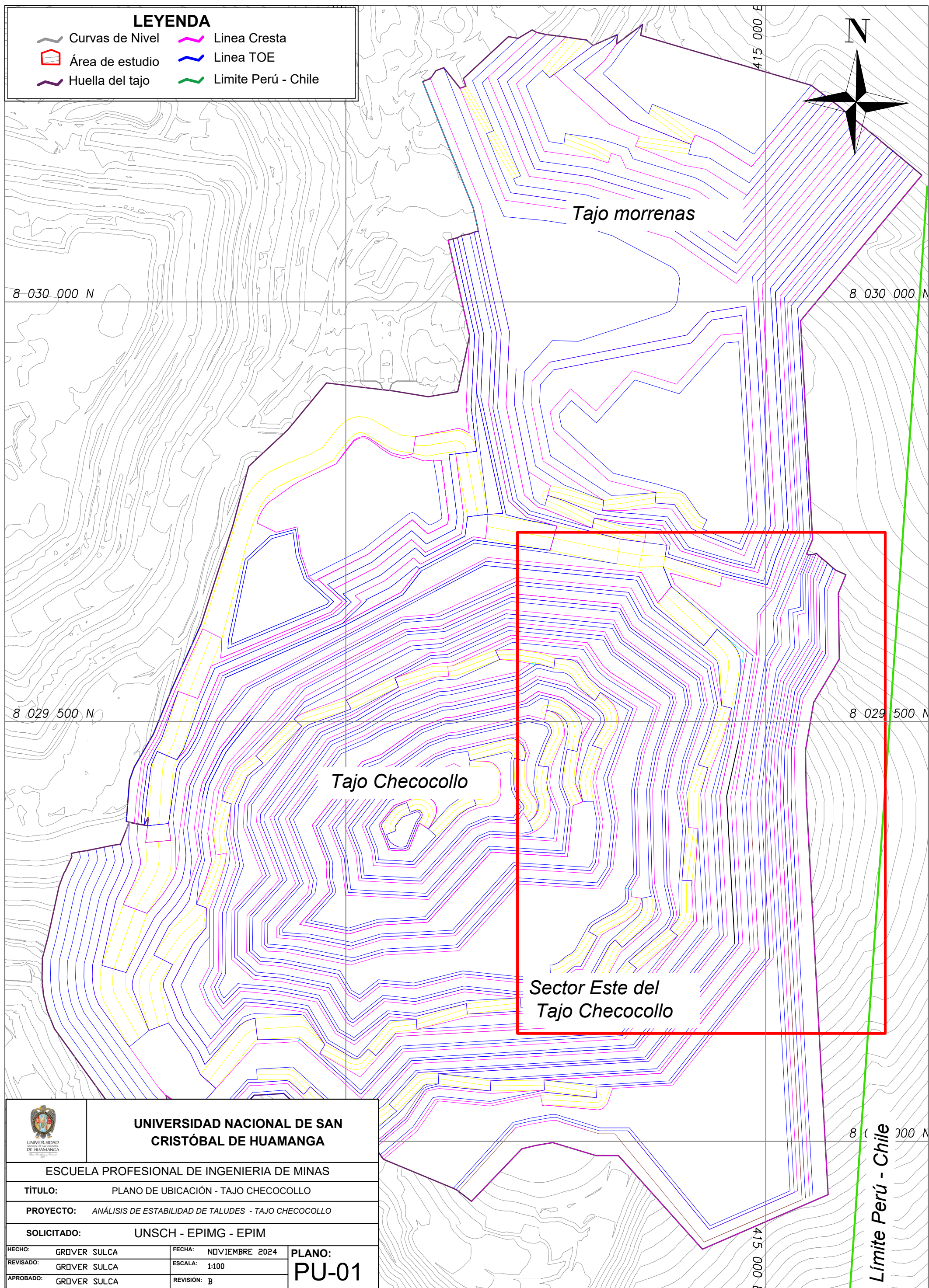
**TESISTA:** GROVER SAUL SULCA ÑAUPAS

**LAMINA:** 02



## **Anexo 7.0**

*Plano de ubicación del Tajo Checocollo*



**UNSCH**FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**  
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 093-2024-FIMGC****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL No 755-2024-FIMGC-D y Memorando N° 672-2024-FIMGC**, a los cinco días del mes de diciembre de 2024, siendo las 11:00 a.m. reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, bajo la presidencia del Dr. Jaime Alberto HUAMÁN MONTES y los miembros; MSc. Ing. Grover RUBINA SALAZAR, MSc. Ing. Jony Antonio QUISPE POMA y MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO actuando como secretario docente el MSc. Ing. Richar Rubén JORGE BERROCAL, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Minas:

**Grover Saul SULCA ÑAUPAS**

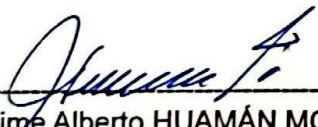
Quien presentó la tesis denominada:

**Estudio comparativo del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del Tajo Checocollo de la Mina Pucamarca, 2024**

Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

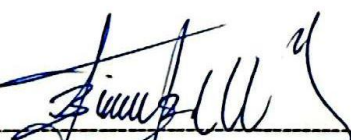
**APROBADO NOTA DIECISEIS (16)**

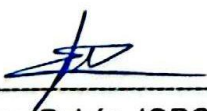
Siendo las 12:40 p.m. del día 05 de diciembre de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

  
Dr. Jaime Alberto HUAMÁN MONTES  
Presidente

  
MSc. Ing. Grover RUBINA SALAZAR  
Miembro

  
MSc. Ing. Jony Antonio QUISPE POMA  
Miembro

  
MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO  
Miembro-Asesor

  
MSc. Ing. Richar Rubén JORGE BERROCAL  
Secretario docente

cc:  
Archivo



## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE INVESTIGACIÓN

El que suscribe; en mi calidad de Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación y encargado de certificar la originalidad de la tesis abajo indicado y por lo tanto responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de pregrado en primera instancia, en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N°039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación UNSCH, deja constancia que:

- Apellidos y Nombres del Bach. : SULCA ÑAUPAS, Grover Saul
- Escuela Profesional : Ingeniería de Minas
- Título de la Tesis : Estudio comparativo del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del Tajo Checocollo de la Mina Pucamarca, 2024
- Evaluación de la originalidad : 19% de similitud

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, **es procedente el certificado de originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 18 de diciembre de 2024

MBA Ing° Leonil Fernando Quispe Aronés  
Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación

# Estudio comparativo del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del Tajo Checocollo de la Mina Pucamarca, 2024

*por* Grover Saul SULCA ÑAUPAS

---

**Fecha de entrega:** 18-dic-2024 10:09p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2555745767

**Nombre del archivo:** TESIS\_-\_GROVER\_SAUL\_SULCA\_ÑAUPAS.pdf (15.21M)

**Total de palabras:** 42158

**Total de caracteres:** 236159

# Estudio comparativo del método de equilibrio límite tridimensional y bidimensional en el análisis de estabilidad de taludes del Tajo Checocollo de la Mina Pucamarca, 2024

## INFORME DE ORIGINALIDAD

|                     |                     |               |                        |
|---------------------|---------------------|---------------|------------------------|
| 19%                 | 17%                 | 7%            | 10%                    |
| INDICE DE SIMILITUD | FUENTES DE INTERNET | PUBLICACIONES | TRABAJS DEL ESTUDIANTE |

## FUENTES PRIMARIAS

|   |                                                                |    |
|---|----------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga | 4% |
|   | Trabajo del estudiante                                         |    |
| 2 | Submitted to uni                                               | 3% |
|   | Trabajo del estudiante                                         |    |
| 3 | app.ingemmet.gob.pe                                            | 2% |
|   | Fuente de Internet                                             |    |
| 4 | hdl.handle.net                                                 | 2% |
|   | Fuente de Internet                                             |    |
| 5 | repositorio.unh.edu.pe                                         | 1% |
|   | Fuente de Internet                                             |    |
| 6 | cybertesis.uni.edu.pe                                          | 1% |
|   | Fuente de Internet                                             |    |
| 7 | repositorio.unamba.edu.pe                                      | 1% |
|   | Fuente de Internet                                             |    |
| 8 | ru.dgb.unam.mx                                                 | 1% |
|   | Fuente de Internet                                             |    |

|    |                                                                                                                                                   |      |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 9  | vsip.info<br>Fuente de Internet                                                                                                                   | 1 %  |
| 10 | repositorio.urp.edu.pe<br>Fuente de Internet                                                                                                      | <1 % |
| 11 | repositorio.unsch.edu.pe<br>Fuente de Internet                                                                                                    | <1 % |
| 12 | pt.scribd.com<br>Fuente de Internet                                                                                                               | <1 % |
| 13 | repositorio.unsa.edu.pe<br>Fuente de Internet                                                                                                     | <1 % |
| 14 | repositorio.unasam.edu.pe<br>Fuente de Internet                                                                                                   | <1 % |
| 15 | repositorio.unap.edu.pe<br>Fuente de Internet                                                                                                     | <1 % |
| 16 | Submitted to Organismo de Evaluación y Fiscalización<br>Trabajo del estudiante                                                                    | <1 % |
| 17 | repositorio.unan.edu.ni<br>Fuente de Internet                                                                                                     | <1 % |
| 18 | edoc.pub<br>Fuente de Internet                                                                                                                    | <1 % |
| 19 | SCHLUMBERGER DEL PERU S.A..<br>"Actualización del Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera Cuajone-IGA0000334", R.D. N° 444-2012-MEM-AAM, 2020 | <1 % |

20

Edgar Julián Gálvez-Albarracín, Rafael Andrés Guauña-Aguilar, Rafael Ignacio Pérez-Urbe.

"Impacto de la norma social subjetiva en la intención de emprendimiento sostenible: un caso de estudio con estudiantes colombianos", Revista Escuela de Administración de Negocios, 2018

Publicación

<1 %

21

[ri.uaemex.mx](http://ri.uaemex.mx)

Fuente de Internet

<1 %

22

[docslide.us](http://docslide.us)

Fuente de Internet

<1 %

23

SNC LAVALIN PERU S.A.. "Segundo ITS de la Tercera MEIA de la Unidad Minera Las Bambas-IGA0012067", R.D. N° 126-2020-SENACE-PE/DEAR, 2020

Publicación

<1 %

24

[repository.unimilitar.edu.co](http://repository.unimilitar.edu.co)

Fuente de Internet

<1 %

25

Submitted to Universidad Politécnica de Madrid

Trabajo del estudiante

<1 %

26

[1library.co](http://1library.co)

Fuente de Internet

<1 %

27

[myslide.es](http://myslide.es)

Fuente de Internet

<1 %

28

[documents.mx](https://documents.mx)

Fuente de Internet

<1 %

29

[dspace.unitru.edu.pe](https://dspace.unitru.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

30

[ri.ues.edu.sv](https://ri.ues.edu.sv)

Fuente de Internet

<1 %

31

[repositorio.ucv.edu.pe](https://repositorio.ucv.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

32

GOLDER ASSOCIATES PERU S.A.. "Plan de Cierre de Minas del Proyecto Minero Corihuarmi-IGA0012513", R.D. N° 006-2010-MEM-AAM, 2020

Publicación

<1 %

33

[repositorio.unfv.edu.pe](https://repositorio.unfv.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

34

[renati.sunedu.gob.pe](https://renati.sunedu.gob.pe)

Fuente de Internet

<1 %

35

[pdfcoffee.com](https://pdfcoffee.com)

Fuente de Internet

<1 %

36

Pozo Garcia, Raul Rodolfo. "Modificación del Sistema GSI en función de la Escala de Análisis de Estabilidad de Taludes en Macizos

<1 %

# Rocosos", Pontificia Universidad Catolica del Peru (Peru), 2023

Publicación

---

---

|                      |        |                       |            |
|----------------------|--------|-----------------------|------------|
| Excluir citas        | Activo | Excluir coincidencias | < 30 words |
| Excluir bibliografía | Activo |                       |            |