



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**MODELAMIENTO NUMÉRICO 2D DE EFECTOS DE INCORPORACIÓN DE
AGUA EN LA ESTABILIDAD DE LADERAS ROCOSAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

VALERIA ANTONELA RIVILLO ARCAYA

PROFESORA GUÍA
MARISOL LARA CASTILLO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE
2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Valeria Antonela Rivillo Arcaya
FECHA: 26/08/2019
PROFESORA GUÍA: Marisol Lara Castillo

MODELAMIENTO NUMÉRICO 2D DE EFECTOS DE INCORPORACIÓN DE AGUA EN LA ESTABILIDAD DE LADERAS ROCOSAS

Una remoción en masa se define como una movilización lenta o rápida de un determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores. En Chile, estos procesos constituyen uno de los peligros geológicos cordilleranos más importantes. Una manera de estudiarlas es mediante modelamiento numérico 2D. En este contexto, diversos trabajos de título se han desarrollado estudiando varios deslizamientos del país (Vejar, 2016; Escudero, 2017; Aravena, 2017; Saavedra, 2018; García, 2016) con un factor desencadenante sísmico. No obstante, no existen muchos estudios que consideren como factor desencadenante la incorporación de agua.

Este artículo presenta un estudio sobre un modelamiento numérico bidimensional, que tiene como objetivo principal, analizar los efectos de la incorporación de agua en la estabilidad de laderas rocosas fracturadas. Se seleccionó la ladera afectada por el deslizamiento de roca de 1987 en el Cerro Rabicano desencadenado por la infiltración de agua debido a las altas tasas de derretimiento de nieve durante el mes de noviembre.

Para lograr el objetivo, en primer lugar, se estableció el montaje del modelo representando las características geológicas, geotécnicas y topográficas con información extraída principalmente de bibliografía y modelos de elevación digital. Luego se ejecutó el modelamiento en el *software* UDEC y se realizó una validación del caso estático. Por último, se estudiaron los mecanismos de incorporación de fluidos para ingresar el agua en el modelo. Se utilizaron dos modos de flujo para la simulación: estacionario y transitorio incompresible. Por cada uno se generaron varios modelos para analizar el comportamiento y estabilidad de la ladera.

El caso de estudio fue mejor representado por el modo transitorio por considerar volúmenes de agua a través del tiempo. Los resultados mostraron que, en el caso estacionario, no se generaron rupturas de roca intacta ni deslizamiento de cizalle o abertura de estructuras en superficie que permitan el movimiento de bloques, mientras que, en el modo de flujo transitorio incompresible, ambos fueron observados. Sin embargo, ninguno de los modelos fue capaz de reflejar el mecanismo de ruptura del deslizamiento y, a mayor saturación, se invalidó el modelo por presentar en profundidad aberturas y presiones excesivas.

Finalmente, se recomendó realizar un estudio previo de terreno, en la zona de interés, en el caso de que se quiera desarrollar un modelamiento numérico de este tipo y se sugirió probar nuevas propiedades como la presión de poros dentro de los bloques.

まっすぐ自分の言葉は曲げねえ...オレの忍道だ！

"I won't go back on my words. That's my Ninja way!"

"El trabajo duro es inútil para aquellos que no creen en sí mismos"

-Naruto Uzumaki-

Hayallerini takip et onlar yürümeyi biliyorlar...

Kolay gelsin

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi padres, Eugenia y José, por siempre apoyarme. Por el cariño, los consejos, la ayuda, la paciencia y el financiamiento 😊. Sin ustedes no podría haber superado esta etapa. A mi hermana, la Valen, por motivarme y ser mi doctora personal jiji. A la Elsitita por cuidarme desde arriba <3. A mis abuelos por la preocupación y cariño entregado. Agradezco también, a toda mi familia, tíos y primos, por las alegrías y energías transmitidas. En especial, doy gracias a mis padrinos y, a peladín Diego e Ivan por alojarme durante mi primer año. A la tía Elsa y tío Ricardo por siempre abastecerme de paltas y limones :P.

Quisiera agradecer a mi segunda familia, los Quiroces y Dufeys, por todos los momentos vividos, las risas, los viajes y el apoyo incondicional desde mi nacimiento. A la ferni, el burro, la anto y el nico por ser grandes compañeros de aventuras y estupideces.

A mis mejores amigos de la infancia, Carito, Jeshu, Piero, Pablito, Mary y Naty porque a pesar del tiempo y distancia, la amistad y buena onda persiste. A mis amigos de la vida Ronny, Mati y Juanpi por todos los momentos compartidos, las conversaciones, las fiestas y risas vividas. A mis mejores amigas de la vida Jary y Gaby por estar siempre en los buenos y malos momentos, por escucharme, darme consejos y por ser las más divertidas y mejores roomies. Gracias por motivarme y creer en mí.

Agradezco a l@s amig@s cabildan@s y liguan@s por la buena onda, por las salidas, carretes y risas compartidas. Especial mención a mis vecinos santiaguinos Dani y pescao por el apañe, paseítos, por el transporte y por darme ánimo siempre.

A mis amigos de generación y padrinos, ¡grande sección 3!, en especial a las grandes y maravillosas amigas que conocí el primer año: Pauli, Conita, Mili, Sari, Caromo y Coti. Son las mujeres más hermosas y valientes que pude conocer.

Gracias a todos los geolocos y geopersonas que he conocido en el camino. A mis mejores amigos de geología: Fer, Fran, Dani, Coti, Jas, Pili, Ale, Sebi, Navi, Negro, Chaino, Rasm, Richi, camala y arroz por todos los terrenos, clases, llantos y carretes vividos. Me siento muy afortunada de haber tenido estos grandes compañeros y excelentes personas a mi lado. Gracias por aguantarme y animarme a terminar mis estudios, sin su ayuda y compañía no hubiera sido lo mismo <3. Mención especial a mis compañeros vecinos directos en la sala de la esclavitud: Sebi, Camala y Dzeta por toda la ayuda brindada y los mensajes motivacionales, con todo sino pa que.

Gracias también a Mauro, Magda, Ali, Pipe, Manu, Mati, Jipi y Alemono por siempre estar dispuestos a ayudar y por los buenos tiempos de escalada compartidos. A la Negra por motivar mis días con su bella voz, al Hevia con el Gus por sus ridiculeces con ataques de risa y a los beta: Mendekk, Gene, Estefi, Rochi, Mardel, Nico, Pelao, Chancho y Max por el aguante y bromas regaladas.

Finalmente, quisiera agradecer especialmente a la gran profesora que me dirigió en este difícil camino, Marisol Lara, por toda la paciencia, la buena disposición y el conocimiento entregado. Asimismo, muchas gracias a los profesores de la comisión, Sergio Sepúlveda y Sofía Rebolledo, por su tiempo, comentarios y sugerencias.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo General.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Metodología	2
1.2.1 Metodología para objetivo específico i.....	2
1.2.2 Metodología para objetivo específico ii.	2
1.2.3 Metodología para objetivo específico iii.	3
2. Marco Teórico	4
2.1 Método de elementos distintos	4
2.2 <i>Software</i> UDEC.	5
2.3 Generación de Modelos	6
2.3.1 Caso Estático.....	7
2.3.2 Influencia del agua: flujo de fluidos en diaclasas.....	16
3. Área de Estudio	21
3.1 Ubicación y vías de acceso.....	21
3.2 Antecedentes	23
3.2.1 Evolución Geológica	23
3.2.2 Morfoestructuras.....	24
3.2.3 Geología General	26
3.2.4 Clima y Vegetación	29
3.2.5 Remoción en masa de noviembre 29, 1987	30
4. Desarrollo del modelo.....	33
4.1 Construcción de la topografía del talud.....	33
4.2 Construcción de la geometría del modelo.....	36
4.3 Determinación de Parámetros de modelos constitutivos	37
4.4 Especificación de condiciones de borde.....	39
4.5 Validación del modelo estático	39
5. Resultados.....	49
5.1 Modelo estático seleccionado	49
5.2 Implementación del agua	51
5.2.1 Modo de flujo estacionario	51

5.2.2 Modo de flujo transitorio de fluido incompresible.....	68
6. Discusiones	101
6.1 Interpretación de los resultados	101
6.1.1 Representación de los modelos aplicando agua	101
6.1.2 Influencia del agua en la estabilidad de ladera.....	102
6.2 Geometría del modelo.....	106
6.2.1 Topografía de la ladera	106
6.2.2 Estructuras del macizo rocoso	107
6.3 Selección de modelo constitutivo y obtención de parámetros	108
6.4 Influencia de la red de zonas deformables.	109
6.5 Influencia del tamaño del modelo	110
6.6 Condiciones de borde.....	111
6.7 Validación del modelo estático	113
6.8 Limitaciones del software	114
7. Conclusiones	115
8. Recomendaciones	116
9. Bibliografía.....	117
Anexos.....	124

Índice de figuras

Figura 1: Representación de elementos definidos en un modelo UDEC (Itasca, 2018).....	6
Figura 2: Procedimiento de solución general para análisis estáticos. Extraído desde Escudero (2017). Modificado de Itasca (2014).....	8
Figura 3: Representación de la estructura de dominios (Itasca, 2018).....	17
Figura 4: Mapa de ubicación de la zona de estudio. A) Ubicación Río Colorado, Andes Centrales, Chile (Casassa & Marangunic, 1993). B) Ruta de acceso desde Santiago.....	22
Figura 5: Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32º y 35º S. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yáñez (2003). Modificado de Fock (2005). La zona de estudio se ubica dentro del recuadro rojo.....	25
Figura 6: Geología y Geomorfología del deslizamiento de roca ocurrido en el Estero Parraguirre, 1987. En línea punteada azul se traza el perfil geológico del estero. Modificado de Hauser (2002).....	27
Figura 7: Esquema de zona de despegue del 29 de noviembre, 1987, deslizamiento de roca mostrando estructuras geológicas y la transformación en flujo de detritos. Extraído de Hauser (2002).....	31
Figura 8: Perfil geológico esquemático del Estero Parraguirre. La traza del perfil de elevación se muestra en la Figura 6. La topografía es generada a partir de un DEM extraído de Alos Palsar con resolución de 12,5m por píxel. Los contactos del intrusivo son desconocidos por lo que a modo de simplificación se definen verticales. Elaboración propia.	32
Figura 9: Mapa de la zona de estudio con la traza de los 6 perfiles generados. El escarpe es inferido por imágenes de Google Earth y basado en Hauser (2002).	34
Figura 10: Perfiles de elevación.	34
Figura 11: Comparación perfil de elevación 2 y 3. En verde se muestra la ubicación aproximada del deslizamiento considerando la cota superior de 4350 m s.n.m. y la longitud de 1000m indicadas en Hauser (2002).	35
Figura 12: Perfil de elevación final. En verde se muestra la ubicación aproximada del deslizamiento considerando la cota superior de 4350 m s.n.m. y la longitud de 1000m indicadas en Hauser (2002).....	35
Figura 13: Representación de la ladera en UDEC.	36
Figura 14: Condiciones de borde de velocidad para el modelo estático.....	39
Figura 15: Ubicación puntos de control en el modelo.	40
Figura 16: Desplazamientos horizontales y verticales para el modelo base.....	41
Figura 17: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo base.....	42
Figura 18: Comportamiento plástico del modelo base. Zonas rosadas sobrepasan el esfuerzo de fluencia.	43
Figura 19: Esquema modelo simplificado, cortado lateralmente y sin estructuras..	44
Figura 20: Esquema caso estático con estructuras.	46
Figura 21: Desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de control para el modelo simplificado y estabilizado con estructuras aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.....	47

Figura 22: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo simplificado y estabilizado con estructuras aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques. .	48
Figura 23: Comportamiento plástico del modelo simplificado y estabilizado aplicando el criterio de Mohr-Coulomb para bloques. Zonas rosadas superan el esfuerzo de fluencia.	48
Figura 24: Modelo estático seleccionado para implementar el agua. Como referencia para los análisis que se mostrarán, se indica en esta figura el tramo deslizado.	50
Figura 25: Magnitud de vectores de desplazamiento para el modelo estático final seleccionado.	51
Figura 26: Condiciones de borde para flujo estacionario. Como referencia para los análisis que se mostrarán, se indica en esta figura el tramo deslizado.	52
Figura 27: Condiciones de borde para modelo con nivel freático medio. Como referencia para los análisis que se mostrarán, se indica en esta figura el tramo deslizado	53
Figura 28: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	54
Figura 29: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	55
Figura 30: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo. Zona de mayores flujos indicada en círculo negro.	56
Figura 31: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	57
Figura 32: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo. Se generan el borde inferior derecho indicadas por círculo negro.	57
Figura 33: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	58
Figura 34: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	59
Figura 35: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	59
Figura 36: Comportamiento plástico para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.....	60
Figura 37: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	60
Figura 38: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	61
Figura 39: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.	61
Figura 40: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto. Máximas presiones indicadas en círculo negro.	62
Figura 41: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.	63
Figura 42: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.	64

Figura 43: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto. Se generan en borde lateral derecho indicadas en círculo negro.	64
Figura 44: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.	65
Figura 45: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.	65
Figura 46: Comportamiento plástico para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.	66
Figura 47: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.	67
Figura 48: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.	67
Figura 49: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.	68
Figura 50: Condiciones de borde para flujo estacionario. Como referencia para los análisis que se mostrarán, se indica en esta figura el tramo deslizado.	69
Figura 51: Derretimiento diario estación Valle Nevado (Comte, 2017).	70
Figura 52: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.	71
Figura 53: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.	72
Figura 54: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.	72
Figura 55: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.	73
Figura 56: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.	73
Figura 57: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas. Se concentran en la parte inferior encerradas en círculo negro.	74
Figura 58: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas. Como referencia se muestra tramo deslizado.	75
Figura 59: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas. Como referencia se muestra tramo deslizado.	75
Figura 60: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.	76
Figura 61: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.	77
Figura 62: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.	77
Figura 63: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado por 2 s.	78

Figura 64: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado por 2 s.	79
Figura 65: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.	80
Figura 66: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado por 1,67 minutos. Círculos negros indican las zonas afectadas.	80
Figura 67: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.	81
Figura 68: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.	81
Figura 69: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.	82
Figura 70: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.	82
Figura 71: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos. En círculo negro se muestra el sector donde en ambos sets se producen cizalles. Como referencia se muestra tramo deslizado.	83
Figura 72: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos. En círculo negro se muestra el sector donde en ambos sets se producen aperturas. Como referencia se muestra tramo deslizado.	83
Figura 73: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos. Como referencia se muestra tramo deslizado.	84
Figura 74: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.	85
Figura 75: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.	85
Figura 76: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.	86
Figura 77: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos. Círculos negros muestran las estructuras identificadas.	87
Figura 78: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado por 1,5 segundos.	88
Figura 79: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.	88
Figura 80: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.	89
Figura 81: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.	89

Figura 82: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.	90
Figura 83: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.	90
Figura 84: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.	91
Figura 85: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.	91
Figura 86: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.	92
Figura 87: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.	92
Figura 88: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.	93
Figura 89: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.	94
Figura 90: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.	95
Figura 91: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.	95
Figura 92: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.	96
Figura 93: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.	96
Figura 94: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.	97
Figura 95: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos. Se muestra un acercamiento de los desplazamientos en el cuadrado rojo.	98
Figura 96: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.	99
Figura 97: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.	99
Figura 98: Diagrama esquemático del movimiento de bloques que se interpreta de los resultados de los primeros modelos del modo de flujo transitorio incompresible.	104
Figura 99: Modelo de bloques con saturación 100% pero con más tiempo de ejecución. Se observan las aberturas cavernosas por la gran presión de poros de estructuras que se genera.	105
Figura 100: Modelo con tamaño reducido. Se observa la baja resolución de la topografía.	111

Figura 101: Geometría de la ladera para modelo 1. Se muestran las divisiones de zonas deformables.	135
Figura 102: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 1.	136
Figura 103: Vectores de desplazamiento para modelo 1.	136
Figura 104: Comportamiento plástico del modelo 1.	137
Figura 105: Geometría de la ladera para modelo 2. Se muestran las divisiones de zonas deformables.	137
Figura 106: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 2.	138
Figura 107: Vectores de desplazamiento para modelo 2.	138
Figura 108: Comportamiento plástico del modelo 2.	139
Figura 109: Geometría de la ladera para modelo 3. Se muestran las divisiones de zonas deformables.	139
Figura 110: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 3.	140
Figura 111: Vectores de desplazamiento para modelo 3.	140
Figura 112: Comportamiento plástico del modelo 3.	141
Figura 113: Geometría de la ladera para modelo 4. Se muestran las divisiones de zonas deformables.	141
Figura 114: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 4.	142
Figura 115: Vectores de desplazamiento para modelo 4.	142
Figura 116: Comportamiento plástico del modelo 4.	143
Figura 117: Geometría de la ladera para modelo 5. Se muestran las divisiones de zonas deformables.	143
Figura 118: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 5.	144
Figura 119: Vectores de desplazamiento para modelo 5.	144
Figura 120: Comportamiento plástico del modelo 5.	145
Figura 121: Desplazamientos horizontales y verticales para el modelo base sin estructuras.	146
Figura 122: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo base sin estructuras.	147
Figura 123: Comportamiento plástico del modelo base sin estructuras. Zonas rosadas sobrepasan el esfuerzo de fluencia.	148
Figura 124: Desplazamientos horizontales y verticales para el modelo simplificado.	149
Figura 125: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo simplificado.	150
Figura 126: Comportamiento plástico del modelo simplificado. Zonas rosadas sobrepasan el esfuerzo de fluencia.	151
Figura 127: Desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de control para el modelo simplificado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.	152
Figura 128: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo simplificado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.	153
Figura 129: Comportamiento plástico del modelo simplificado aplicando el criterio de Mohr-Coulomb para bloques. Zonas rosadas sobrepasan el esfuerzo de fluencia.	154
Figura 130: Desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de control para el modelo simplificado y estabilizado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.	155

Figura 131: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo simplificado y estabilizado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.	156
Figura 132: Comportamiento plástico del modelo simplificado y estabilizado aplicando el criterio de Mohr-Coulomb para bloques. No se observan zonas rosadas que sobrepasen el esfuerzo de fluencia.....	157
Figura 133: Desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de control para el modelo estático final seleccionado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.	158
Figura 134: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo estático final seleccionado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.....	159
Figura 135: Comportamiento plástico del modelo estático final seleccionado aplicando el criterio de Mohr-Coulomb para bloques. No se observan zonas rosadas que sobrepasen el esfuerzo de fluencia.....	159
Figura 136: Energía en desequilibrio para el modelo de pequeña escala.....	160
Figura 137: Comportamiento plástico para el modelo de pequeña escala.	160
Figura 138: Vectores de desplazamiento para el modelo de pequeña escala.	161
Figura 139: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo de flujo transitorio con saturación cero al inicio de la simulación.....	161
Figura 140: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación cero al inicio de la simulación.....	162
Figura 141: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.....	162
Figura 142: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.	163
Figura 143: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.....	163
Figura 144: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.	164
Figura 145: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.	164
Figura 146: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.....	165
Figura 147: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.	165
Figura 148: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.	166
Figura 149: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.	166
Figura 150: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.	167
Figura 151: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.....	167
Figura 152: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.	168
Figura 153: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo 1 de flujo transitorio.....	169

Figura 154: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo 1 de flujo transitorio.	169
Figura 155: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo 1 de flujo transitorio.....	170
Figura 156: Cierre de estructuras en metros para el modelo 1 de flujo transitorio.	170
Figura 157: Abertura de estructuras en metros para el modelo 1 de flujo transitorio.	171
Figura 158: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo 1 de flujo transitorio.....	171
Figura 159: Comportamiento plástico para el modelo 1 de flujo transitorio.....	172
Figura 160: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo 1 de flujo transitorio.....	172
Figura 161: Saturación de agua en dominios para el modelo 1 de flujo transitorio.	173
Figura 162: Presión de poros en dominios en Pascales para el modelo 1 de flujo transitorio.....	173
Figura 163: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo 2 de flujo transitorio.....	174
Figura 164: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo 2 de flujo transitorio.	174
Figura 165: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo 2 de flujo transitorio.....	175
Figura 166: Cierre de estructuras en metros para el modelo 2 de flujo transitorio.	175
Figura 167: Abertura de estructuras en metros para el modelo 2 de flujo transitorio.	176
Figura 168: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo 2 de flujo transitorio.....	176
Figura 169: Comportamiento plástico para el modelo 2 de flujo transitorio.....	177
Figura 170: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo 2 de flujo transitorio.....	177
Figura 171: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo 2 de flujo transitorio.....	178
Figura 172: Saturación de agua en dominios para el modelo 2 de flujo transitorio.	178
Figura 173: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo 3 de flujo transitorio.....	179
Figura 174: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo 3 de flujo transitorio.	179
Figura 175: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo 3 de flujo transitorio.....	180
Figura 176: Cierre de estructuras en metros para el modelo 3 de flujo transitorio.	180
Figura 177: Abertura de estructuras en metros para el modelo 3 de flujo transitorio.	181

Figura 178: Comportamiento plástico para el modelo 3 de flujo transitorio.....	181
Figura 179: Vectores y magnitud de flujo en m ³ /s para el modelo 3 de flujo transitorio.....	182
Figura 180: Saturación de agua en dominios para el modelo 3 de flujo transitorio.....	182
Figura 181: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo 3 de flujo transitorio.....	183

Índice de tablas

Tabla 1: Modelos constitutivos de bloques incluidos en el software UDEC (Itasca, 2014). Modificado de Aravena (2017).....	10
Tabla 2: Modelos constitutivos de discontinuidades incluidos en el software UDEC. Modificado de Itasca (2014).....	12
Tabla 3: Parámetros ingresados para el macizo rocoso con el criterio de Hoek-Brown.	14
Tabla 4: Parámetros ingresados para las discontinuidades con el criterio de Mohr-Coulomb.....	15
Tabla 5: Parámetros ingresados para el macizo rocoso con el criterio de Mohr-Coulomb.....	16
Tabla 6: Parámetros necesarios para simular fluidos en UDEC (Itasca, 2014).	19
Tabla 7: Parámetros de fluidos aplicados por cada modo (Itasca, 2014).	20
Tabla 8: Lista de pasos para la elaboración del modelo base.	33
Tabla 9: Datos utilizados para discontinuidades con el criterio de Mohr-Coulomb. .	37
Tabla 10: Características de la ladera y parámetros ingresados en el macizo rocoso con el criterio de Hoek-Brown para calizas.	38
Tabla 11: Características de la ladera y parámetros ingresados en el macizo rocoso con el criterio de Hoek-Brown para granito.	38
Tabla 12: Coordenadas puntos de control.	40
Tabla 13: Coordenadas puntos de control para modelo cortado.	44
Tabla 14: Valores de parámetros para aplicar el criterio de Mohr Coulomb para bloques de caliza y granito.....	45
Tabla 15: Detalle de puntos en ambas coordenadas para construir la ladera de estudio.	124
Tabla 16: Detalle de puntos simplificados en ambas coordenadas para construir la ladera de estudio.	126
Tabla 17: Valores de rigidez normal de discontinuidades. Extraído de Read (2009).	127
Tabla 18: Valores de rigidez tangencial de discontinuidades. Extraído de Read (2009).	128
Tabla 19: Valores de ángulo de fricción para varias rocas. Extraído de Barton (1973).	129
Tabla 20: Parámetros resistentes de discontinuidades con rellenos. Extraído de González de Vallejo (2002).	130
Tabla 21: Resistencia a la compresión uniaxial. Extraído de Pells (1993).....	130
Tabla 22: Valores de constante m_i para distintos tipos de roca. Extraído de Hoek & Brown (1997).....	131
Tabla 23: Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para distintos tipos de rocas. Extraído de González de Vallejo (2002).	132
Tabla 24: Valores de c y ϕ para roca sana. Extraído de González de Vallejo (2002).	133
Tabla 25: Valores de resistencia de la matriz rocosa sana. Extraído de González de Vallejo (2002).	134

1. Introducción

Los fenómenos de remoción en masa se definen como “movilización lenta o rápida de un determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores” (Hauser, 1993). Los factores desencadenantes son agentes externos que generan abruptos cambios de esfuerzos o resistencia del material de la ladera (Wieczorek, 1996). Entre ellos se encuentran las precipitaciones, los sismos, erupciones volcánicas, etc. (Lara y Sepúlveda, 2008). Debido a que afectan grandes áreas y a sus altas tasas de energía, las remociones en masa son calificadas como el segundo riesgo natural más destructivo después de los terremotos, aunque son considerados como el riesgo geológico más frecuente (USGS, 2000). En nuestro país, estos procesos constituyen uno de los peligros geológicos más importantes debido a las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas en particular del paisaje cordillerano, susceptibles a generar remociones.

Uno de los rasgos más comunes presente en los Andes de Chile Central y de Argentina son los grandes volúmenes ($>10^6 \text{ m}^3$) de deslizamientos y avalanchas de roca (Sepúlveda et al., 2012). Flujos hiperconcentrados, inundaciones y deslizamientos ocurren con frecuencia en los valles de alta pendiente de la cordillera. Estos se asocian con pequeños deslizamientos de suelos y desprendimientos de rocas, además de altas precipitaciones (Hauser, 1985).

Existe una cantidad significativa de trabajos que abordan la estabilidad global de taludes a partir de métodos de equilibrio límite, pues este es el método más común adoptado en ingeniería, a pesar de que esta metodología no toma en cuenta el estado de esfuerzos iniciales, las deformaciones generadas y el incremento de los esfuerzos a lo largo de la superficie potencial de rotura (Stead et al., 2006; Pozo, 2014).

Ante ello, el modelamiento numérico mediante elementos discretos nace como una herramienta de alta resolución, de análisis representativo de las remociones que ha sido constantemente utilizada por la base física y matemática que posee. Estos métodos proporcionan soluciones aproximadas a diversos problemas incorporando la deformación de la roca intacta durante la ruptura de laderas de roca (Stead et al., 2006). Diversos trabajos de título que incluyen modelamiento numérico se han desarrollado con el objetivo de analizar la respuesta y deformación de laderas que fueron afectadas por distintos deslizamientos en Chile (Vejar, 2016; Escudero, 2017; Aravena, 2017; Saavedra, 2018; García, 2016). Sin embargo, todos estos estudios consideran como factor desencadenante la sismicidad.

No obstante, debido a las condiciones climáticas, las precipitaciones y el deshielo se han convertido en importantes factores desencadenantes de diversas remociones. En el Cajón del Maipo, el río Colorado, uno de los principales afluentes del río Maipo, contiene depósitos de terraza indicativos de grandes flujos de detritos prehistóricos (Hauser, 2002).

En consonancia con lo anterior, el presente estudio se crea con el propósito de incorporar herramientas de modelamiento numérico que permitan simular los efectos del agua en la estabilidad de laderas. Son pocos los trabajos de conocimiento público realizados en Chile que incluyen esta variable (Welkner et al., 2010). Se toma como ejemplo las laderas afectadas por el deslizamiento de roca ocurrido en 1987 en el Cerro Rabicano, ubicado en el Cajón del Maipo, específicamente en el Estero

Parraguirre, afluente del río Colorado. Según Hauser (2002) este fenómeno es atribuido a una respuesta gradual, prolongada y persistente de pérdida de resistencia al cizalle de un plano de estratificación de calizas, debido a la incorporación de agua generada por altas tasas de derretimiento de nieve.

Tras esta introducción, se presentan los objetivos del trabajo con las metodologías brevemente explicadas. Posteriormente, se indica el marco teórico y los antecedentes del área de estudio. Luego, se expone el desarrollo del modelo y más adelante, se muestran los resultados del trabajo. Finalmente, se presentan las discusiones, conclusiones y recomendaciones del estudio.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Analizar mediante modelamiento numérico 2D, los efectos de la incorporación de agua en la estabilidad de laderas rocosas fracturadas.

1.1.2 Objetivos específicos

- i. Reconstruir y representar las características geológicas, geotécnicas y topográficas de la ladera afectada por el deslizamiento de roca de 1987 en el Cerro Rabicano (Cajón del Maipo).
- ii. Validar el modelo estático de la ladera en estudio
- iii. Analizar y comparar la estabilidad y deformación de la ladera incorporando los efectos de flujos de agua en el modelo.

1.2 Metodología

1.2.1 Metodología para objetivo específico i.

Se utiliza información geológica y geotécnica disponible a escala 1:250.000 para establecer el montaje del modelo. Deben ser especificadas la topografía, geometría, el comportamiento constitutivo y propiedades del material, con las condiciones iniciales y de borde. Las condiciones iniciales y de borde, definen la condición o estado de equilibrio (*in-situ*), antes de un cambio o una perturbación introducida posterior. Se utiliza un modelo de elevación digital (DEM) extraído de Alos Palsar con resolución de 12,5 m por pixel para construir un perfil de elevación y extrapolar la superficie de la ladera con respecto a las zonas aledañas. Finalmente, se utiliza el *software* UDEC para generar un modelo de bloques con la información anteriormente mencionada.

1.2.2 Metodología para objetivo específico ii.

Se realiza un modelamiento numérico en el software UDEC, simulando la respuesta de un medio discontinuo (macizo rocoso con set de discontinuidades) sujeto a régimen estático. El caso estático busca poder determinar si es posible llegar a un estado de equilibrio. En caso de no llegar a un estado de equilibrio, lo cual es esencial en el desarrollo del modelo, se deben hacer modificaciones en el montaje, con el objeto de determinar un caso que efectivamente cumpla con lo deseado. Se recomienda corregir las opciones que potencialmente hacen fallar al modelo en el siguiente el orden (Itasca, 2014):

- Revisar el modelo geométrico.
- Revisar propiedades del material constitutivo y de los criterios de falla para las discontinuidades.
- Revisar las condiciones de borde.

1.2.3 Metodología para objetivo específico iii.

Esta etapa consiste en incorporar al caso estático los efectos del agua. Es necesario buscar herramientas dentro del programa que permitan aplicar en el modelamiento los factores desencadenantes propuestos. Se estudian y analizan los modos de flujo en que se puede simular la incorporación de agua y se escogen los que permitan representar mejor esta variable dada las condiciones de generación de la remoción. Luego se ejecutan una serie de modelos para entender el procedimiento bajo cada modo y se analiza el comportamiento y estabilidad de la ladera en cada caso.

2. Marco Teórico

Los modelos numéricos, en el área de la geomecánica, se desarrollan en programas computacionales que buscan representar la respuesta de un macizo rocoso sometido a ciertas condiciones iniciales, por ejemplo, estrés in situ, niveles de agua, condiciones de borde o excavaciones (Saavedra, 2018). El resultado de estos programas son el equilibrio o el colapso (Lorig & Varona, 2005). En este estudio, se busca analizar la respuesta de laderas que son perturbadas por la presencia de agua. La utilización del *software* UDEC es fundamental, ya que permite ejecutar los modelos que se quieren analizar basándose en el método de elementos distintos, que es un tipo de modelamiento numérico discontinuo.

2.1 Método de elementos distintos

El método de elementos distintos (MED) pertenece a la clasificación general de las técnicas de análisis discontinuos. Un medio discontinuo se distingue de uno continuo por la existencia de contactos o interfaces entre los cuerpos discretos que conforman el sistema. Los métodos de discontinuidad pueden clasificarse tanto por la forma en que representan los contactos como por la forma en que representan los cuerpos discretos en la formulación numérica (Itasca, 2018).

El término "método de elementos distintos" fue acuñado por Cundall y Strack (1979) para referirse a la representación de elementos discretos que, en particular, utiliza contactos deformables y una solución explícita en el dominio del tiempo de las ecuaciones de movimiento originales (Itasca, 2018). Los cuerpos pueden ser rígidos o deformables y los contactos entre los cuerpos son deformables (Vejar, 2016).

La masa de roca se configura como un conjunto de bloques discretos, mientras que las diaclasas se ven como interfaces entre cuerpos distintos, es decir, la discontinuidad se trata como una condición de borde. Las fuerzas de contacto y los desplazamientos en las interfaces de un conjunto de bloques bajo condiciones de esfuerzo se establecen a través de una serie de cálculos que determinan los movimientos de los bloques. Estos últimos resultan de la propagación, a través del sistema de bloque, de perturbaciones causadas por cargas aplicadas o fuerzas de cuerpo. Este es un proceso dinámico en el cual la velocidad de propagación depende de las propiedades físicas del sistema discreto (Itasca, 2018).

El comportamiento dinámico del ciclo de solución se representa numéricamente por un algoritmo de paso de tiempo en el que el tamaño del paso de tiempo está limitado por el supuesto de que las velocidades y las aceleraciones son constantes dentro del paso de tiempo. El método del elemento distinto se basa en el concepto de que el paso del tiempo es lo suficientemente pequeño como para que, durante un solo paso, las perturbaciones no puedan propagarse más lejos que entre un elemento discreto y sus vecinos inmediatos. Los cálculos realizados se alternan entre la aplicación de la segunda ley de Newton a las partículas y una ley de fuerza-desplazamiento en los contactos. La segunda ley de Newton se utiliza para determinar el movimiento de cada elemento, resultante de las fuerzas de contacto y cuerpo que actúan sobre ella, mientras que la ley de fuerza-desplazamiento se utiliza para actualizar las fuerzas de contacto que surgen a partir del movimiento relativo en cada contacto (Itasca, 2018).

Los modelos de elementos discretos deben cumplir con al menos las siguientes características (Itasca, 2018):

- Permite desplazamientos y rotaciones finitas de los cuerpos discretos, incluyendo despegue total.
- Reconoce automáticamente los nuevos contactos mientras progresan los cálculos.

Sin el primer atributo, no se podrían reproducir algunos mecanismos importantes en medios discontinuos, mientras que, sin el segundo, el programa estaría limitado a un pequeño número de cuerpos cuyas interacciones son conocidas con antelación.

2.2 Software UDEC.

The Universal Distinct Element Code (UDEC) es un programa numérico bidimensional que simula la respuesta casi-estática o dinámica a la carga de medios que contienen múltiples estructuras de discontinuidades que se intersectan. Utiliza el método de elementos distintos antes mencionado con el objetivo de estudiar potenciales modos de falla de pendientes de roca evaluando la influencia de discontinuidades en el macizo rocoso como diaclasas, fallas, planos de estratificación, etc. (Itasca, 2014)

Este programa es uno de los métodos de elementos distintos más utilizado (Vejar, 2016), el cual ha sido empleado para investigar una gran variedad de mecanismos de rotura en laderas de roca que van desde mecanismos planares simples (Costa et al., 1999) hasta inestabilidades complejas con toppling (Board et al., 1996; Benko y Stead, 1999; Hutchison et al., 2000; Nichol et al., 2002) y buckling (Stead y Eberhardt, 1997).

Los modelos pueden contener una mezcla de bloques rígidos o deformables. Los bloques deformables se definen mediante una malla continua de zonas de diferencias finitas, y cada zona se comporta de acuerdo con una ley prescrita lineal o no lineal de tensión-deformación (Figura 1). El movimiento relativo de las discontinuidades también se rige por relaciones de desplazamiento de fuerzas lineales o no lineales para el movimiento en la dirección normal y de corte. Los modelos de discontinuidades y las propiedades pueden asignarse por separado a discontinuidades individuales o conjuntos de estas (Itasca, 2018).

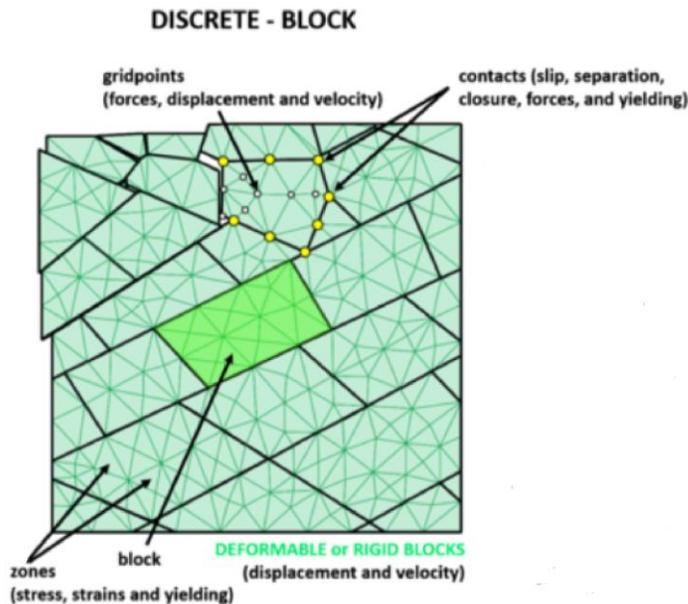


Figura 1: Representación de elementos definidos en un modelo UDEC (Itasca, 2018).

UDEC incorpora varios modelos de comportamiento de materiales para los bloques y las discontinuidades, lo cual permite una simulación representativa de respuesta para materiales geológicos discontinuos o similares. El programa se basa en cálculos de características lagrangeanas, lo cual es bastante adecuado para modelar grandes movimientos y deformaciones en un sistema de bloques. Además, admite un lenguaje de programación denominado FISH, con el cual se pueden escribir y generar nuevas funciones, extendiendo su utilidad (Itasca, 2014).

Debido a que no se limita a un tipo particular de problema o condición inicial, UDEC es capaz de simular y se utiliza para una amplia gama de análisis científicos, incluyendo el modelamiento de flujos de fluido o gas a través de las fracturas de un sistema de bloques impermeables, el cual será utilizado en este estudio.

2.3 Generación de Modelos

El primer paso para ejecutar una simulación en UDEC es crear el montaje del modelo, siguiendo tres componentes fundamentales del problema que deben ser especificadas (Itasca, 2014):

- Un modelo de bloque de elementos discretos con cortes para crear la geometría del problema.
- Comportamiento constitutivo y propiedades del material
- Condiciones iniciales y de borde.

La geometría queda definida en el modelo de bloques de elementos discretos. El comportamiento constitutivo y las propiedades del material asociadas determinan el tipo de respuesta que el modelo sufrirá dada una perturbación particular, mientras que las condiciones iniciales y de borde, definen la condición o estado de equilibrio (in-situ) que representa el escenario antes de introducir un cambio. De esta manera, es necesario determinar un caso estático para luego aplicar la perturbación que, particularmente en este estudio, consiste en la incorporación de agua al modelo.

2.3.1 Caso Estático

El modelo UDEC debe considerarse en un estado inicial de equilibrio de fuerzas antes de realizar alguna perturbación. Esto se hace para calibrar y contar con una representatividad óptima en el siguiente paso a realizar (Escudero, 2017). Se alcanza una solución estática o casi-estática cuando la tasa de cambio de la energía cinética se aproxima a un valor insignificante. Lo anterior se logra amortiguando las ecuaciones de movimiento. La fuerza en desequilibrio (*unbalanced force*) indica cuando se alcanza este estado, ya que representa el vector de fuerza nodal máxima. Un modelo se encuentra en equilibrio exacto si el vector de fuerza nodal neta en cada centroide o punto de cuadrícula de bloque es cero. Por lo tanto, se acepta un caso estático, cuando la fuerza máxima desequilibrada es pequeña en comparación con las fuerzas representativas en el problema y, por el contrario, si la fuerza en desequilibrio se aproxima a un valor constante distinto de cero, esto probablemente indica que se está produciendo dentro del modelo deslizamiento de diaclasas o falla de bloque y flujo plástico (Itasca, 2014).

El procedimiento de solución general para análisis estáticos en el programa se muestra en la Figura 2.

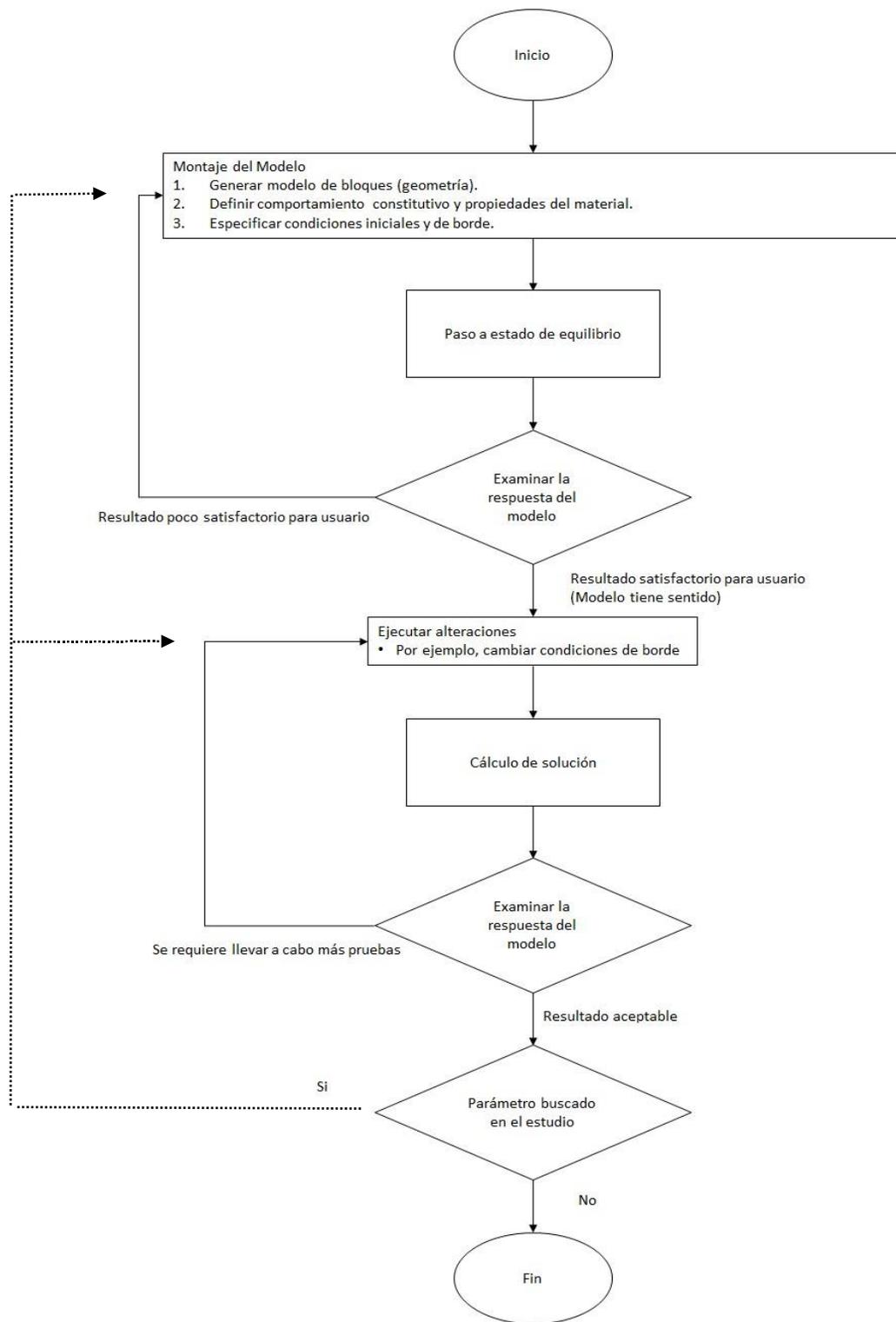


Figura 2: Procedimiento de solución general para análisis estáticos. Extraído desde Escudero (2017). Modificado de Itasca (2014).

En el caso de no alcanzar un estado de equilibrio, lo cual es fundamental en el desarrollo del modelo, se deben realizar modificaciones siguiendo el proceso recursivo mostrado en la Figura 2 hasta configurar la respuesta óptima. Se recomienda seguir el siguiente orden para descartar todas las opciones que potencialmente hacen fallar al modelo:

- Revisar el modelo geométrico.
- Revisar las propiedades del material constitutivo y de los criterios de falla para las discontinuidades.
- Finalmente revisar las condiciones de borde.

Con el propósito de definir las propiedades de los elementos que construyen el modelo, el software incorpora varios modelos constitutivos para representar el comportamiento de materiales, tanto para roca intacta como para las discontinuidades.

De este modo, para caracterizar la roca intacta se distinguen 3 grupos (Itasca, 2014):

- Modelo Nulo, utilizado para representar material removido o excavado.
- Modelo Elástico, incorpora los modelos: elástico-isótropo y elástico transversalmente isotrópico.
- Modelo Plástico, incluye los modelos: Ducker-Prager, Mohr-Coulomb, diaclasas ubicuas (*ubiquitous-joint*), endurecimiento/ablandamiento de la deformación (*strain-hardening/softening*), bilinear de endurecimiento/ablandamiento de la deformación de diaclasas ubicuas (bilinear *strain-hardening/softening ubiquitous joint*), doble fluencia (*double-yield*), Cam-clay modificado, Hoek-Brown, Hoek-Brown modificado Cysoil y Cysoil simplificado.

Cada modelo es desarrollado para representar un tipo específico de comportamiento constitutivo asociado con materiales geológicos. Los modelos elásticos son generalmente aplicables a casos en donde el deslizamiento a lo largo de discontinuidades es el mecanismo de falla predominante. El modelo de Mohr-Coulomb debería ser usado cuando los niveles de esfuerzo son tales que se espera una falla en el material intacto. En este último caso, los parámetros de cohesión y ángulo de fricción se encuentran disponibles con más frecuencia que otros parámetros para materiales geo-ingenieriles (Itasca, 2014). La Tabla 1 presenta un resumen de los modelos de bloques incorporados en UDEC con una breve descripción, ejemplos de materiales representativos y posible aplicación.

Tabla 1: Modelos constitutivos de bloques incluidos en el software UDEC (Itasca, 2014). Modificado de Aravena (2017).

	Modelo	Descripción	Material representativo	Aplicación (ejemplo)
	1. Nulo	Representa material que es removido del modelo.	Vacío.	Agujeros, excavaciones, etc.
Elástico	2. Isótropo	Representación simple de comportamiento lineal de material sin histéresis en la descarga.	Homogéneo con comportamiento lineal de <i>stress-strain</i> .	Materiales manufacturados (ej.: acero) con cargas menores a la carga límite.
	3. Transversalmente Isótropo	Otorga la posibilidad de simular capas de medios elásticos con diferentes módulos elásticos en las direcciones normal y tangencial.	Material finamente laminado, mostrando anisotropía elástica (ej.: pizarra).	Materiales laminados con cargas inferiores a la carga límite.
	4. Drucker-Pager	Criterio de falla simple donde el esfuerzo de cizallamiento es función del esfuerzo isótropo.	Aplicación limitada: Arcillas suaves de baja fricción.	Modelo común para comparación de programas de elementos finitos implícitos.
Plástico	5. Mohr-Coulomb	Representa una falla de corte donde el límite elástico (<i>Yield stress</i>) depende solo de los esfuerzos principales mayor y menor.	Materiales granulares sueltos y cementados: suelos, roca y concreto.	Mecánica general de suelo o roca (estabilidad de taludes o excavaciones subterráneas).
	6. <i>Ubiquitous-Joint</i>	Corresponde a un material Mohr-Coulomb que presenta anisotropía de fuerza bien definida debido a planos de debilidad interestratificados.	Material finamente laminado, mostrando anisotropía de fuerzas (ej.: pizarra).	Excavaciones cerca de estratos horizontales.
	7. <i>Strain-Hardening/Softening</i>	Basado en variaciones predeterminadas de las propiedades del modelo Mohr-Coulomb como función de la deformación plástica desviadora.	Materiales granulares que exhiben endurecimiento/ablandamiento no lineal (cambio en la resistencia al cizalle).	Estudios post fallamiento (ej.: colapso progresivo).
	8. <i>Bilinear Strain-Hardening/Softening Ubiquitous-Joint</i>	Generalización del modelo de diaclasas ubicuas que permite que las propiedades de resistencia de la matriz y la diaclasa se endurezcan o se suavicen.	Materiales laminados que exhiben endurecimiento/ablandamiento no lineal.	Estudios post fallamiento de materiales laminados.
	9. <i>Double-Yield</i>	Extensión del modelo <i>strain-softening</i> para simular la compactación irreversible, así como la deformación plástica en bandas de corte (<i>shear yielding</i>).	Material granular levemente cementado en donde la presión causa una disminución permanente de volumen.	Rellenos agregados hidráulicamente.
	10. <i>Cam-Clay</i> modificado	Explica la influencia del cambio de volumen en la deformabilidad y en la resistencia a fallar.	Materiales en los cuales la deformación y cizalle están en función del cambio de volumen.	Construcciones geotécnicas en arcillas.

11. Hoek-Brown	Es una relación empírica. Superficie no lineal de falla representando el límite de resistencia para roca intacta isotrópica y macizos rocosos.	Material de roca isotrópico.	Construcciones geotécnicas en roca.
12. Hoek-Brown modificado	El modelo modificado caracteriza el flujo plástico posterior a la falla por medio de simples elecciones de reglas de flujo dadas en términos de un ángulo de dilatación especificado por el usuario.	Material de roca isotrópico.	Construcciones geotécnicas en roca con cálculos de factor de seguridad.
13. Cysoil (<i>cap-yield</i>)	Es un modelo simple de endurecimiento/ablandamiento de la deformación para suelos caracterizado por una envoltura de falla por fricción de Mohr-Coulomb y una curva volumétrica no lineal.	Materiales que presentan decrecimiento de rigidez como desarrollo de la deformación plástica.	Construcciones geotécnicas en suelos blandos.
14. Cysoil simplificado	Simplificación del modelo Cysoil sin la curva volumétrica.	Versión simplificada para simular el comportamiento hiperbólico de la deformación (<i>strain</i>).	Construcciones geotécnicas en suelos blandos.

Asimismo, existen cuatro modelos estándar incorporados y un modelo opcional disponible para representar el comportamiento de las discontinuidades. Estos son: contacto puntual, contacto de área, contacto de área con debilitamiento por desplazamiento, fluencia continua y Barton-Bandis. El modelo de deslizamiento por contacto de área es más aplicable para estudios de ingeniería general ya que las propiedades de fricción y cohesión se encuentran disponibles más a menudo que otras propiedades de diaclasas. Los modelos de fluencia continua y Barton-Bandis son expresiones empíricas que requieren un conocimiento más detallado del comportamiento de la diaclasa (Itasca, 2014). La Tabla 2 presenta un resumen de los modelos para discontinuidades incorporados en el programa con una breve descripción, ejemplos de materiales representativos y posible aplicación.

Tabla 2: Modelos constitutivos de discontinuidades incluidos en el software UDEC. Modificado de Itasca (2014).

Modelo	Descripción	Material representativo	Aplicación (ejemplo)
1. Contacto Puntual (<i>Point Contact-Coulomb slip</i>)	Representa el contacto entre dos bloques donde el área de contacto es muy pequeña en relación con las dimensiones del bloque.	Aplicación limitada, material particulado, bloques ligeramente compactados de forma irregular.	Estabilidad de taludes en roca fracturada y rota altamente perturbada.
2. Contacto de área (<i>Area Contact-Coulomb slip</i>)	Representación lineal de rigidez de diaclasa y límite de fluencia. Está destinado a bloques estrechamente empaquetados con contacto de área.	Diaclasas, fallas, planos de estratificación en roca.	Mecánica de roca en general (por ejemplo, excavación subterránea).
3. Contacto de área con debilitamiento del desplazamiento (<i>Area Contact-Coulomb slip with displacement weakening</i>)	Simula el debilitamiento del desplazamiento de diaclasas por pérdida de fricción, cohesividad y/o resistencia a la tracción al comienzo de una ruptura por corte o tracción.	Diaclasas en roca que muestra distintas fuerzas máximas/residuales.	Mecánica de roca en general.
4. Fluencia Continua (<i>Continuously yielding</i>)	Modelo complejo que simula un comportamiento de debilitamiento continuo en función del desplazamiento plástico de cizalle acumulado.	Diaclasas en roca mostrando daño progresivo y comportamiento histerético.	Carga cíclica e inversión de carga con bucle histerético predominante; análisis dinámico.
5. Barton-Bandis	Modelo no lineal que utiliza directamente propiedades de índice de pruebas de laboratorio en diaclasas.	Diaclasas en roca definidas por las propiedades del índice de Barton-Bandis.	Estimación de cambios en aperturas hidráulicas.

En este trabajo se utiliza el modelo de Hoek-Brown (N°11 en Tabla 1) para la roca intacta y Mohr-Coulomb de contacto por área para las discontinuidades (N°2 en Tabla 2), ya que son los más indicados y simples de implementar dada las características geológicas que se definirán en los siguientes capítulos. A continuación, se explican y describen estos modelos a fin de entender los parámetros que utilizan.

Desde su introducción por Hoek y Brown (1980), en un intento de proporcionar los datos de partida para el análisis necesario en el diseño de excavaciones subterráneas en roca competente, el criterio de falla de Hoek-Brown ha evolucionado convirtiéndose en un criterio empírico no lineal válido para evaluar la resistencia de cualquier matriz rocosa isótropa en condiciones triaxiales (González de Vallejo, 2002; Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 2002). El criterio de Hoek-Brown generalizado (Hoek, 1994; Hoek, Kaiser & Bawden, 1995) incorpora todas las formulaciones anteriores y se define como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

donde σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura, σ_{ci} es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto, m_b es un valor reducido de la constante del material m_i , mientras que m_i , s y a son constantes del macizo rocoso. Estas últimas 3 variables dependen del valor GSI (*Geological Strength Index*) el cual proporciona un sistema para estimar la disminución de la resistencia que presentaría un macizo rocoso con diferentes condiciones geológicas. Una vez que se ha estimado el Índice Geológico de Resistencia, se pueden calcular los parámetros que definen las características de resistencia del macizo rocoso en la siguiente forma (Hoek & Brown, 1997):

$$m_b = m_i \times \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (2)$$

Para un $GSI \geq 25$, se aplica el criterio original de Hoek-Brown de la siguiente manera:

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

$$a = 0,5$$

Para un $GSI < 25$, o sea en el caso de macizos rocosos de muy mala calidad, se aplica el criterio modificado de Hoek-Brown:

$$s = 0$$

$$a = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad (4)$$

Para poder implementar este criterio, el programa solicita los parámetros del modelo Hoek-Brown mencionados anteriormente (a , m_i , m_b , s y σ_{ci}), además de la densidad (ρ) y las características elásticas de los materiales: Módulo de Young (E), Coeficiente de Poisson (ν), Módulo de deformación volumétrica (K) y Módulo de cizalle (S). Estos últimos dos parámetros son definidos por Itasca (2014) por las ecuaciones 5 y 6.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$S = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

La Tabla 3 resume los parámetros necesarios para aplicar el modelo constitutivo con sus respectivos sistemas de medidas. Los valores utilizados en este estudio se indican más adelante en la sección 4.3.

Tabla 3: Parámetros ingresados para el macizo rocoso con el criterio de Hoek-Brown.

Parámetro	Código UDEC	Descripción	Unidad de medida
Índice Geológico de Resistencia (GSI)	--	Indica la reducción de la resistencia de un macizo rocoso con respecto a la roca intacta para diferentes condiciones geológicas.	--
m_i	--	Es una constante que depende de las propiedades de la matriz rocosa (obtenida de ensayos).	--
m_b	hbmb	Valor reducido de constante m_i y GSI.	--
s	hbs	Valores que dependen del macizo rocoso obtenidos a partir del GSI.	--
a	hba		--
Densidad (ρ)	density	Relación entre la masa y el volumen de una sustancia.	[kg/m ³]
Módulo de deformación volumétrica o compresibilidad (K)	bulk	Mide la resistencia a la compresión uniforme y, por tanto, indica el aumento de presión requerido para causar una disminución unitaria de volumen dado.	[Pa]
Módulo de cizalle (S)	shear	Caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.	[Pa]
Coefficiente de Poisson (ν)	poisson	Define la relación entre la deformación transversal y axial.	--
Módulo de Young (E)	young	Define la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo.	[Pa]
Resistencia a la compresión simple (σ_{ci})	hbsigci	Esfuerzo que soporta una roca sin confinar.	[Pa]

Como se ha señalado, para modelar la resistencia de las estructuras se utiliza el criterio de ruptura de Mohr-Coulomb definido por una envolvente de ruptura modelada según la ecuación 7 en el espacio σ_1 - σ_3 , siendo $\sigma_1 > \sigma_3$ los esfuerzos principales.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (7)$$

Por ello, es necesario definir los parámetros de resistencia ϕ y c (fricción y cohesión), además de otros parámetros que controlan la ruptura de la discontinuidad y el contacto entre bloques, éstos son la rigidez (componente normal K_n y tangencial K_s) y el ángulo de dilatación (ψ). La Tabla 4 resume los parámetros necesarios para aplicar este modelo con sus respectivos sistemas de medidas. Los valores utilizados se indican más adelante en la sección 4.3.

Tabla 4: Parámetros ingresados para las discontinuidades con el criterio de Mohr-Coulomb.

Parámetro	Código UDEC	Descripción	Unidad de medida
Rigidez Normal (Kn)	jkn	Relaciones entre los esfuerzos o fuerzas aplicadas y los desplazamientos producidos por estas. Se refieren a la tasa de cambio de esfuerzo normal y cortante con respecto a los desplazamientos normal y de cizalle respectivamente.	[Pa/m]
Rigidez tangencial (ks)	jks		[Pa/m]
Ángulo fricción (ϕ)	jfriction	Ángulo de reposo de la superficie de deslizamiento.	Grados
Cohesión (c)	jcohesion	Resistencia inherente a la superficie de contacto.	[Pa]
Ángulo dilatación (ψ)	jdilation	Controla la cantidad de deformación volumétrica plástica desarrollada durante el corte plástico.	Grados

Por otro lado, el modelo de Hoek-Brown para bloques puede ser transformado y expresado en términos del modelo de Mohr-Coulomb. Las ecuaciones 8 y 9 definen los coeficientes de resistencia ϕ y c considerando los parámetros de Hoek-Brown (Hoek et al., 2002).

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6 am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6 am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (8)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6 am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (9)$$

donde $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma'_{ci}$.

Esto se hace ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir de la ecuación 1 para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$. Se puede obtener esta conversión fácilmente a través de un programa Windows llamado "Roclab" que puede ser bajado (gratis) de la página web www.rocscience.com.

El modelo de Mohr Coulomb para bloques requiere de los siguientes parámetros que ya fueron explicados anteriormente: densidad (ρ), módulo de deformación volumétrica (K) y cizalle (S), cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ). Además, el programa solicita un valor de tensión límite, definido por Itasca (2014) como:

$$\sigma_{max}^t = \frac{c}{\tan \phi}$$

donde “c” corresponde a la cohesión y “ ϕ ” al ángulo de fricción.

La Tabla 5 sintetiza los parámetros utilizados en este modelo constitutivo con los códigos UDEC y unidades de medidas. Los valores ingresados al programa se señalan más adelante en la sección 4.3.

Tabla 5: Parámetros ingresados para el macizo rocoso con el criterio de Mohr-Coulomb.

Parámetro	Código UDEC	Unidad de medida
Densidad (ρ)	density	[kg/m ³]
Módulo de deformación volumétrica o compresibilidad (K)	bulk	[Pa]
Módulo de cizalle (S)	shear	[Pa]
Ángulo fricción (ϕ)	friction	Grados
Cohesión (c)	cohesion	[Pa]
Tensión límite o máxima (σ_{\max}^t)	tension	[Pa]

2.3.2 Influencia del agua: flujo de fluidos en diaclasas.

UDEC tiene la capacidad para realizar el análisis del flujo de fluido a través de las fracturas y huecos de un sistema de bloques impermeables. Se realiza un análisis mecánico-hidráulico completamente acoplado en el que la conductividad de la fractura depende de la deformación mecánica y, en cambio, las presiones del agua de diaclasas afectan los cálculos mecánicos. Las presiones de poros en el estado estacionario se pueden asignar a las zonas dentro de los bloques deformables y las condiciones de contorno se pueden aplicar en términos de presiones de fluido o mediante la definición de un límite impermeable. Además, un medio poroso puede ser definido en el modelo para simular un campo de flujo regional (Itasca, 2018).

La implementación numérica de flujo de fluido en el programa utiliza la estructura de dominio (Figura 3). Se genera una red de dominios con el supuesto de que cada uno se llena de fluido a presión uniforme y que se comunica con sus vecinos a través de los contactos. Estos están separados por los puntos de contacto, que son los puntos en los que se aplican las fuerzas de interacción mecánica entre los bloques. Debido a que los bloques deformables están discretizados en una malla de elementos triangulares, los puntos de la malla (*gridpoints*) pueden existir no sólo en los vértices del bloque, sino también a lo largo de los bordes. El grado de refinamiento de la representación numérica de la red de flujo está vinculada a la discretización mecánica adoptada. En ausencia de la gravedad, una presión de fluido uniforme se supone que existe dentro de cada dominio, en el caso contrario, la presión se supone que varía linealmente de acuerdo con el gradiente hidrostático, y se define como el valor en el centro del dominio. Finalmente, el flujo se rige por la diferencia de presión entre dominios adyacentes (Itasca, 2018).

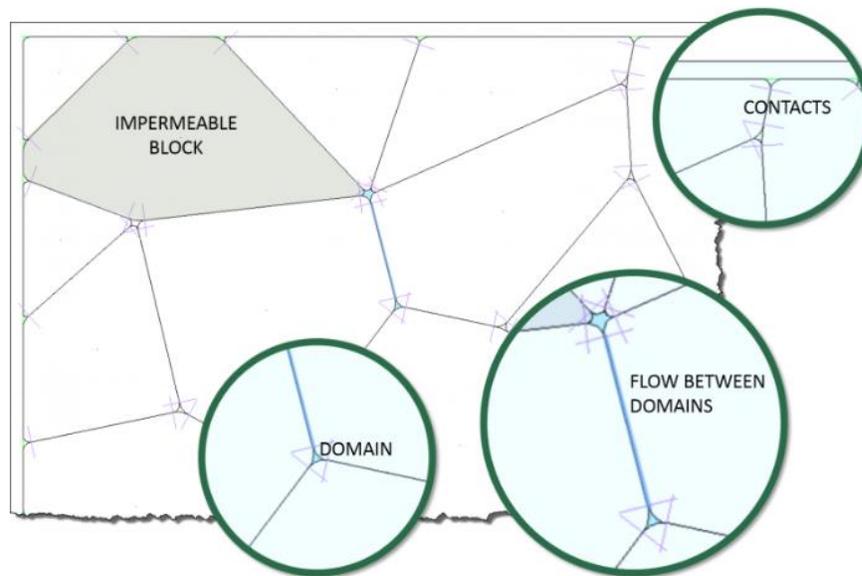


Figura 3: Representación de la estructura de dominios (Itasca, 2018).

El flujo es idealizado como flujo laminar viscoso entre placas paralelas. Un modelo de flujo visco-plástico también está disponible para simular el flujo de lechada de cemento en las discontinuidades. La relación de permeabilidad de diaclasas puede ser modificada y es posible simular un acoplamiento térmico-hidráulico de flujo en diaclasas, donde las variaciones de temperatura inducen cambios en la viscosidad y la densidad del agua (Itasca, 2018).

Los modos de cálculo de fluido disponibles por Itasca (2014) incluyen los siguientes:

- Flujo transitorio, líquido compresible.
- Flujo en estado estacionario, líquido compresible.
- Flujo transitorio, líquido incompresible.
- Flujo transitorio, gas compresible.
- Flujo transitorio, fluido de dos fases.

Los tres primeros modos son los que se podrían implementar para analizar la influencia del agua en la estabilidad de laderas, aunque hay estudios (Sugimoto et al., 2016) en que se ha analizado esta situación con la implementación de dos fases de fluidos en las discontinuidades, agua y aire, pero por motivos de tiempo, no será analizado en este trabajo. A continuación, los tres modos de flujo se explican brevemente con información extraída y modificada de Itasca (2014).

2.3.2.1 Modo de flujo transitorio en fluido compresible.

Corresponde a la formulación básica de flujo de fluidos en UDEC. Puede ser modelado por fluidos confinados o con superficie libre. Considera la estructura de dominios mencionada anteriormente y por cada paso del tiempo (*timestep*), los cálculos determinan la geometría actualizada del sistema, lo que genera los nuevos valores de aperturas para todos los contactos y volúmenes de todos los dominios. Las tasas de flujo a través de los contactos también son calculadas actualizando las presiones de los dominios. Luego, la fuerza ejercida por el fluido de los bordes de los

bloques circundantes puede ser obtenida y así el esfuerzo total y la tensión normal efectiva de cada bloque son calculadas.

Para aberturas pequeñas el fluido parece ser un resorte rígido, con una rigidez mayor que la típica rigidez de las discontinuidades. Esto implica que el paso del tiempo mecánico es reducido (*timestep*). El paso del tiempo del fluido es inversamente proporcional al *bulk modulus* y la conductividad de las fracturas. Para típicas aberturas, se obtienen valores del paso del tiempo del orden de milisegundos, por lo tanto, este algoritmo puede ser aplicado en problemas de simulación corta. La aplicación principal de este modo es en el modelamiento de la presión como respuesta de diaclasas llenas de fluido afectadas por una carga dinámica de corta duración (por ejemplo, un terremoto).

2.3.2.2 Modo de flujo de estado estacionario en fluido compresible.

Es un esquema de solución computacional más rápida que la formulación básica. En este caso, se realizan varias simplificaciones que hacen el algoritmo muy eficiente para muchos problemas prácticos. La condición de estado estacionario no involucra los volúmenes de dominios. El esquema consiste en asignar a un dominio determinado un volumen "V", el cual, insertado en la ecuación del paso de tiempo, conduce al mismo intervalo de tiempo para todos los dominios. La contribución de cambio en el volumen del dominio a la variación de la presión puede ser abandonada, eliminando la influencia de la rigidez del fluido, siendo innecesario especificar el *bulk modulus*. Cuando se usa esta opción, el paso de tiempo del flujo de fluido se establece arbitrariamente igual al paso de tiempo mecánico.

2.3.2.3 Modo de flujo transitorio en fluido incompresible.

Es un algoritmo alternativo en UDEC, que se ha implementado para posibilitar el análisis de flujo transitorio en escalas de tiempo mayores que lo que permite el algoritmo básico (Sección 2.3.2.1). El fluido es asumido como incompresible, y se utiliza un procedimiento iterativo dentro de cada paso de tiempo de flujo, ajustando las presiones de diaclasas y los volúmenes de dominio.

El algoritmo avanza realizando una secuencia de pasos de fluido, donde el tiempo de cada paso (*timestep*) lo define el usuario. Por cada paso, se realiza una serie de pasos de relajación mecánica para lograr la continuidad del flujo en cada dominio. Dado el supuesto de la incompresibilidad del fluido, el flujo neto en un dominio durante un paso de fluido debe ser igual al incremento del volumen del dominio. La diferencia entre estos es el volumen de líquido desequilibrado, el cual se reduce gradualmente durante el procedimiento de relajación.

Este modo puede acelerar mucho el cálculo para análisis transitorios, pero es restringido a simulaciones de respuesta acoplada mecánica-fluido de sistemas sometidos a cargas o que experimenta procesos cuasi estáticos. Por lo tanto, en cada paso de fluido, un equilibrio debe ser posible, de lo contrario, el procedimiento de iteración mecánica puede no converger. Este esquema no es adecuado para problemas que involucran fallas extensas, o cuando los bloques pueden desprenderse.

En definitiva, para poder simular la presencia de agua en las discontinuidades se necesita definir una serie de parámetros que indican las propiedades del fluido, de las diaclasas y del dominio, además de las condiciones de borde y las condiciones

insitu. La Tabla 6 muestra los parámetros que se ingresan al programa con su descripción y unidad de medida.

Tabla 6: Parámetros necesarios para simular fluidos en UDEC (Itasca, 2014).

	Parámetro UDEC	Descripción	Unidad de medida
Propiedades Fluido	fluid density	Densidad de fluido (sólo con gravedad).	kg/m ³
	fluid bulkw	Módulo de compresibilidad del fluido.	Pa
	cohv	Límite de elasticidad (yield strength). Para fluidos húmedos no-newtonianos. El valor predeterminado es 0.	Pa
Propiedades flujo en diaclasas	jperm	Factor de permeabilidad de diaclasas (teórico es 1/12μ).	1/(Pa·s)
	--	Viscosidad dinámica del fluido (μ).	Pa·s
	azero	Abertura de diaclasa con cero esfuerzos normales.	m
	ares	Abertura residual. Valor mínimo para la abertura (bajo cierre mecánico no afecta la permeabilidad).	m
	expa	Exponente de la ley cúbica se puede cambiar (el valor predeterminado es 3).	-
	empb	Se puede cambiar el coeficiente de la ley cúbica (el valor predeterminado es 1).	-
	set capratio	Relación de abertura máxima permitida (el valor predeterminado es 5).	-
Propiedades de dominio	set capmin	Abertura hidráulica mínima (el valor predeterminado es el valor mínimo para ares).	m
Condiciones de borde	stress	Parámetros de esfuerzo de borde: xx xy yy.	Pa
	ygrad	Gradiente de esfuerzo de borde a lo largo del eje y: xxy xyy yyy.	-
	xgrad	Gradiente de esfuerzo de borde a lo largo del eje x: xxx xyx yyx.	-
	pp	Presión del fluido húmedo en el borde (valor predeterminado 0).	Pa
	pxgrad	Gradiente de presión del fluido húmedo a lo largo del eje x.	-
	pygrad	Gradiente de presión del fluido húmedo a lo largo del eje y.	-
	impermeable	Define superficie de borde impermeable.	-
	fboundary	Red de medio poroso creada alrededor del límite exterior del modelo.	-
Inicialización INSITU	pp pxgrad pygrad ywtable	Distribución de presión en dominio.	Pa
	stress xgrad ygrad	Esfuerzos totales.	Pa
	zone_pp	Presiones de poro en bloques.	Pa
	sat	Saturación de agua en dominios [0-1].	-

En general, en todos los modos se utilizan la mayoría de los parámetros mencionados anteriormente, excepto en algunos casos particulares. La Tabla 7 indica los parámetros que pueden ser utilizados por cada modo de flujo.

Tabla 7: Parámetros de fluidos aplicados por cada modo (Itasca, 2014).

	Parámetro UDEC	Modelos de flujo		
		Líquido compresible flujo estacionario	Líquido compresible flujo transitorio	Líquido incompresible flujo transitorio
Propiedades Fluido	fluid density	X	X	X
	fluid bulkw		X	
	coh	X	X	X
Propiedades flujo en diaclasas	jperm	X	X	X
	azero	X	X	X
	ares	X	X	X
	expa	X	X	X
	empb	X	X	X
	set capratio	X	X	X
Propiedades de dominio	set capmin		X	X
Condiciones de borde	stress	X	X	X
	ygrad	X	X	X
	xgrad	X	X	X
	pp	X	X	X
	pxgrad	X	X	X
	pygrad	X	X	X
	impermeable	X	X	X
	fboundary	X		
Inicialización INSITU	pp pxgrad pygrad ywtable	X	X	X
	stress xgrad ygrad	X	X	X
	zone_pp	X	X	X
	sat		X	X

3. Área de Estudio

3.1 Ubicación y vías de acceso.

El área de estudio se encuentra ubicada en la Región Metropolitana de Chile, en el sector del "Cajón del Maipo" correspondiente a la comuna de San José de Maipo, Provincia de Cordillera, a unos 50-60 km al Este de la ciudad de Santiago. La zona abarca un cuadrante de aproximadamente 51 km² y está comprendida entre los 33°16' S y 33°20' S y entre los 70°04' W y 69°59' W. Se encuentra ubicada en la parte alta del Estero Parraguirre, limita al oeste con el Parque Río Olivares y con la frontera argentina hacia el este (Figura 4).

El acceso con vehículo es posible únicamente desde Santiago transitando por Avenida La Florida hacia el sur, siguiendo por la Avenida Camilo Henríquez. Luego, se debe tomar la Ruta G25, también conocida como "Camino Al Volcán", pasando por las localidades de El Canelo, Los Peumos hasta llegar a la intersección con la ruta G-345 "Camino al Alfalfal". Se debe transitar por esta última vía pavimentada bordeando la ribera sureste del río Colorado pasando por Los Maitenes hasta llegar a El Alfalfal y a la central hidroeléctrica homónima, donde se encuentra la barrera de control de la empresa AES Gener. Para ingresar se debe solicitar una autorización al Ejército de Chile y se debe avanzar por un buen camino ripiado hasta cruzar a la ribera norte del río donde existen caminos asociados a la minera Río Colorado que alcanzan a llegar a aproximadamente la mitad del Estero Parraguirre. Desde este punto, solo se puede seguir subiendo hasta la zona de estudio a pie. Es una zona de difícil acceso y mayormente se ha visitado en helicóptero por algunos investigadores.

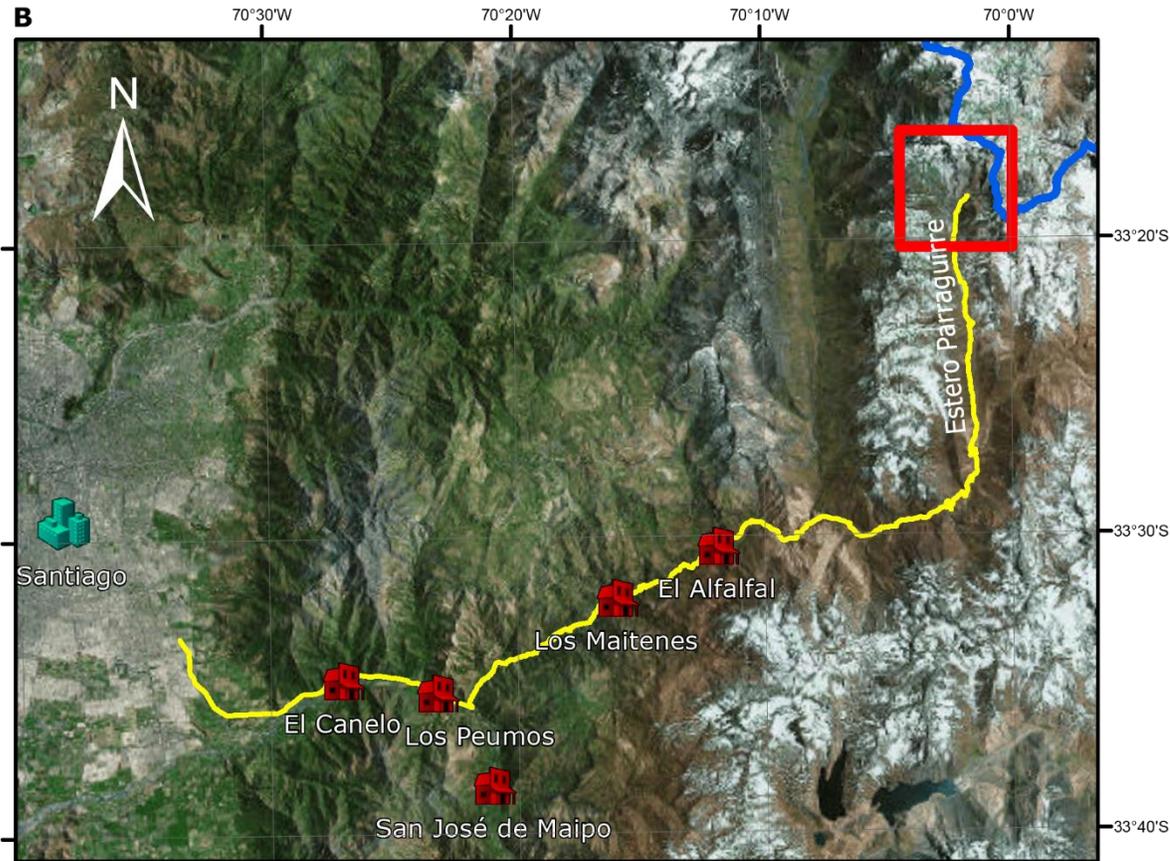
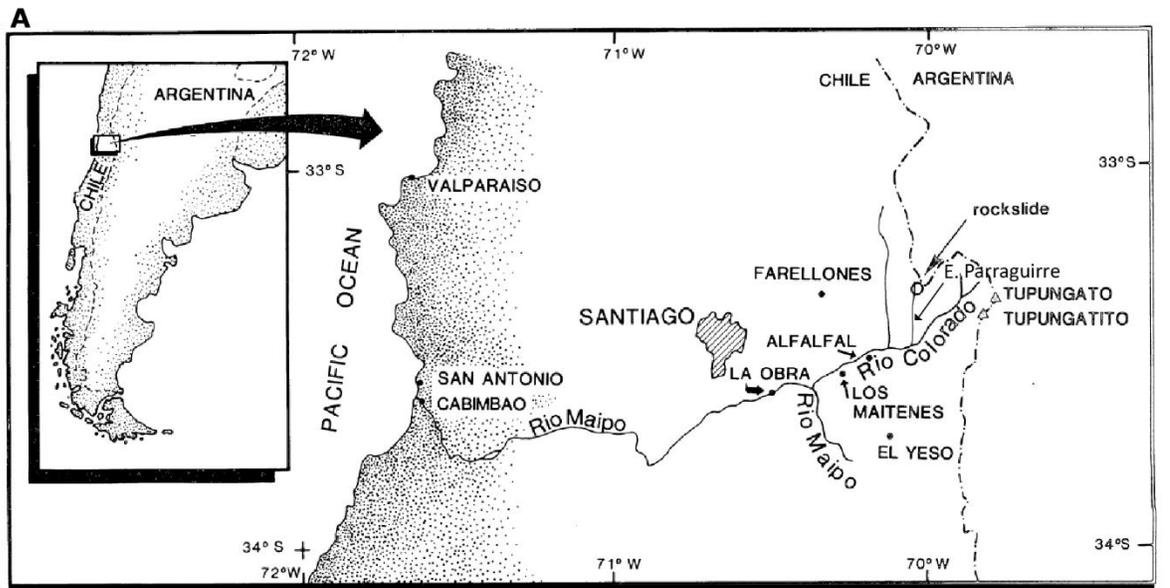


Figura 4: Mapa de ubicación de la zona de estudio. A) Ubicación Río Colorado, Andes Centrales, Chile (Casassa & Marangunic, 1993). B) Ruta de acceso desde Santiago.

3.2 Antecedentes

3.2.1 Evolución Geológica

La configuración actual del margen occidental de Sudamérica es el resultado una evolución de por lo menos 600 millones de años en los que se reconocen tres periodos o etapas que se pueden relacionar con los siguientes episodios mayores en la evolución del continente (Farías, 2007):

- Evento de acreción continental durante el Proterozoico Superior-Pérmico, que condujo a la amalgamación de Gondwana.
- Extensión continental, correspondiente al inicio del desmembramiento gondwánico durante el Pérmico Superior-Jurásico Inferior.
- Subducción casi continua, que corresponde a la etapa de destrucción y deriva de los bloques continentales que constituyeron Gondwana, desde el Jurásico Medio hasta el Presente.

La primera etapa, desde el Proterozoico Superior hasta el Paleozoico Superior, se caracteriza por presentar múltiples eventos acrecionarios, donde sucesivos terrenos colisionaron con el margen occidental y construyeron el megacontinente de Gondwana (en orden, Sierras Pampeanas ó Pampia, Cuyania-Precordillera y finalmente Chileña). Cada acreción habría determinado diferentes fases orogénicas, estructurando así su constitución y arquitectura primaria (Mpodozis and Ramos, 1989; Ramos, 1994; Charrier et al., 2007).

Durante el Pérmico Superior a Jurásico Inferior se produjo el Ciclo Tectónico Pre-Andino donde de acuerdo con datos paleomagnéticos (Vilas and Valencio, 1978) se produce una pausa en la deriva continental atribuida a la fase final de la consolidación del continente. Kay et al. (1989) proponen que la acumulación de calor en la corteza superior sería responsable de la producción de grandes volúmenes de magma silíceo, como consecuencia de la aislación térmica. Por lo tanto, las condiciones de quiescencia en la tectónica de placas y en los relieves formados durante las etapas compresivas previas habrían contribuido a gatillar el desarrollo de cuencas extensionales de orientación NNW-SSE que probablemente siguieron las antiguas suturas (Charrier et al., 1979; Mpodozis and Ramos, 1989; Mpodozis and Kay, 1990).

En el Jurásico Superior se instaura e intensifica la subducción dando inicio al Ciclo Andino. Se establece un arco volcánico calcoalcalino en las cercanías del borde costero (Oliveros et al., 2006) y se desarrollan cuencas de tras-arco paralelas al arco con varios eventos de transgresiones y regresiones marinas que finalizan en el Aptiano-Albiano (Farías, 2007).

Entre el Cretácico Superior y el Eoceno Inferior (?) se desarrolló una marcada discordancia de erosión con cierta angularidad entre las unidades mesozoicas y las eocenas-oligocenas, por lo cual las diferentes fases tectónicas que habrían ocurrido antes de la extensión eocena-oligocena, en la región estudiada de Chile Central, no se han determinado (Farías, 2007). Sin embargo, han sido descritas inversiones de estructuras extensionales durante el Cretácico Superior (Cobbold and Rossello, 2003; Ramos and Folguera, 2005; McQuarrie, 2002).

Durante el Eoceno Superior-Oligoceno, se reconoce el desarrollo de la cuenca Abanico, asociado a un periodo extensional de intraarco (Godoy et al., 1999; Charrier et al., 2002; Fuentes, 2004; Kay et al., 2005; Muñoz et al., 2006). La fase extensional habría concluido aproximadamente hace 22 Ma, dando paso a un evento contraccional generado por un aumento de la tasa de convergencia y causando la inversión de la cuenca Abanico (Charrier et al., 2002). Durante esta etapa, se deposita el miembro inferior de la Formación Farellones, de manera concordante y sintectónica sobre la Formación Abanico (Charrier et al., 2002a)

Desde los ~16 Ma (Mioceno Inferior a Medio), un continuo régimen compresivo causó la deformación y alzamiento de la región montañosa (Armijo et al., 2010). La faja plegada y corrida de piel fina del Aconcagua (FPCA) se desarrolló al este de la Cuenca Abanico afectando depósitos de trasarco del Jurásico superior y Cretácico inferior (Muñoz et al., 2006; Muñoz-Saez et al., 2014).

Finalmente, desde el Mioceno Superior se inicia la configuración del relieve actual de la cordillera y se comienzan a producir fallas fuera de secuencia en la faja plegada y corrida de Aconcagua, producto del mayor acortamiento, sobre todo en el sistema de fallas El Diablo- Las Leñas (Charrier et al., 2009).

3.2.2 Morfoestructuras

El segmento andino ubicado a la latitud de la zona de estudio muestra cinco unidades morfoestructurales principales, dispuestas en franjas de orientación N-S. De oeste a este éstas son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Precordillera, más el Antepaís Andino (Figura 5). Cabe destacar que el área de estudio se ubica en la Cordillera Principal.

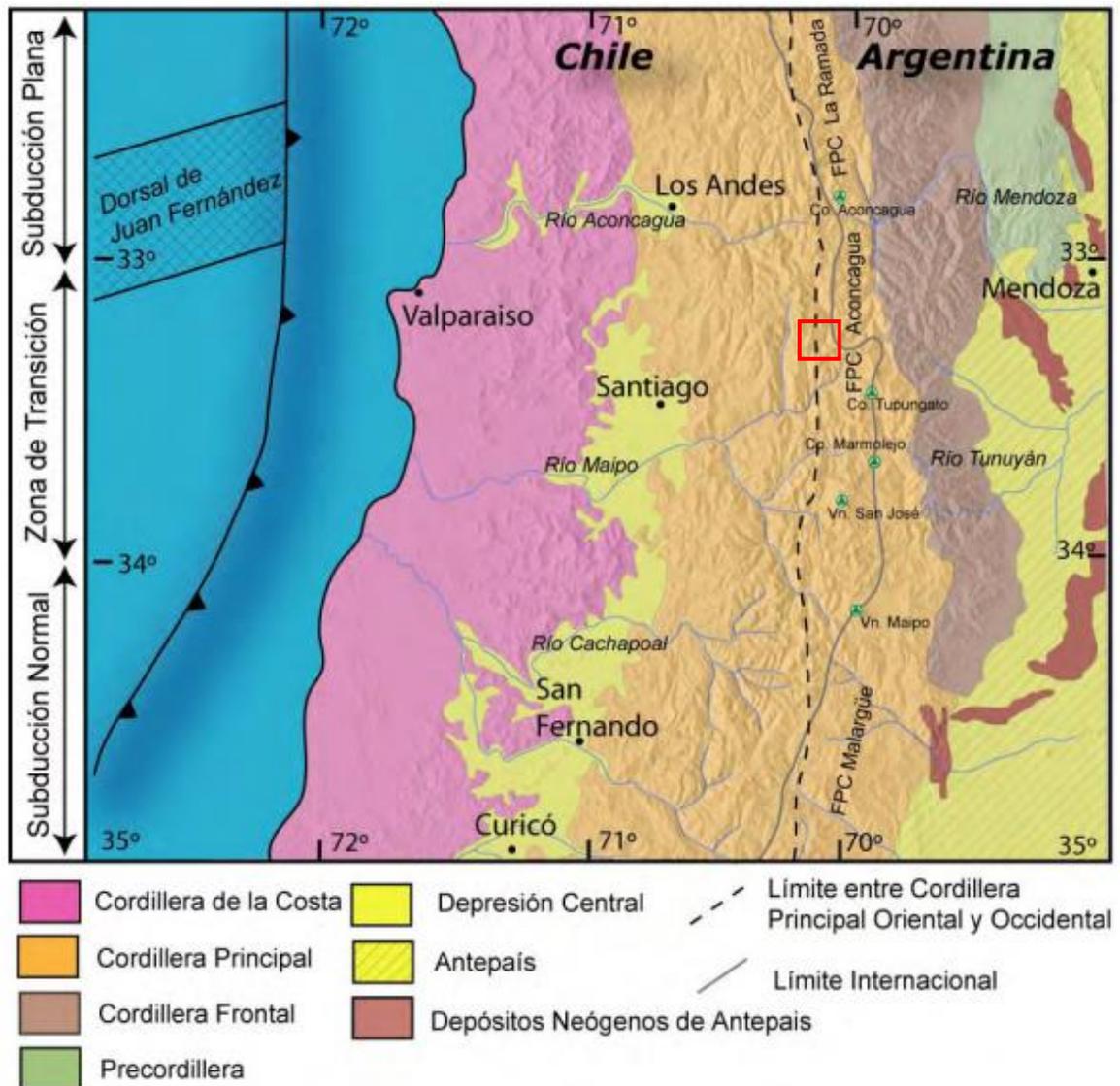


Figura 5: Principales morfoestructuras de la segmentación andina entre los 32° y 35° S. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yáñez (2003). Modificado de Fock (2005). La zona de estudio se ubica dentro del recuadro rojo.

La Cordillera de la Costa está caracterizada por un relieve que, en su mayoría, rara vez supera los 1500 m s.n.m., pero algunas cimas pueden sobrepasar los 2000 m s.n.m.. El sector occidental está constituido por un basamento cristalino y metamórfico Paleozoico en las cercanías de la costa, mientras que hacia el este afloran rocas cristalinas del Mesozoico Inferior. En su parte más oriental, se encuentra formada por secuencias volcánicas y sedimentarias Mesozoicas (Triásico y el Cretácico Superior) y un cordón de cuerpos intrusivos de edad Cretácica Superior que marca el borde oriental (Wall et al., 1999; Sellés y Gana, 2001; Fock, 2005; Farías, 2007).

La Depresión Central se extiende desde los 33° S hasta los 40° S y está constituida por un relleno sedimentario y volcano-sedimentario con algunos niveles cineríticos (depósitos fluviales y aluviales recientes principalmente, que en algunos lugares superan los 500 m de espesor) (Thiele, 1980; Araneda et al., 2000; Rauld, 2002; Farías, 2007). Esporádicamente su basamento aflora en forma de "cerros isla", con alturas entre 650 y 480 m s.n.m. decrecientes de este a oeste y cordones que

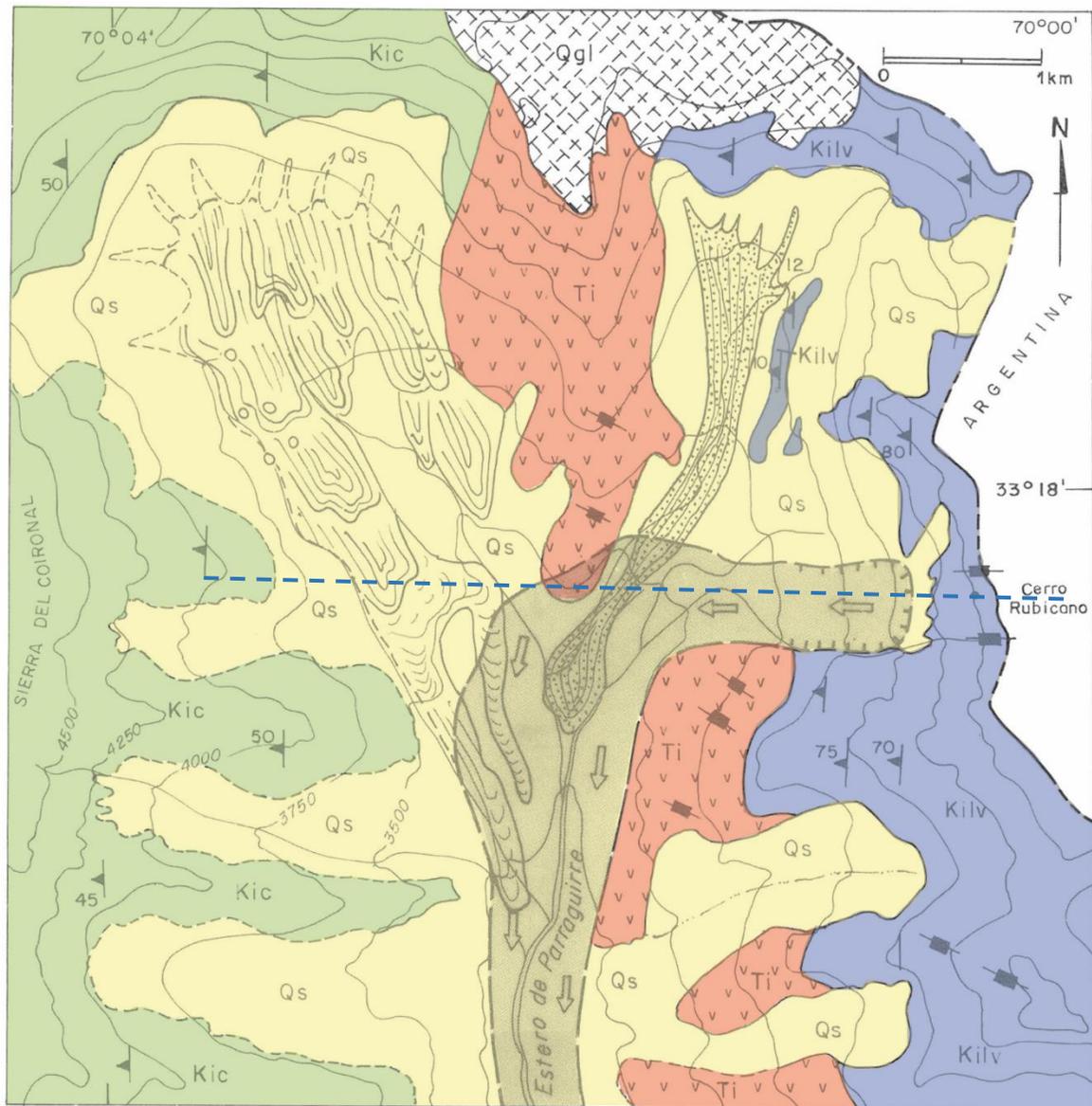
aíslan esta depresión (angosturas y cuevas). Al norte de los 33° S, la Depresión Central desaparece, dando paso a una serie de cordones montañosos baja altitud separados por valles esencialmente rectos y continuos que conectan la Cordillera Principal con la Cordillera de la Costa (los Valles Transversales) (Fock, 2005; Farías, 2007). Al sur de los 33° S el límite oriental de la Depresión Central es abrupto y marcado, limitado por la Cordillera Principal de los Andes, mediante un sistema de fallas inversas de vergencia oeste (Rauld, 2002; Charrier et al., 2005; Fock, 2005; Rauld et al., 2006).

Entre los 32° y 35° S se encuentran bien desarrolladas las cordilleras Principal y Frontal. La Cordillera Principal se encuentra formada principalmente por rocas Cenozoicas y Mesozoicas y puede dividirse en tres franjas (occidental, central, y oriental). La franja occidental de la Cordillera Principal está conformada por rocas de la Formación Abanico (Eoceno Superior? - Mioceno Inferior), fuertemente deformadas. Al este, se ubica la Formación Farellones, la cual se encuentra débilmente deformada, salvo sus niveles inferiores y es intruída por distintos cuerpos Miocenos. La franja central de la Cordillera Principal comprende los afloramientos de los niveles basales de la Formación Farellones que sobreyacen a la Formación Abanico oriental y limita hacia el este con el basamento Mesozoico por medio de un sistema de fallas de vergencia al este (Davidson and Vicente, 1973). Por último, la franja oriental de la Cordillera Principal está constituida por unidades Mesozoicas (Jurásico-Cretácico Medio) fuertemente deformadas. En conjunto, las unidades Mesozoicas y Cenozoicas, que constituyen las franjas central y oriental de la Cordillera principal, conforman las fajas plegadas y corridas de La Ramada, Aconcagua y Malargüe (Fock, 2005; Farías, 2007).

La Cordillera Frontal corresponde al bloque que conforma el frente cordillerano argentino constituido por un basamento Pre-Cámbrico, Paleozoico y Triásico, mientras que la Precordillera, está compuesta por rocas del Paleozoico Inferior principalmente (Fock, 2005). El Antepaís Andino se presenta como el piedemonte oriental de la Cordillera de los Andes en esta región. Su elevación fluctúa entre los 900 a 1000 m s.n.m. a los 33°S aumentando hacia el sur. Se encuentra cubierto por capas sedimentarias y cineríticas syn- y post-orogénicas Neógenas, subyacidas por sedimentos y volcánicas de edad Jurásico-Paleógeno. Bajo ellas, discordantemente se preserva el basamento Pre-Jurásico (Farías, 2007).

3.2.3 Geología General

El área de estudio comprende fundamentalmente rocas estratificadas volcánicas y sedimentarias (continentales y marinas), cortadas o deformadas por rocas ígneas intrusivas y cubiertas o rodeadas por depósitos no consolidados. En la Figura 6 se puede visualizar el mapa geológico de la zona extraído de Hauser (2002).



KEY

- | | | | |
|---|--|---|--|
|  | Flow path |  | Qs : Scree or colluvial deposits |
|  | Kettle holes |  | Ti : Intrusive: mainly andesite, dacite and diorite |
|  | Lobulate-tongue shaped spatulate debris and mud active solifluxion lobes |  | Kic : Colimapu Formation: sedimentary and volcanoclastic continental rocks (sandstones, conglomerates, limestones, red claystones and andesites) |
|  | Area involved in mass movement |  | Kilv : Lo Valdés Formation: sedimentary rocks including, limestones, shales, calcareous sandstones, conglomerates breccias and gypsum |
|  | Fresh ice block moraines | | |
|  | Strike and dip of bedding | | |
|  | Subvertical major fractures | | |
|  | Detachment scarp | | |
|  | Glaciers | | |

Figura 6: Geología y Geomorfología del deslizamiento de roca ocurrido en el Estero Parraguirre, 1987. En línea punteada azul se traza el perfil geológico del estero. Modificado de Hauser (2002).

A continuación, se describen brevemente las unidades identificadas en el área, basándose en los trabajos de Thiele (1980) y Fock (2005).

3.2.3.1 Unidades Estratificadas

- Formación Lo Valdés (Titoniano Medio a Inferior – Barremiano?)

Fue definida por González (1963) en el lugar homónimo en el valle del río Volcán. Su base y techo son concordantes con las Formaciones Río Damas y Colimapu respectivamente. Corresponde a una secuencia de: calizas grisáceas-azuladas, de fractura concoidal y espesor regular; calizas y calcilutitas negruzcas finamente laminadas; lutitas y areniscas calcáreas de colores gris claro a púrpura; y conglomerados y brechas. También exhibe capas lenticulares de yeso interestratificadas. Presenta intercalaciones de rocas volcánicas andesíticas con algunas capas de sedimentos hacia la parte inferior de la unidad (Hallam et al., 1986). Tiene un espesor aproximado de 1350 m y presenta una gran variedad de especies de fósiles, *Exogyra*, *Cuyaniceras*, *Paradontoceras*, *Thurmannia*, *Berriasella*, *Trigonia*, *Spiticeras*, *Leanza* y *Lucina*, entre otras.

- Formación Colimapu (Hauteriviano - Albiano)

Fue definida por Klohn (1960) en la quebrada homónima, afluente del río Maipo como conjunto sedimentario de origen terrestre. Se superpone concordantemente a los estratos de la Formación Lo Valdés e infrayace concordantemente, a la Formación Abanico. Sin embargo, es posible que su techo constituya una importante superficie de erosión, considerando el lapso que representa el contacto con la unidad suprayacente. Se compone de una secuencia de areniscas y lutitas rojas, conglomerados arenosos gris-rojizos, lutitas rojas con niveles de rocas piroclásticas y algunas lavas andesíticas y calizas, en capas lateralmente discontinuas. El conjunto se habría depositado en un ambiente altamente oxidante y su espesor estimado alcanza un valor aproximado de 2000 m. La edad mínima de esta formación, determinada mediante Carófitas fósiles, sería Albiana (Martínez & Osorio, 1963). Específicamente en el área de estudio se dispone como un potente paquete de pelitas rojas cortadas por numerosos filones andesíticos verdes, el cual se extiende hasta el valle del río Olivares, predominantemente en una disposición subvertical (Castro, 2012).

3.2.3.2 Unidades Intrusivas

- Unidad Intrusiva I

Están ubicados principalmente en la parte más oriental del segmento en estudio, como por ejemplo en la zona del Portezuelo de Colina, y corresponden a intrusivos de gran extensión que intruyen hasta las unidades más jóvenes como la Formación Farellones. Corresponden principalmente a granodioritas, monzogranitos y monzonitas cuarcíferas. Se le asigna una edad fini-miocena.

- Unidad Intrusiva II

Está formada por intrusivos de menor extensión que la anterior, principalmente por stocks, lacolitos, filones-manto y diques, que cortan hasta la Formación Farellones.

3.2.3.3 Depósitos No Consolidados

En la zona de estudio se reconocen depósitos fluviales, fluvioglaciares, aluviales, lacustres, gravitacionales y glaciales.

Los depósitos fluviales, fluvioglaciares y aluviales se presentan relleno de todos los valles interiores de la región levantada. Están caracterizados por presentar materiales de variados tamaños, bloques a gravas, arenas, limos y arcillas con distintas composiciones relacionadas a las distintas unidades litológicas de la zona.

Los depósitos lacustres se componen de limos y arcillas, finamente laminados, acumulados en lagos formados detrás de algunas morrenas frontales o de depósitos producidos por desmoronamientos en diferentes valles, destacándose especialmente el valle del río Colorado, principal valle presente en la zona de estudio.

Los depósitos gravitacionales se reconocen prácticamente en toda el área. Los más importantes son aquellos resultantes de la reptación del suelo y talud que producen acumulaciones detríticas importantes en la base de las pendientes (Castro, 2012). Los materiales de los depósitos más nuevos están sueltos, muchos estabilizados, pero otros en niveles inestables posibilitando la generación de movimientos importantes.

Los depósitos glaciales son esencialmente morrenas marginales y acumulaciones de detritos provenientes de glaciales de roca y se hallan ubicados en circos o nichos de las altas cumbres. Se pueden encontrar en la mayoría de las cabeceras de esteros sobre la cota de 2.500 m s.n.m.

3.2.4 Clima y Vegetación

En la zona central de Chile existe un ciclo anual definido, caracterizado por un período invernal húmedo y un período estival seco y de larga duración. Este régimen se conoce como régimen de clima templado mediterráneo y abarca desde los 30° S hasta los 40° S, aproximadamente (Cartes, 2008). Las precipitaciones en el centro y sur de Chile son principalmente de origen frontal, con sistemas que se desarrollan en el Océano Pacífico y viajan hacia el este. El movimiento estacional de norte a sur de los vientos del oeste da como resultado un ciclo de precipitación anual con una cantidad máxima que cae en los meses de invierno (Carrasco, et al., 2008).

El área presenta un clima templado cálido a los 1200 m s.n.m. con temperaturas medias anuales entre los 12-14°C. Sobre los 1700 m s.n.m. el promedio anual de temperaturas es más bajo (10,5°C) (Hauser, 2002). En la cordillera de los Andes se distingue un clima frío de altura sobre los 3000 m de altitud, donde existen bajas temperaturas que permiten una mayor acumulación de nieve y campos de hielo de tipo permanentes en cumbres y quebradas de la alta cordillera (Cartes, 2008; Comte, 2017). El área, para la existencia de acumulación de nieve, es relativamente amplia, con una altitud aproximada de 3.500 m.s.n.m para la isoterma 0 °C (Carrasco, et al., 2008; Cartes, 2008). Además, más del 90% de las nevadas en los Andes centrales (entre 30 y 38 ° S) se producen entre abril y septiembre (Falvey & Garreaud, 2007). Durante el invierno, las temperaturas durante la mayoría del día son de 20-25°C característico de condiciones periglacial (Hauser, 2002).

La vegetación en la zona es característica de alta montaña, determinada por la altura y el relieve abrupto y montañoso. En la parte baja existe presencia de

matorrales sub andinos y andinos hasta los 2000 metros aproximadamente. Sobre esta altura es predominante la vegetación del tipo estepa altoandina presentando plantas bajas. Sobre los 3000 metros, se presenta el desierto alto andino que posee escasa o nula vegetación (Muñoz et al., 2000; Comte, 2017).

Para el periodo de 1931-1978 se registra un promedio de precipitaciones anuales de 522,3 mm, en forma de lluvia concentrada en los meses de invierno. Sobre los 1800 m s.n.m. las precipitaciones ocurren como nieve. Sin embargo, durante el invierno de 1987, incrementaron los niveles de caída de nieve mucho más alto que el promedio anual, por lo que el agua equivalente a la nieve caída alcanzó los 1473 mm (Hauser, 2002).

3.2.5 Remoción en masa de noviembre 29, 1987

El domingo 29 de noviembre de 1987, a las 10:33, ocurrió un notable deslizamiento en la cuenca del río Colorado en los Andes Centrales de Chile. La remoción se inició por un deslizamiento de rocas cerca de la frontera entre Chile y Argentina, específicamente en el lado oeste de Cerro Rabicano, en las cabeceras del Estero Parraguirre. Luego, se transformó en un flujo de detritos de alta velocidad que fluyó por el estero, afluente del Río Colorado, llegando hasta este último y recorriendo 57 km desde su fuente (Hauser, 2002).

El deslizamiento se originó a 4350 m s.n.m. en una pendiente muy pronunciada que consiste en rocas altamente fracturadas. Las rocas en el área de origen, que no están mapeadas en detalle, consisten principalmente en caliza con intercalaciones de yeso y andesita (Figura 6). El bloque de deslizamiento (*slab*) se reconoce como largo y delgado de 1000 m de longitud, que se extiende desde 4350 a 3400 m s.n.m., con un ancho promedio de 500 m y un grosor promedio de 20 m (Figura 7), lo que arroja un volumen estimado de $6,0 \times 10^6 \text{ m}^3$. Se sugiere que la superficie de deslizamiento principal consistía en un plano de estratificación curvilinear y liso de caliza, y la superficie de ruptura superior alrededor de la parte superior del deslizamiento correspondía a una fractura de penetración preexistente, perpendicular al plano de estratificación (Hauser, 2002).

Las Figuras 7 y 8 muestran un esquema del deslizamiento ocurrido (Hauser, 2002) y un perfil geológico, respectivamente. Se reconocen dos formaciones en las laderas del estero Parraguirre cortadas por un intrusivo central, hacia el este la Formación Lo Valdés y hacia el oeste la Formación Colimapu. En términos generales, las principales estructuras que se han reconocido son sinclinales, fallas inversas y discordancias debido a que, las secuencias sedimentarias de los Andes de Chile Central se encuentran intensamente fracturadas y deformadas. Estas se presentan con un rumbo norte-sur y con manteos de alto ángulo 70° - 75° , favoreciendo la generación de deslizamientos en las pendientes con alto relieve. También se presentan fracturas subverticales.

Entre los factores que habrían generado esta remoción en masa, se considera una falla de corte probablemente asociada a la infiltración de aguas superficiales. Las rocas altamente inestables presentes en la zona, además de un año excepcionalmente nevoso y altas tasas de fusión de nieve avalan esta proposición. Se sugiere que el agua se proporcionó, en una primera instancia, por el derretimiento normal y acelerado de la cubierta de nieve, estimada en un metro en el Estero Parraguirre, por las altas temperaturas registradas en los días anteriores y posteriores a la remoción

(Casassa & Marangunic, 1993). En particular, el día 30 de noviembre a las 9:35 la temperatura a los 4600 m de altitud cerca del área de deslizamiento era de 16°C (Ugarte, 1988). Si se considera un metro de nieve sobre un área de origen de 137,500 m² con una densidad de 450 kg/m³, el equivalente en agua que podría generar es de 61,875 m³. Aún no está claro, sin embargo, cómo el deslizamiento de rocas incorporó agua y se transformó en un flujo de detritos devastador (Casassa & Marangunic, 1993).

En un principio se creía que el deslizamiento inicial fue gatillado por sismos superficiales generados por el incremento en la actividad del volcán Tupungatito, localizado 11 km al este de la zona afectada (González-Ferrán, 1988, 1995). Sin embargo, Eisenberg & Pardo (1988) establecieron que no se registraron señales de actividad sísmica en las estaciones sismológicas en Chile central ese día ni días previos. Además, reportan un pequeño sismo con una magnitud local de 4.5 y se sugiere que esta actividad sísmica fue un efecto y no una causa del deslizamiento.

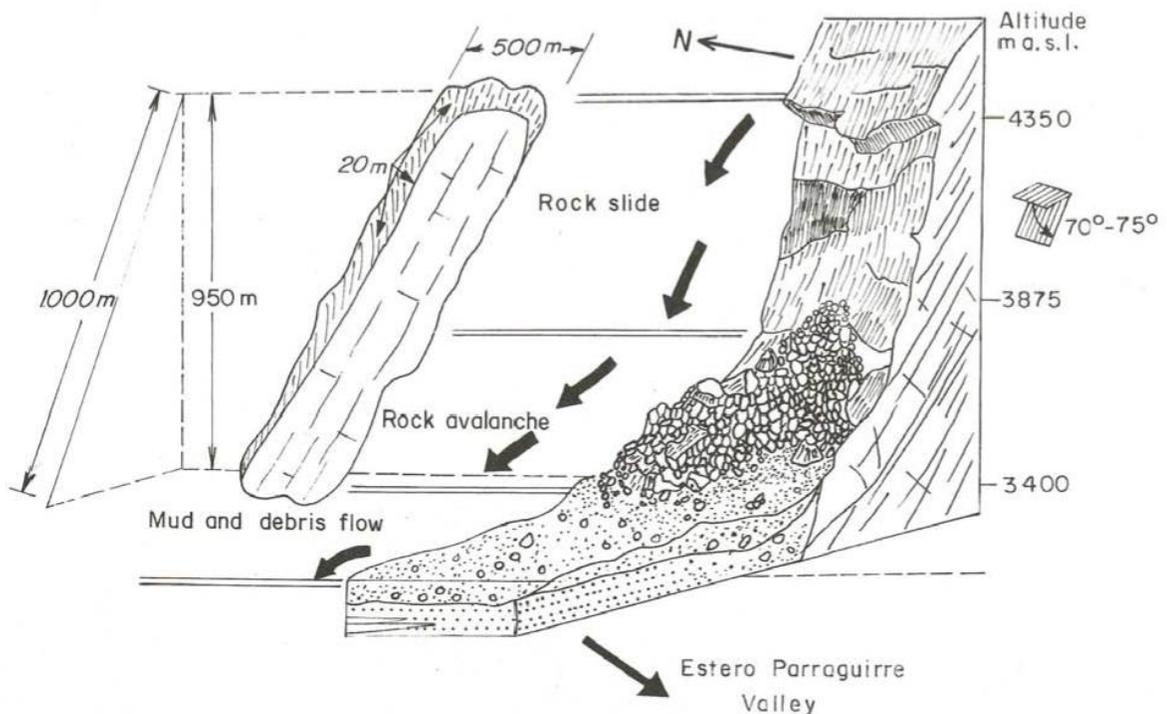


Figura 7: Esquema de zona de despegue del 29 de noviembre, 1987, deslizamiento de roca mostrando estructuras geológicas y la transformación en flujo de detritos. Extraído de Hauser (2002).

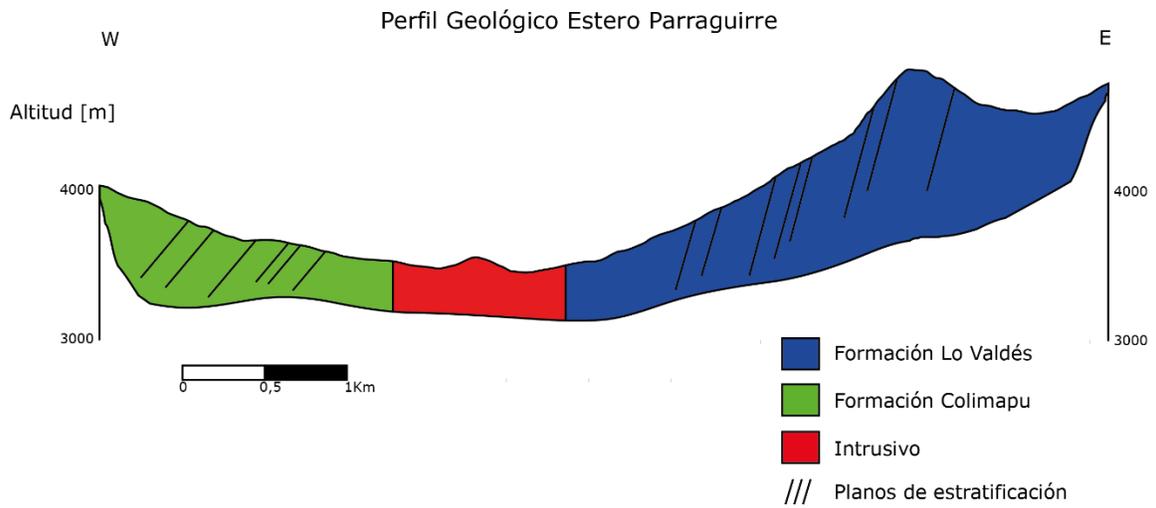


Figura 8: Perfil geológico esquemático del Estero Parraguirre. La traza del perfil de elevación se muestra en la Figura 6. La topografía es generada a partir de un DEM extraído de Alos Palsar con resolución de 12,5m por píxel. Los contactos del intrusivo son desconocidos por lo que a modo de simplificación se definen verticales. Elaboración propia.

4. Desarrollo del modelo

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo numérico elaborado para la ladera del Cerro Rabicano, donde se generó el deslizamiento y avalancha de rocas presentado en la sección anterior.

La zona ha sido escogida como un ejemplo de deslizamientos generados por incorporación de agua en la estructura, con la finalidad de conocer y aplicar herramientas que simulen este efecto sobre la estabilidad de los taludes. Para el área no se cuenta con información de tipo geotécnica y, por lo tanto, esta se define a partir de bibliografía, que será mencionada en detalle más adelante, asignando parámetros que representen de la mejor manera las condiciones geológicas del área, pero también buscando validar el modelo estático de la zona.

A continuación, se presentan en la Tabla 8 los pasos seguidos en el proceso de elaboración del modelo base, previo a la incorporación del agua, los cuales serán explicados en los próximos subapartados.

Tabla 8: Lista de pasos para la elaboración del modelo base.

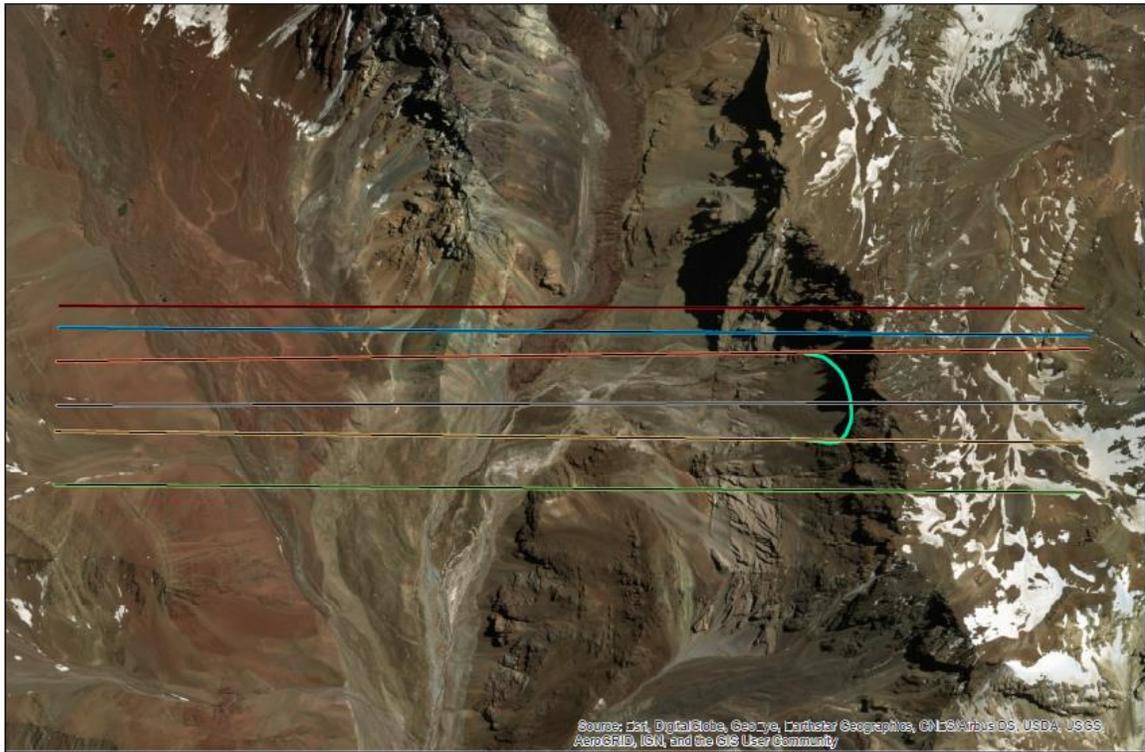
1.	Construcción de la topografía del talud
2.	Construcción de la geometría del modelo
3.	Determinación de parámetros de modelos constitutivos
4.	Especificación de condiciones de borde
5.	Validación del modelo estático

4.1 Construcción de la topografía del talud

La geometría de la ladera busca tener representatividad geológica y espacial de las condiciones de la zona de deslizamiento antes de que ocurra la remoción. De este modo se puede simular una respuesta del talud bajo condiciones similares a la realidad.

El proceso de obtención de datos topográficos para establecer el perfil de deslizamiento se realiza a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM). Como no se cuenta con uno de estos, anterior al momento de la remoción, es necesario adaptar un perfil de elevación actual.

Por esta razón, se generan en el programa ArcMap seis perfiles de elevación a partir de un DEM extraído de Alos Palsar con resolución de 12,5 m por píxel con el objetivo de extrapolar la superficie de la ladera con respecto a las zonas aledañas y generar un perfil topográfico representativo. La Figura 9 muestra la traza de los perfiles en planta. El perfil 3 (en color gris) representa la topografía (actual) de la zona dentro del deslizamiento, mientras que los otros perfiles se ubican en los bordes laterales del escarpe -inferido basado en Hauser (2002)- y en las zonas fuera del deslizamiento hacia el norte y sur.



Leyenda

- Escarpe
- Perfil0
- Perfil1
- Perfil2
- Perfil3
- Perfil4
- Perfil5

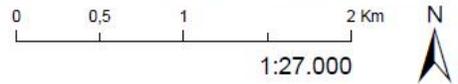


Figura 9: Mapa de la zona de estudio con la traza de los 6 perfiles generados. El escarpe es inferido por imágenes de Google Earth y basado en Hauser (2002).

Los perfiles de elevación generados se muestran en la Figura 10, donde se puede observar que la morfología de la ladera varía de norte a sur cerca de la zona de deslizamiento.

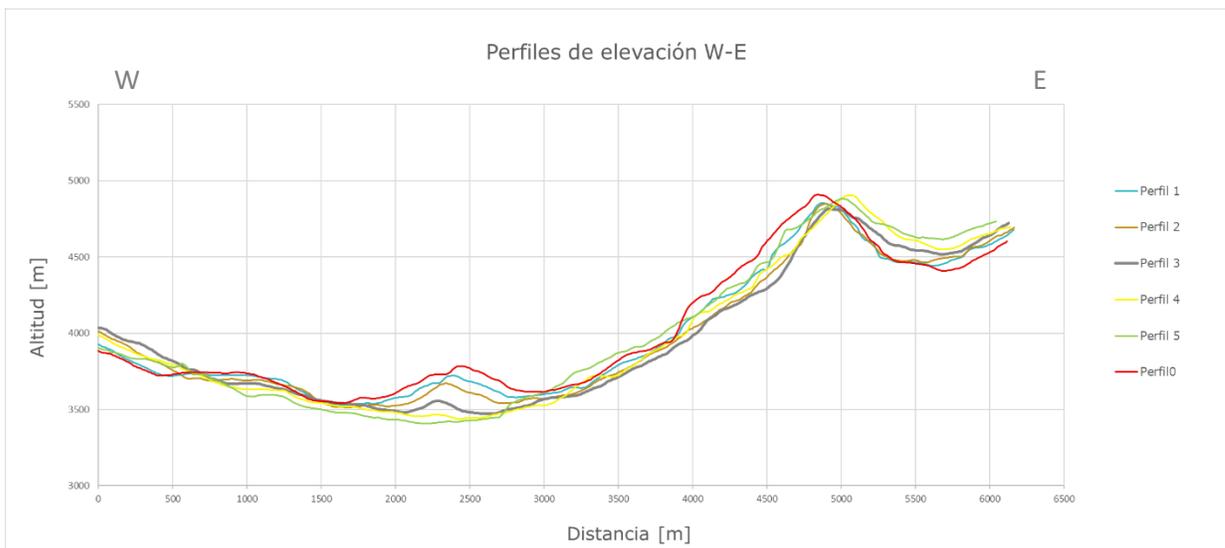


Figura 10: Perfiles de elevación.

Para escoger un perfil representativo se ocupa el perfil 3 como base, por ser el perfil actual del lugar donde ocurrió la remoción y se modifica en el tramo deslizado considerando el perfil 2, ya que este último es el más cercano a representar la geometría antigua dado el volumen de material deslizado. Dicho de otra manera, el perfil 2 es el que presenta menores diferencias de altitud en el segmento deslizado con respecto al perfil actual, por lo tanto, el grosor del *slab* sería más cercano al indicado en bibliografía, a pesar de que supera los 20m estipulados. De esta forma, la topografía, además, es suavizada. Al estimar el volumen de deslizamiento con el perfil actual y final, se obtiene incluso el doble que el mencionado en la sección 3.2.5.

En la Figura 11 se muestra la comparación de los perfiles 2 y 3, mientras que en la Figura 12 se puede observar la comparación del perfil 3 con el perfil final construido. En ambas figuras se indica en verde el segmento de deslizamiento aproximado (1 km) indicado por Hauser (2002).



Figura 11: Comparación perfil de elevación 2 y 3. En verde se muestra la ubicación aproximada del deslizamiento considerando la cota superior de 4350 m s.n.m. y la longitud de 1000m indicadas en Hauser (2002).

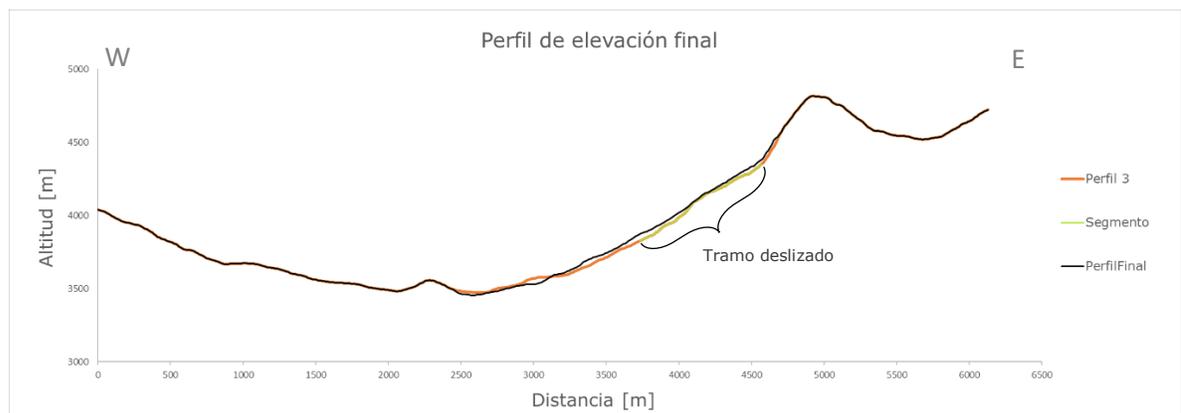


Figura 12: Perfil de elevación final. En verde se muestra la ubicación aproximada del deslizamiento considerando la cota superior de 4350 m s.n.m. y la longitud de 1000m indicadas en Hauser (2002).

4.2 Construcción de la geometría del modelo

Una vez obtenida la topografía (Anexo A) se procede a construir la geometría del talud y el modelo de bloques. Se genera un modelo de 6128m de ancho y de 4783m el punto más alto, con orientación W-E. La parte inferior de modelo (base) fue cortada a los 3200m de altura con el fin de facilitar los tiempos de ejecución. Además, se delinea el intrusivo en la parte central del talud guiándose por la Figura 8, es decir, debido a que se desconocen específicamente sus límites (el mapa de la zona es antiguo y en imágenes de Google Earth se observan cubiertos por depósitos no consolidados), los contactos son inferidos y, en profundidad, se trazan verticales para simplificar la construcción y ejecución de los modelos.

Sumado a esto, se agregan las estructuras identificadas según Hauser (2002) en las Figuras 6 y 7. En el bloque del lado este del modelo se generan 2 set de estructuras, uno manteniendo al oeste en 75° con un espaciamiento de 40m (lo que representaría los planos de estratificación de la Formación Lo Valdés) y otro perpendicular al anterior con un espaciamiento de 195m (esquemático en figura 7). Mientras que en el bloque del lado oeste se agrega 1 set de estructuras manteniendo hacia el oeste con 50° y con un espaciamiento de 50m (representando los planos de estratificación de la Formación Colimapu). El espaciamiento es definido de esta forma considerando que un valor menor, observado en imágenes e indicado en estudios realizados en otras zonas con las mismas formaciones caracterizadas (González, 1963; Fock, 2005; Mardones, 2016, Núñez, 2018), generaría tiempos de ejecución muy largos. En otras palabras, se prueban valores de espaciamientos de más grandes a pequeños hasta que el programa lo admita y considerando que los resultados con el tiempo de procesamiento deben ser apropiados.

Finalmente, como se muestra en el modelo geométrico de la Figura 13, las estructuras se disponen a lo largo de todo el perfil tanto en la horizontal como en la vertical excluyendo la zona media del intrusivo.

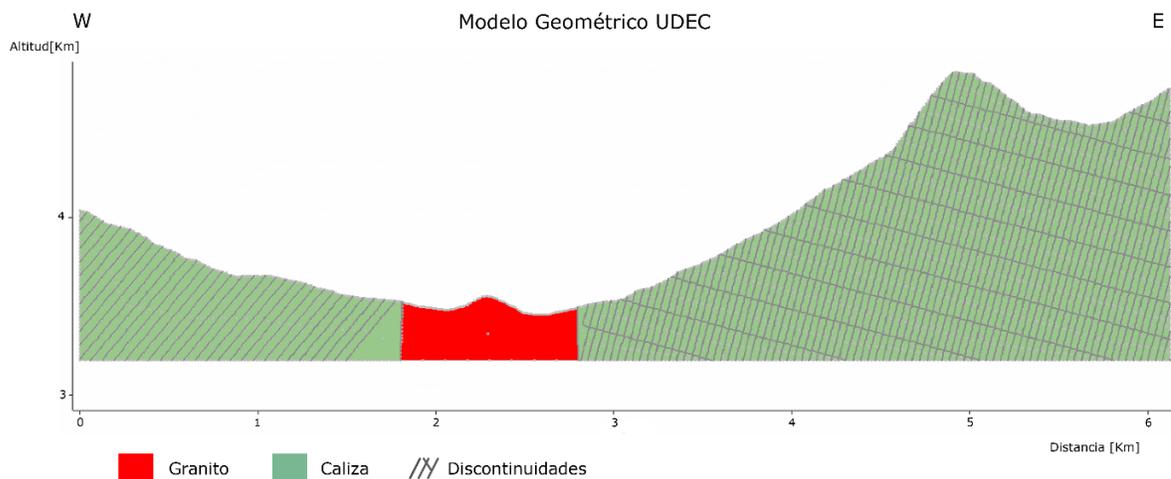


Figura 13: Representación de la ladera en UDEC.

4.3 Determinación de Parámetros de modelos constitutivos

Luego de generar el modelo de bloques en el programa, se procede a ingresar los parámetros de los modelos constitutivos asociados a cada tipo de material y discontinuidades. Estos valores requeridos no son directos, o no son lo suficientemente específicos, al no contar con ensayos realizados en la zona de estudio, por lo que se debe encontrar un modo deductivo para definirlos con respecto a otros casos o estudios que si se tenga información. Los datos son extraídos principalmente de bibliografía (González de Vallejo, 2002; Hoek & Brown, 1997; Bandis et al., 1983; Barton, 1973) y de algunos ejemplos estudiados (Escudero, 2017; Itasca, 2014) que serán especificados más adelante, y que sean acordes con la geología del área, tratando de representar condiciones que validen el modelo estático.

Como se mencionó anteriormente, para modelar la resistencia de las estructuras se utiliza el criterio de ruptura de Mohr-Coulomb. La Tabla 9 muestra los valores de los parámetros ingresados en UDEC.

Tabla 9: Datos utilizados para discontinuidades con el criterio de Mohr-Coulomb.

Rigidez Normal (jkn)	59 [GPa/m]
Rigidez tangencial (jks)	11 [GPa/m]
Ángulo fricción (ϕ)	38°
Cohesión (c)	10 [kPa]
Factor de permeabilidad (jperm)	83,3[1/Pa·s]
Abertura de diclasas (azero)	0,0002 [m]
Abertura residual (ares)	0,0005 [m]

Los valores de jks y jkn se determinan a partir de la recopilación de datos realizada por Read & Stacey (2009) considerando el promedio de los valores reportados en Bandis et al. (1983) para discontinuidad moderadamente meteorizada en caliza. El ángulo de fricción es definido considerando los valores mencionados en Barton (1973) para discontinuidades rugosas y algunos ejemplos de Itasca (2014). De estos mismos ejemplos se obtienen los parámetros asociados al flujo de agua azero y ares, asumiendo una pequeña abertura de las estructuras (<1mm), mientras que jperm teóricamente se define como $1/12\mu$, siendo μ la viscosidad dinámica del agua igual a 10^{-3} . La cohesión es adoptada de bibliografía (González de Vallejo, 2002) considerando el valor bajo para discontinuidades con relleno arcilloso. Las tablas extraídas de la bibliografía relacionadas con los parámetros mencionados se encuentran en el Anexo B.

Con respecto al macizo rocoso, la ladera será representada por dos tipos de roca, estratos de caliza por donde ocurre la remoción y un intrusivo de granito que aflora en el centro del estero en el perfil analizado (Figura 13). Se realiza una simplificación y se consideran todos los estratos del mismo tipo de roca (caliza) para

reducir la complejidad de la geometría y los cálculos posteriores. Además, debido a que la zona de interés se centra en los estratos al lado este del intrusivo, se considera que, en este estudio, no influye el tipo de roca que puedan representar los estratos hacia el oeste. Las Tablas 10 y 11 muestran los parámetros introducidos en el programa para ambos tipos de roca.

Tabla 10: Características de la ladera y parámetros ingresados en el macizo rocoso con el criterio de Hoek-Brown para calizas.

GSI	40
m_i	8
m_b	0,94
s	0,00127
a	0,5
Densidad (ρ)	2600 [kg/m ³]
Módulo de deformación volumétrica (K)	29,4 [GPa]
Módulo de cizalle (S)	17,64 [GPa]
Coefficiente de Poisson (ν)	0,25
Módulo de Young (E)	44,1 [GPa]
Resistencia a la compresión simple (σ_{ci})	100 [MPa]

Tabla 11: Características de la ladera y parámetros ingresados en el macizo rocoso con el criterio de Hoek-Brown para granito.

GSI	50
m_i	33
m_b	5,533
s	0,003865
a	0,5
Densidad (ρ)	2800 [kg/m ³]
Módulo de deformación volumétrica (K)	40,833 [GPa]
Módulo de cizalle (S)	18,846 [GPa]
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3
Módulo de Young (E)	49[GPa]
Resistencia a la compresión simple (σ_{ci})	200 [MPa]

De este modo, los parámetros de la Tabla 10 para el macizo rocoso de caliza son estimados a través de bibliografía incluida en el Anexo B, donde los últimos 6 parámetros se asumen de acuerdo a características generales de densidad, propiedades elásticas y resistencia para roca intacta de caliza (González de Vallejo, 2002) utilizando, además, las ecuaciones 5 y 6 mencionadas en la sección 2.3.1. De la misma manera, para estimar el valor de la constante m_i se considera caliza micrítica en la categorización de Hoek & Brown (1997) y el GSI es estimado a partir de imágenes de la zona (Casassa & Marangunic, 1993; Hauser, 2002) asumiendo un

macizo muy fracturado. En este caso, los parámetros de Hoek-Brown (m_b , s y a) son calculados a partir de los anteriores como se indica en el capítulo 2.

Los valores de la Tabla 11 para el intrusivo de granito, son extraídos de un ejemplo del mismo tipo de roca del trabajo realizado por Escudero (2017) que anteriormente habían sido estimados de manera similar según los trabajos de Glueer et al. (2015), Serey (2011) y González de Vallejo (2002).

4.4 Especificación de condiciones de borde

Con respecto a las condiciones de borde del modelo base, se aplica en los bordes laterales la restricción de velocidad 0 [m/s] en el eje x , mientras que en el borde inferior (base) se indica una velocidad 0 [m/s] en el eje y (Figura 14). La base inmóvil se define con el objetivo de que, al agregar la gravedad, el modelo no cayera por efecto de ésta, mientras que la condición lateral es para que el sistema no deslice hacia los lados.

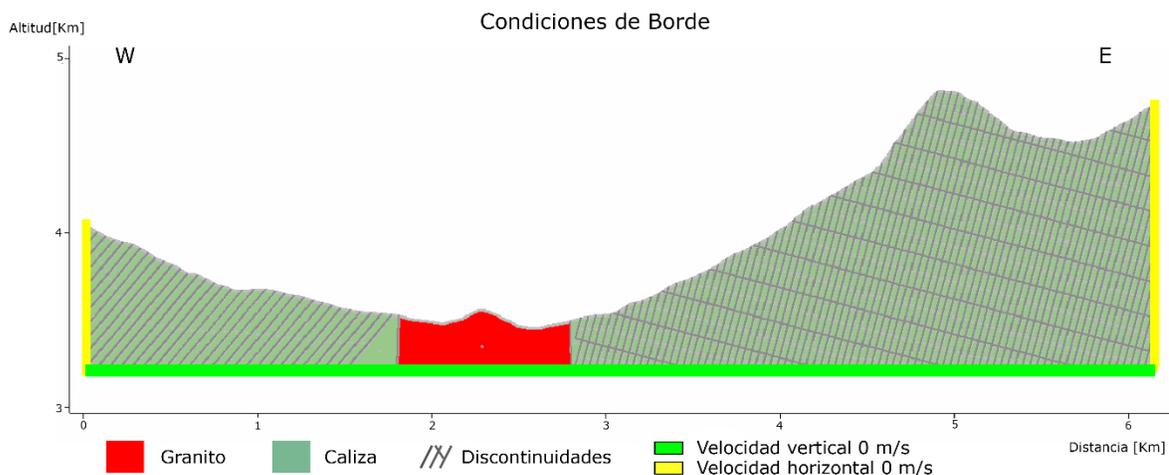


Figura 14: Condiciones de borde de velocidad para el modelo estático.

4.5 Validación del modelo estático

Una vez definido y construido el modelo es importante verificar que se encuentre en un estado inicial de equilibrio cuando se ejecuta solo bajo los efectos de la gravedad. En tal caso se podrá señalar que el modelo es estático.

Para validar que el modelo se encuentre en un estado estable se consideran dos criterios, el desbalance de fuerzas y el desplazamiento neto de puntos de control. Los puntos de control se definen y se fijan cerca de la superficie del modelo para caracterizar el comportamiento de la ladera y el movimiento de la remoción comparando cada modelo. Si el desplazamiento de cada punto converge a un valor entonces el modelo se encuentra en equilibrio estático. García (2016) indica que los desplazamientos por unidad de tiempo menores a $5 \cdot 10^{-5}$ m/s son considerados nulos, implicando que el modelo es estable y se miden después de un periodo de 30

segundos con el objetivo de eliminar cualquier efecto transiente de la gravedad sobre la elasticidad del cuerpo. En este estudio, se realiza la medición del desplazamiento por unidad de tiempo de 3 puntos indicados en la Figura 15. Los valores de las coordenadas de los puntos se muestran en la Tabla 12.

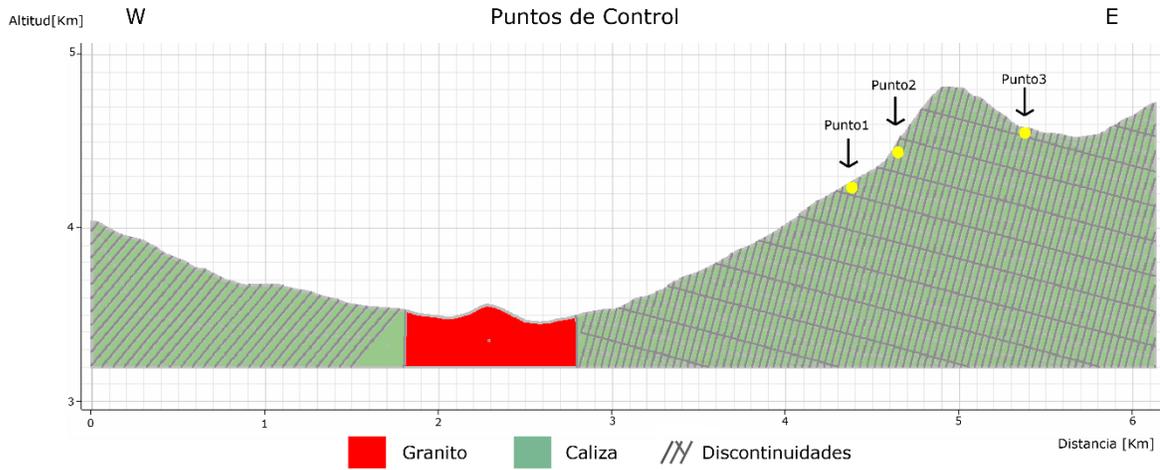


Figura 15: Ubicación puntos de control en el modelo.

Tabla 12: Coordenadas puntos de control.

Puntos de control	Coordenada X (horizontal)	Coordenada Y (vertical)
1	4381 m	4242 m
2	4651 m	4470 m
3	5383 m	4561 m

El criterio de estabilidad de desbalance de fuerzas se basa en el análisis de la razón de las fuerzas en desequilibrio dentro de cada modelo como se mencionó en el apartado 2.3.2, el estado de equilibrio mecánico es alcanzado cuando este valor disminuye y converge a $1 \cdot 10^{-5} N$.

Los desplazamientos por unidad de tiempo de los puntos de control y la energía en desequilibrio del modelo descrito en las secciones anteriores se muestran en las Figuras 16 y 17 respectivamente. Se puede observar que la energía en desequilibrio disminuye con respecto al valor máximo, pero no converge a un valor, diferenciándose por 10 órdenes de magnitud del valor $1 \cdot 10^{-5} N$. Además, los desplazamientos en la horizontal aumentan paulatinamente con el tiempo desplazando los 3 puntos hacia el oeste alcanzando mayor desplazamiento el punto 1 con una magnitud de 0,44m a los 50 segundos. Los desplazamientos en la vertical parecen estabilizarse para el punto 1 y 3 luego de disminuir (caer por efecto de la gravedad) 0,3m y 0,55m respectivamente, pero para el punto 2 sigue aumentando negativamente llegando a un valor de 0,85m a los 50 segundos. Por lo anterior, se considera que el modelo propuesto no es estático.

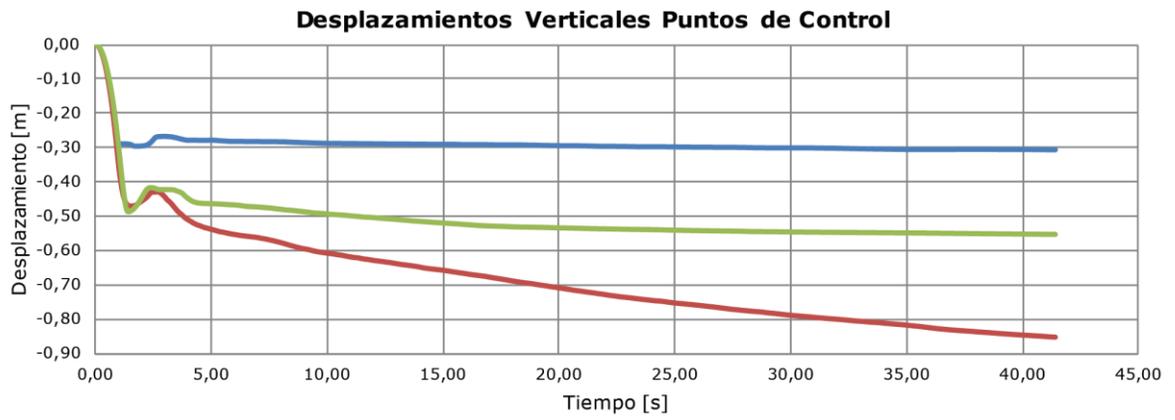
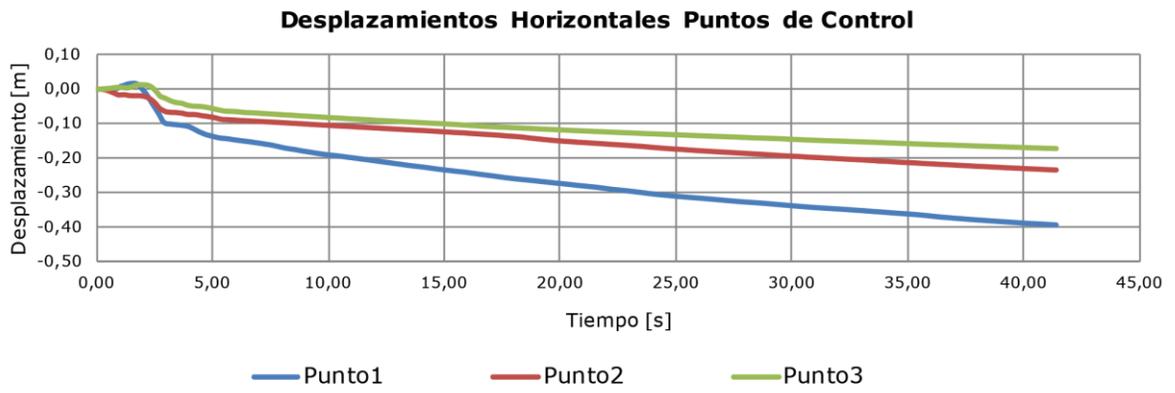


Figura 16: Desplazamientos horizontales y verticales para el modelo base.

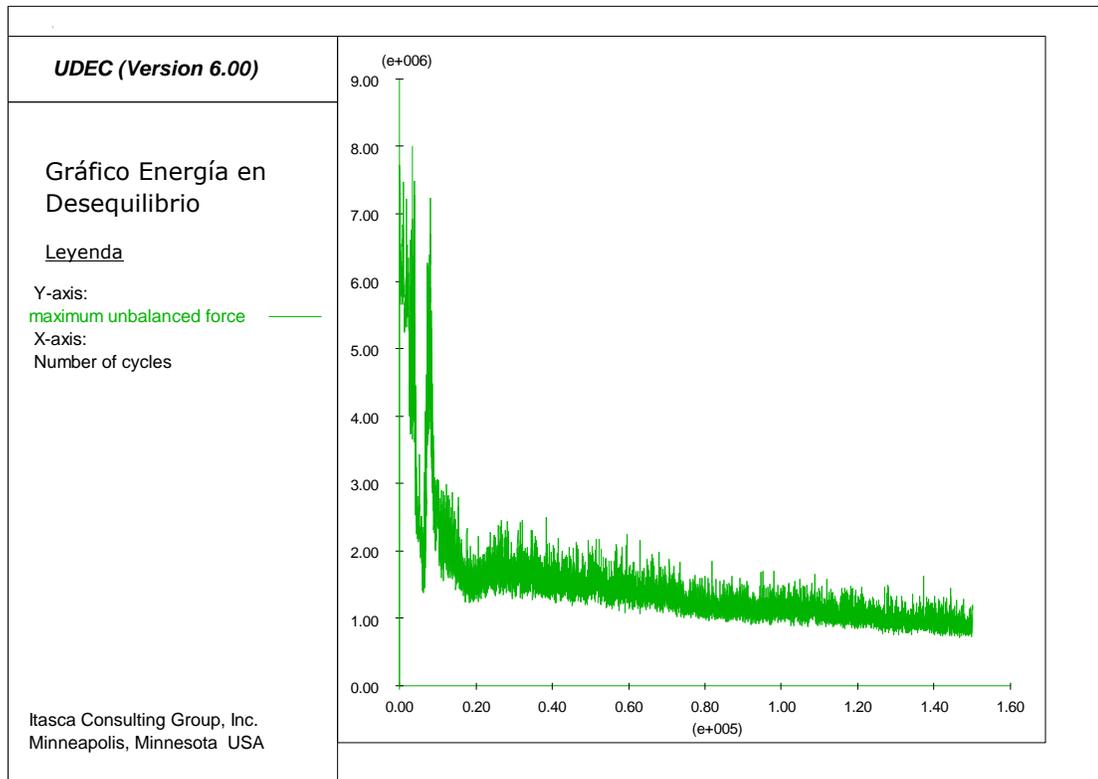


Figura 17: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo base.

Una manera adicional para corroborar si el modelo presenta comportamiento estático es analizando si se genera plastificación dentro de este. El comportamiento plástico se produce cuando una zona de la matriz rocosa supera el esfuerzo de fluencia y se produce una deformación irre recuperable. Es necesario observar todo el patrón de indicadores de plasticidad ya que si existe un mecanismo de falla se tendría que observar una línea contigua de zonas plásticas activas que unen dos superficies (superficie de falla) y el modelo, en este caso, no sería estable. Los diagramas pueden entregar dos tipos de simbología que indican comportamiento plástico nombradas como: "yielded in past x" y "at yield surface*". Esta diferencia se debe a que puede ocurrir plastificación al comienzo de una simulación, pero luego se produce una redistribución de esfuerzos que descarga los elementos afectados, por lo que no alcanzan a superar el esfuerzo de fluencia ("yielded in past x"). Solo los elementos activos bajo fluencia ("at yield surface*") son importantes para la detección de un mecanismo de falla (Itasca, 2014).

La Figura 18 muestra el comportamiento plástico para el modelo base descrito y se corrobora que no está en equilibrio, ya que presenta zonas activas de plastificación que generan superficies de falla irregulares hacia la derecha del esquema.

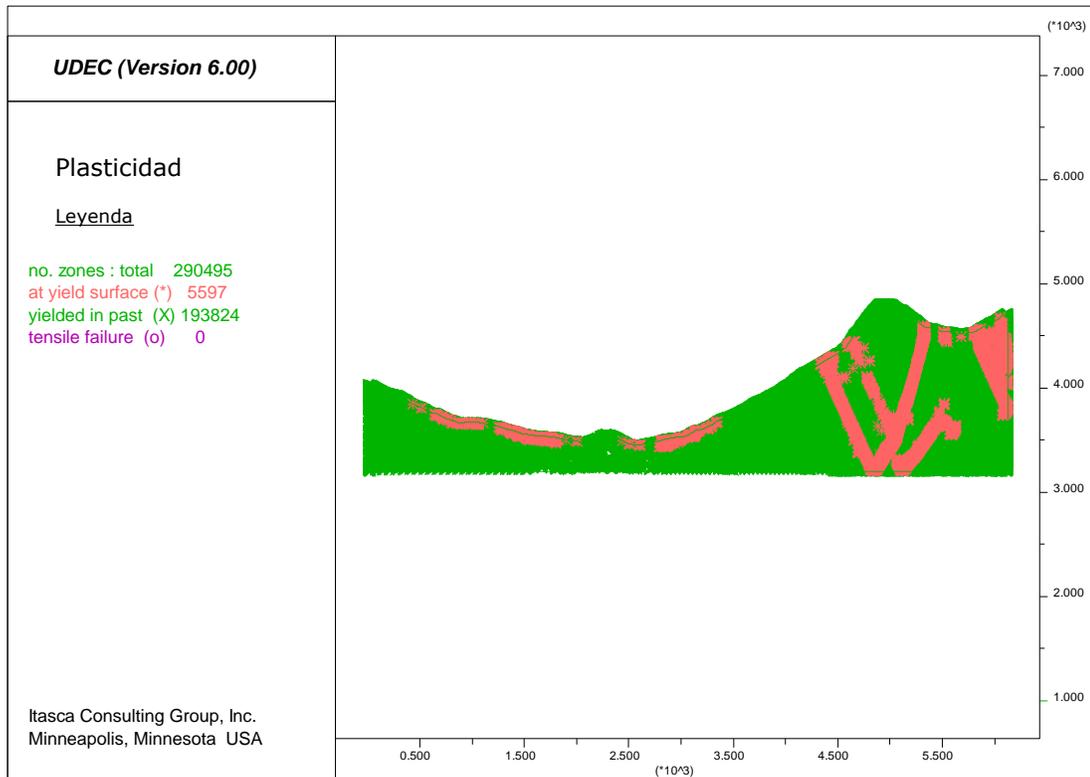


Figura 18: Comportamiento plástico del modelo base. Zonas rosadas sobrepasan el esfuerzo de fluencia.

En consecuencia, se procede a realizar modificaciones en el modelo para encontrar una solución estable siguiendo los pasos mencionados en la sección 2.3.2 para ir descartando posibles causantes del desequilibrio. En el Anexo C se muestran diversos escenarios planteados en el intento de validar el modelo y en el Anexo D se muestra en detalle el proceso de validación con los resultados de las figuras que simbolizan los criterios de estabilidad. A continuación, se presenta una síntesis de este proceso hasta mostrar el modelo estático desarrollado.

En primer lugar, se analiza la geometría del modelo y se extraen las estructuras. Por ello, es necesario simplificar la topografía debido a que el programa no permite bloques con bordes discretizados en muchos puntos. Una vez obtenida la geometría, se ejecuta el modelo y se comprueba que ninguno de los 3 criterios respalda la validación. Por esta causa, se descarta que la geometría de bloques, proporcionada por la disposición de las estructuras, es la causante de la inestabilidad del modelo.

En el siguiente paso se realiza un análisis del tamaño de la ladera modelada. La geometría base es disminuida, cortando el esquema a los 2000m y 5000m en la horizontal para eliminar los bloques laterales. La Figura 19 muestra la nueva configuración indicando la traslación de las condiciones de borde de velocidad y los puntos de control. Estos últimos no sufren mayor modificación excepto por el punto 3 que se sitúa fuera del nuevo modelo por lo que es modificado y ubicado hacia la base del talud. Las coordenadas de los puntos se muestran en la Tabla 13.

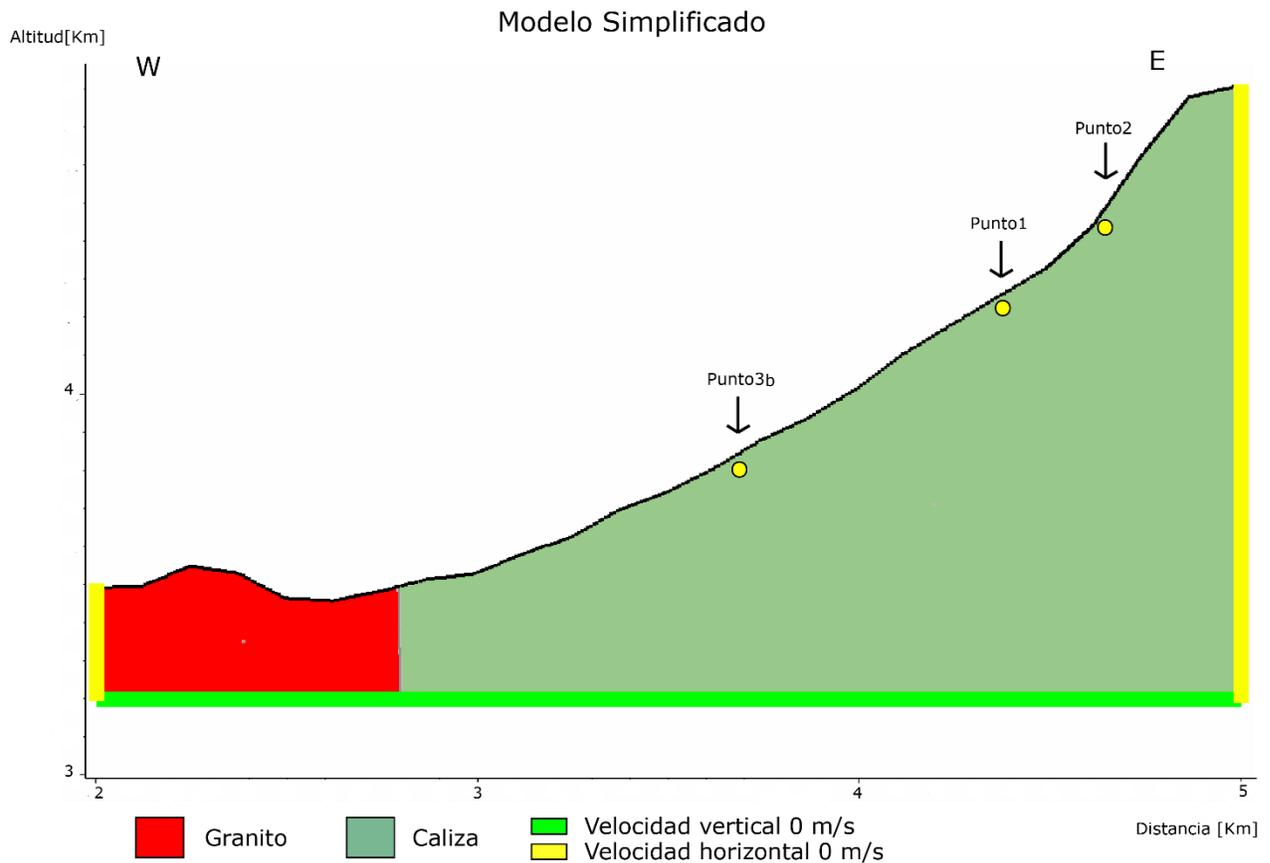


Figura 19: Esquema modelo simplificado, cortado lateralmente y sin estructuras.

Tabla 13: Coordenadas puntos de control para modelo cortado.

Puntos de control	Coordenada X (horizontal)	Coordenada Y (vertical)
1	4381 m	4242 m
2	4651 m	4470 m
3b	3700 m	3800 m

Los resultados indican que este último modelo sigue siendo inestable por lo que, se procede a analizar los parámetros de los modelos constitutivos de bloques. Antes de continuar, es importante mencionar que al modelar bloques deformables se debe dividir estos en zonas deformables (malla de zonas triangulares dentro de cada bloque), las cuales se generan irregularmente dependiendo de la geometría de los bloques, por lo que, al cambiar el esquema, el sistema de mallado también cambia, independiente de que el largo máximo asignado para cada zona sea el mismo. Lo anterior también puede llegar a influir en los diferentes comportamientos de los modelos como se discutirá más adelante.

El criterio de ruptura utilizado en todos los modelos anteriores fue Hoek-Brown, el cual depende de una variedad de parámetros que fueron descritos en las secciones anteriores. Dado que no se tiene conocimiento de los valores locales de estos parámetros, los cuales fueron asignados por analogías y bibliografía, es complicado intentar cambiarlos para mejorar la estabilidad de los modelos. Además, es difícil

asignar y comparar la magnitud de la estabilidad con varios parámetros que pueden ser modificados. Por lo anterior, se transforman los valores al criterio de Mohr-Coulomb (a través del programa Roclab) que es más utilizado y estudiado en problemas simples. Con los datos entregados se obtiene una cohesión de 3,9MPa y un ángulo de fricción de 25,8°, que se relaciona con un macizo rocoso de regular a mala calidad geotécnica según la clasificación propuesta por Hoek & Brown (1997) y corresponden a características esperadas para esta zona. En el caso del intrusivo de granito, se obtiene una cohesión de 14,3MPa y un ángulo de fricción de 40,9°.

Luego, se ejecuta la simulación con los nuevos parámetros del criterio de Mohr-Coulomb que se indican en la Tabla 14.

Tabla 14: Valores de parámetros para aplicar el criterio de Mohr Coulomb para bloques de caliza y granito

Parámetro	Caliza	Granito
Densidad (ρ)	2600 [kg/m ³]	2700 [kg/m ³]
Módulo de deformación volumétrica o compresibilidad (K)	29,4 [GPa]	40,833 [GPa]
Módulo de cizalle (S)	17,64 [GPa]	18,846 [GPa]
Ángulo fricción (ϕ)	25,8°	40,9°
Cohesión (c)	3,9 [MPa]	14,3 [MPa]
Tensión límite o máxima (σ_{\max}^t)	17,3 [MPa]	16,5 [MPa]

En este caso, a pesar de que los desplazamientos de los puntos de control convergen a diferentes magnitudes (son estables), la energía en desequilibrio y las zonas plastificadas indican que el modelo no es estático. Por esta razón, es necesario aumentar los parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb para tratar de llegar a la estabilidad. Se prueban varias combinaciones de valores para encontrar los mínimos que permitan estabilizar la ladera y finalmente se escoge una cohesión de 8MPa con un ángulo de fricción de 30°. Estos valores seleccionados caen dentro del rango de calidad geotécnica regular de macizos rocosos y son cercanos a los datos registrados en González de Vallejo (2002) para roca sana de caliza que son expuestos en el Anexo B. Esta última configuración sí representa el estado estático buscado puesto que, se obtienen resultados válidos de los tres criterios analizados.

Al encontrar un modelo estático con respecto al material constitutivo, se vuelven a generar las estructuras con la distribución mencionada al principio (Figura 20), con el propósito de analizar si el modelo sigue siendo estático. En caso de que no lo fuera, se deberían analizar los criterios constitutivos de discontinuidades.

Es importante recalcar que las modificaciones presentadas se realizaron debido a que no se cuenta con información geotécnica del área de estudio, y el modelo estático no se vio validado con los valores asignados a partir de bibliografía. Debido a esto, se busca una configuración que permita validarlo, de manera de poder avanzar en el análisis. La configuración obtenida de la ladera es propuesta con este objetivo, pero no representa necesariamente la única configuración que permita validar el modelo estático.

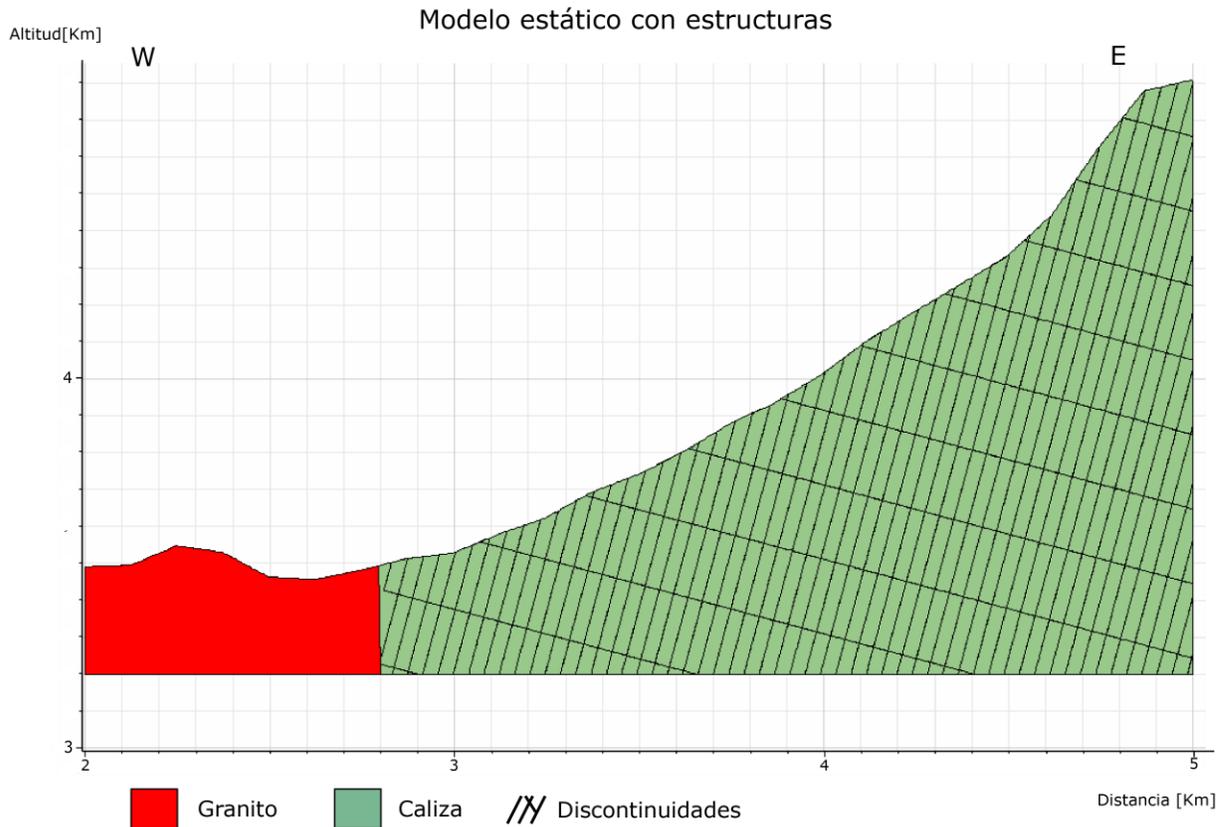


Figura 20: Esquema caso estático con estructuras.

En la Figura 21 se pueden visualizar los desplazamientos de los puntos de control para la nueva configuración. Se observa que no sufren mayores cambios con respecto al modelo estático sin estructuras. En ambas direcciones los desplazamientos convergen al mismo valor, con solo una diferencia insignificante en los primeros segundos de simulación.

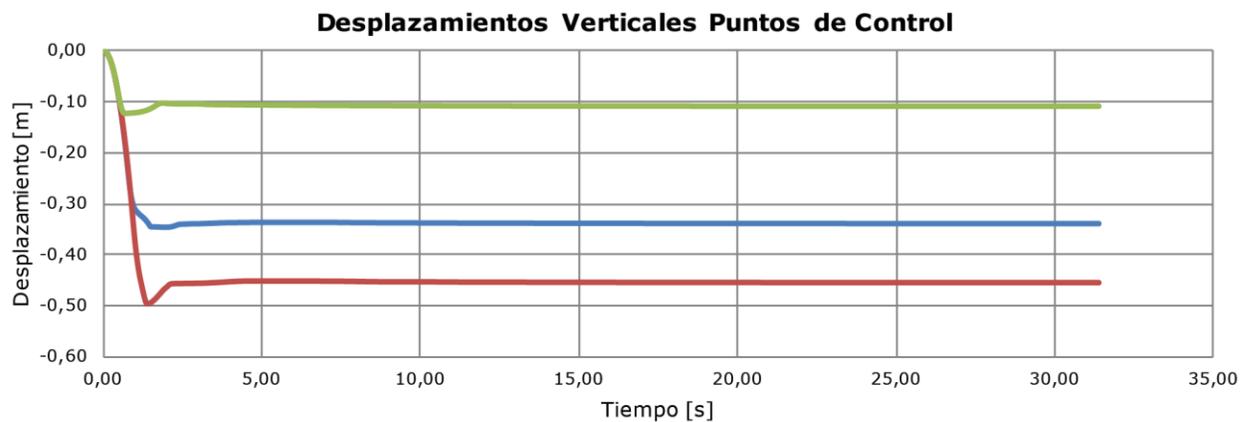
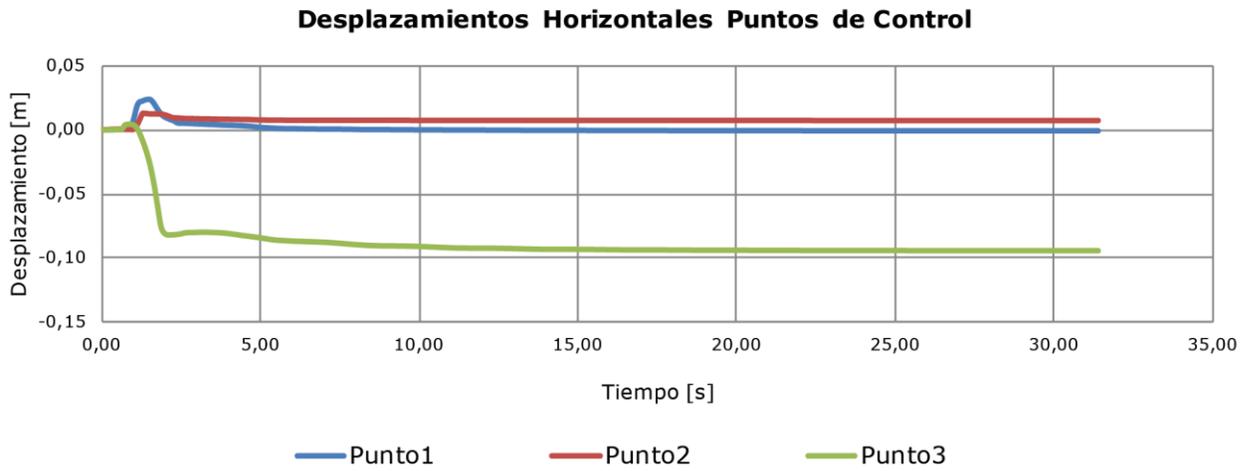


Figura 21: Desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de control para el modelo simplificado y estabilizado con estructuras aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.

La energía en desequilibrio mostrada en la Figura 22 presenta un aumento en los primeros ciclos y comienza a descender a los 10000 ciclos aproximadamente, convergiendo a un valor de $4 \cdot 10^4 \text{N}$ a los 90000 ciclos. Este valor es más alto que en el caso estático sin estructuras, sin embargo, comparado con la fuerza desbalanceada más alta, solo representa el 0,02% de esta. Además, en la Figura 23, se observan zonas activas que superan el esfuerzo de fluencia, pero solo en el borde lateral derecho del modelo.

Finalmente, en este modelo no se registran grandes movimientos ni posibles fallas y la fuerza máxima desequilibrada converge a un valor pequeño con respecto a las fuerzas del problema. Por ello, esta configuración final es considerada como estática en el equilibrio límite y es adecuada para continuar con la implementación del agua.

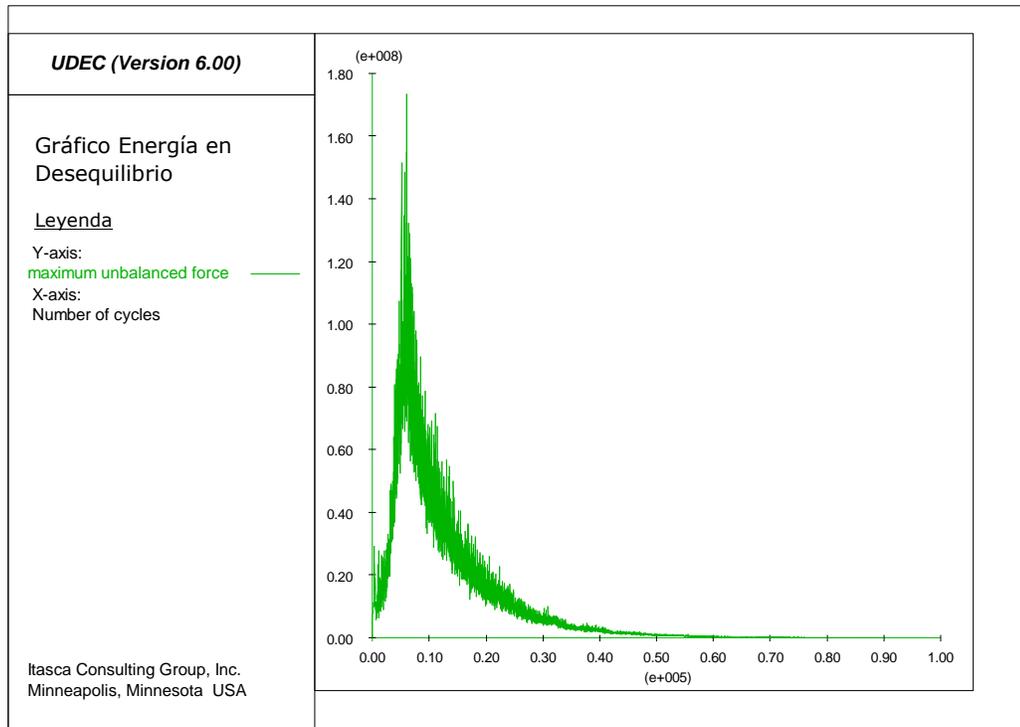


Figura 22: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo simplificado y estabilizado con estructuras aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.

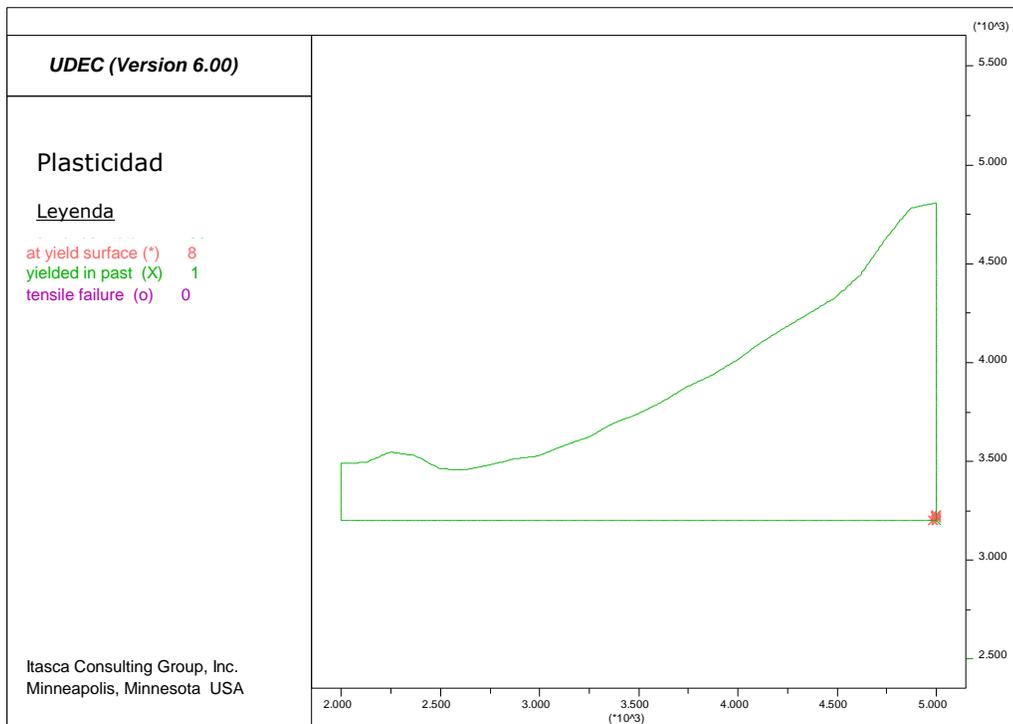


Figura 23: Comportamiento plástico del modelo simplificado y estabilizado aplicando el criterio de Mohr-Coulomb para bloques. Zonas rosadas superan el esfuerzo de fluencia.

5. Resultados

En este capítulo se presentan las modificaciones y resultados obtenidos en el proceso de incorporación del agua a la ladera modelada. Al principio se establece el modelo adecuado para aplicar el agua y posteriormente se presenta la implementación de esta, tanto en el modo de flujo estacionario como para el modo de flujo transitorio de fluido incompresible.

De modo referencial, se indica en algunas figuras el tramo deslizado de la zona de estudio indicado por Hauser (2002).

5.1 Modelo estático seleccionado

La fase siguiente a la validación del modelo estático, corresponde al análisis de los flujos de agua sobre la estabilidad de la ladera. Al generar la simulación, el programa no permite ingresar el flujo de agua en el modelo estático anterior, puesto que, no reconoce las condiciones de borde de presiones de agua con la presencia del intrusivo. Debido a esto, para la implementación de los modelos con agua se realiza un nuevo ajuste del modelo estático. Se reduce la geometría aún más, descartando el área del intrusivo y cortando el esquema a los 2800m en la horizontal por el lado izquierdo. Las estructuras se mantienen y se aplican las mismas condiciones de borde. Se considera que esta nueva simplificación no afecta geológicamente el análisis ya que, los intrusivos en general presentan una mayor resistencia que la roca de la ladera en estudio (caliza) y, además, en este caso, no se modela fracturado. De esta manera, dado que no se encuentra en la zona central del deslizamiento, solo fue agregado como una condición de borde, la cual se espera que no influya en la remoción y en los resultados obtenidos. La nueva configuración es presentada en la Figura 24.

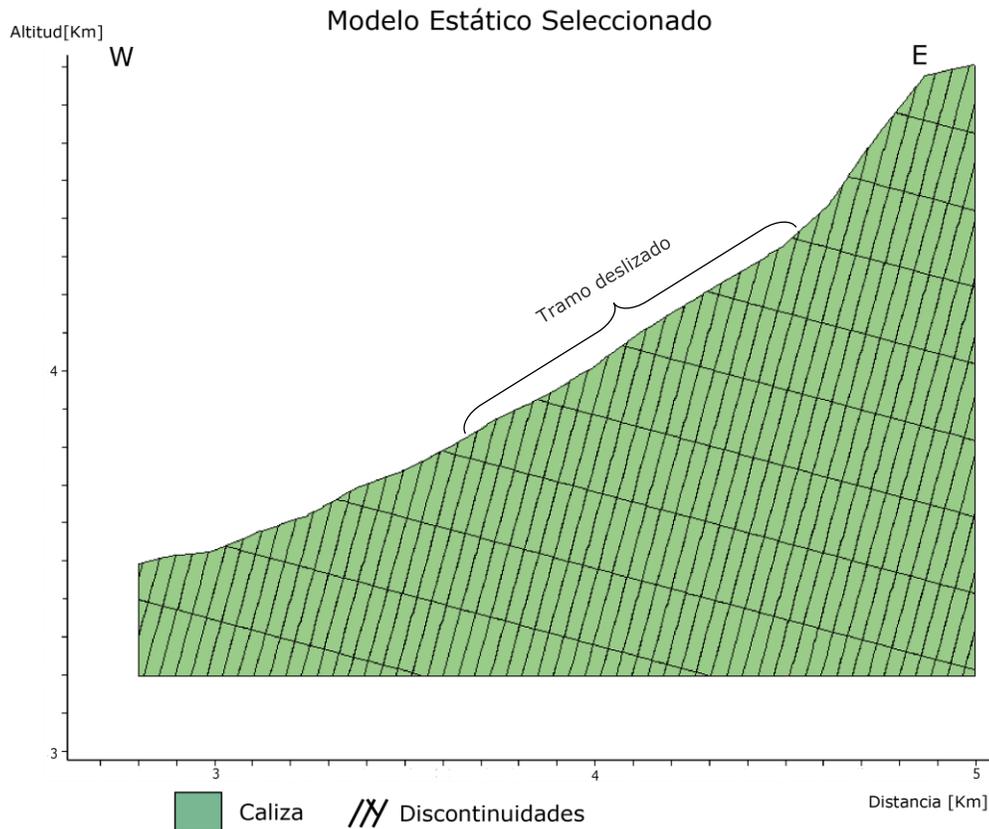


Figura 24: Modelo estático seleccionado para implementar el agua. Como referencia para los análisis que se mostrarán, se indica en esta figura el tramo deslizado.

Se vuelven a analizar los criterios de estabilidad del modelo para comprobar que se mantiene un caso estático (ver Anexo E) y se concluye que sí se cumplen los 3 criterios para validar el modelo. Sumado a esto, se muestra la magnitud de vectores de desplazamiento en la Figura 25 donde se observa que, en todo el modelo, existe un desplazamiento principalmente vertical negativo, siendo de mayor magnitud en la parte alta de la ladera (0,49m el máximo) y disminuyendo concéntricamente hacia la parte más baja e izquierda del esquema. Esto también se ve representado en los primeros segundos de los gráficos de puntos de control (ver Anexo E), donde se identifican cambios considerables en los desplazamientos y luego se normalizan. Este fenómeno se atribuye a los efectos producidos por la gravedad por lo que se sigue considerando el modelo adecuado para personificar un caso estático.

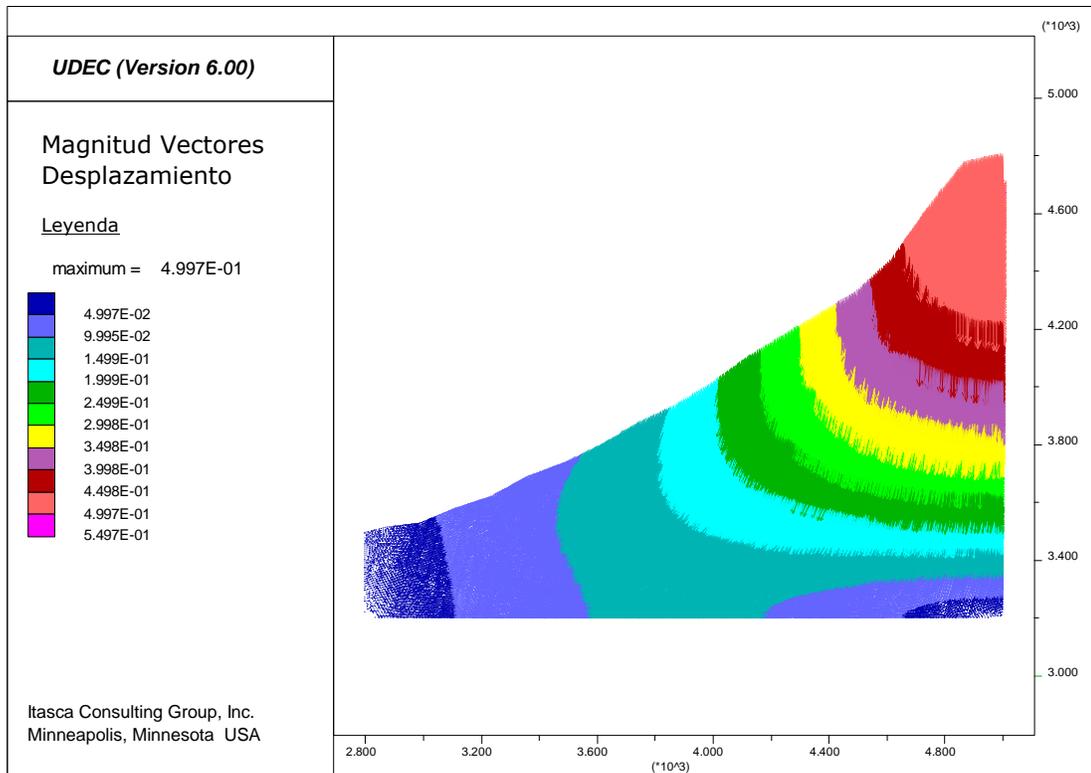


Figura 25: Magnitud de vectores de desplazamiento para el modelo estático final seleccionado.

5.2 Implementación del agua

En esta sección se presentan los resultados de los efectos que produce el agua en la estabilidad de los modelos, dado que en el caso estudiado se considera como principal factor desencadenante la incorporación de agua en la estructura producto de alta tasa de derretimiento en periodos de deshielo.

La implementación del agua se realiza a través de los modos de flujo estacionario y transitorio incompresible. El modo de flujo transitorio con fluido compresible no es conveniente aplicarlo para este estudio por lo explicado en la sección 2.3.2.1, debido a que se descarta la influencia de un sismo como desencadenante de la remoción por lo que el modelo que se desarrolla no es dinámico. Para ambos casos se utiliza la densidad del agua de 1000 kg/m^3 (Itasca, 2014).

5.2.1 Modo de flujo estacionario

En este modo de flujo es necesario definir un nivel freático en la ladera de estudio para que la incorporación del agua sea ejecutada. Además, no se consideran flujos en el tiempo, por lo que los resultados muestran un estado estable final dado un nivel de agua.

Para estos modelos se aplican presiones de agua en los bordes laterales del esquema con el objetivo de generar el nivel freático en algún punto bajo la superficie de la ladera. Las presiones son calculadas asumiendo la capa de agua que soporta cada punto de las coordenadas verticales, es decir, las presiones van descendiendo

desde cero, en la superficie de agua, hasta llegar a la presión de la columna de agua que soporta el punto más bajo en altitud del modelo (3200m). La ecuación implementada en los bordes laterales se define como:

$$p=p_0+y\text{grad}\cdot y \quad (10)$$

donde p_0 es la presión de toda la columna de agua desde la cota 0, es decir, $\rho\cdot g\cdot h$ con h la altitud del punto con agua más alto del borde, "ygrad" es la constante de gradación en la coordenada vertical ($-\rho\cdot g=-1000\cdot 9,8=-9800$), mientras que la variable "y" es la altitud de cada punto del borde en el eje vertical y es definida por el programa cuando se indica una posición.

También se define una superficie impermeable en el borde inferior debido a que, por defecto, todas las superficies son permeables y para generar el nivel freático es necesario restringir el flujo de agua por la parte inferior del modelo.

En la Figura 26 se puede visualizar el diseño de un ejemplo del modelo con las condiciones de borde aplicadas considerando un nivel freático en la superficie de la ladera, es decir, el agua se presenta en todo el esquema.

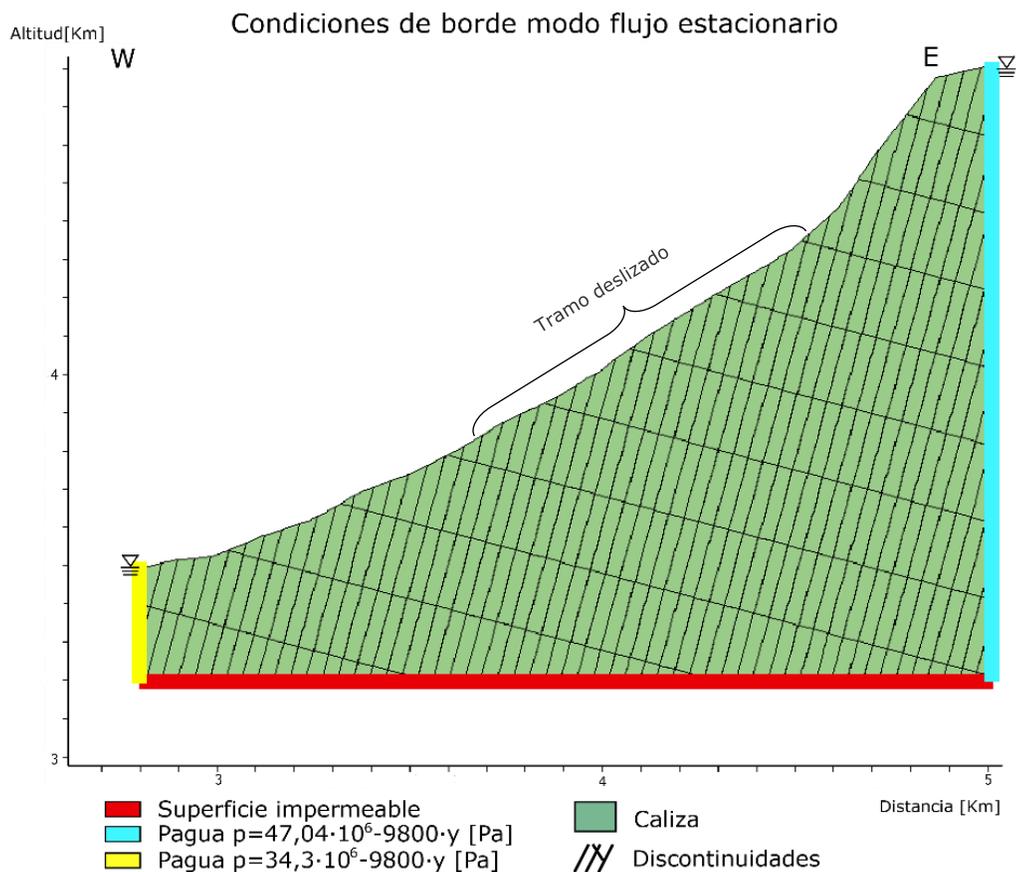


Figura 26: Condiciones de borde para flujo estacionario. Como referencia para los análisis que se mostrarán, se indica en esta figura el tramo deslizado.

Para la ladera en estudio no se tiene conocimiento de la existencia de un nivel freático ni su posición, por lo tanto, se desarrollan dos modelos uno con nivel freático alto y otro con nivel medio, con el objetivo de observar las diferencias en los comportamientos de los modelos al cambiar la posición de la columna de agua.

5.2.1.1 Modelo nivel freático medio

Para analizar la estabilidad con este modo se genera un modelo previo donde el nivel freático es ubicado por el borde derecho a 4000 m s.n.m. mientras que, por el borde izquierdo, se considera el nivel justo bajo la superficie cerca de los 3500 m s.n.m. Entonces, según la ecuación 10, la presión de agua implementada en el borde derecho es " $p=39,2 \cdot 10^6 - 9800 \cdot y$ " en cambio, en el borde izquierdo es de " $p=34,3 \cdot 10^6 - 9800 \cdot y$ " (Figura 27).

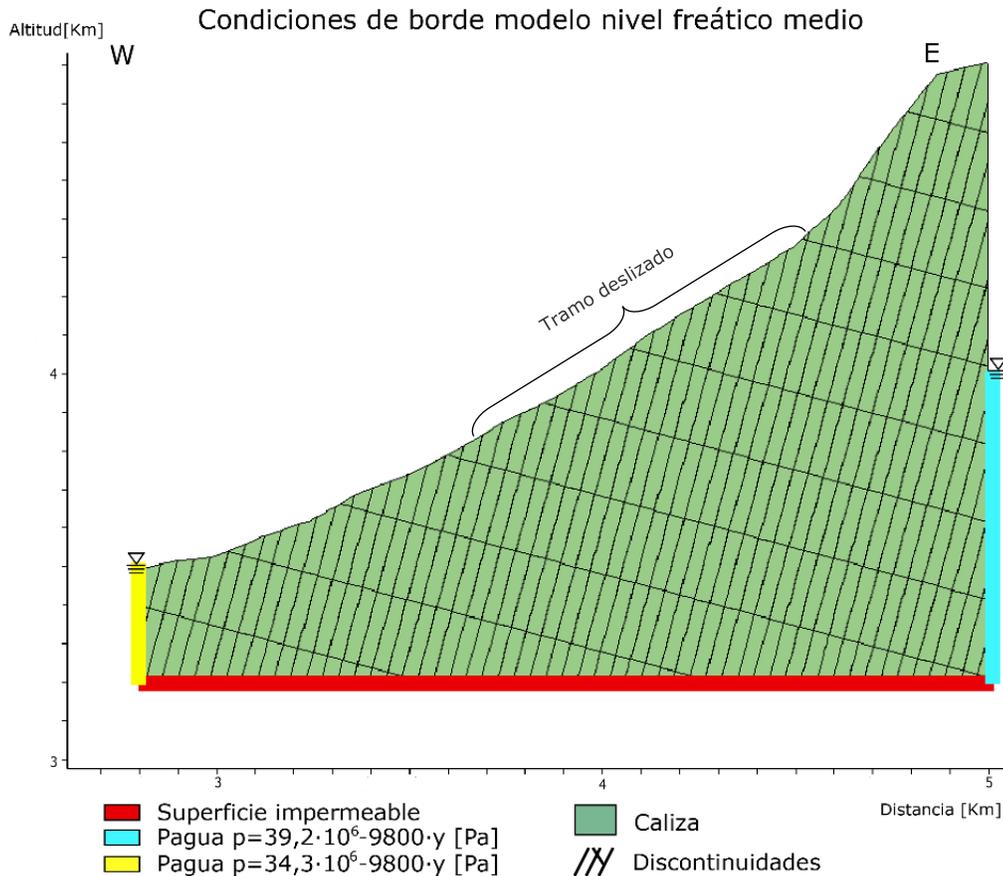


Figura 27: Condiciones de borde para modelo con nivel freático medio. Como referencia para los análisis que se mostrarán, se indica en esta figura el tramo deslizado

Para visualizar y analizar los comportamientos con la estabilidad de los modelos, UDEC puede generar varios diagramas que serán explicados brevemente a continuación:

- Saturación de agua en dominios: indica la saturación de agua en un rango de 0-1 de cada dominio de la discontinuidad.
- Presión de poro en dominios: indica la presión de agua en Pascales en cada dominio de la discontinuidad.
- Vectores y Magnitudes de flujo: indica la dirección y magnitud de flujo de agua en m^3/s entre los dominios de las discontinuidades.
- Estructuras fracturadas: indica los segmentos de discontinuidades que exceden el esfuerzo cortante o resistencia a la tracción.

- Abertura de estructuras: indica la magnitud de movimiento de apertura de las discontinuidades en metros (desplazamientos normales positivos).
- Cierre de estructuras: indica la magnitud de movimiento de cierre de las discontinuidades en metros (desplazamientos normales negativos).
- Desplazamiento de cizalle en estructuras: indica la magnitud de desplazamiento de cizalle en metros de las discontinuidades.
- Estructuras en el límite del cizalle: indica que sectores de las discontinuidades están en el momento empezando a desplazarse por cizalle.

Los diagramas de plasticidad, magnitudes de vectores de desplazamiento y los desplazamientos horizontales y verticales de puntos de control fueron explicados previamente en la sección 4.5.

En este modo de flujo el programa asume que todas las estructuras están completamente saturadas (Figura 28). El nivel freático es generado parcialmente luego de 40 segundos. La Figura 29 muestra las presiones de poro en los dominios del modelo, estas aumentan en profundidad bajo el nivel freático impuesto en bandas subparalelas, presentando una presión máxima de $7,8 \cdot 10^6 \text{Pa}$.

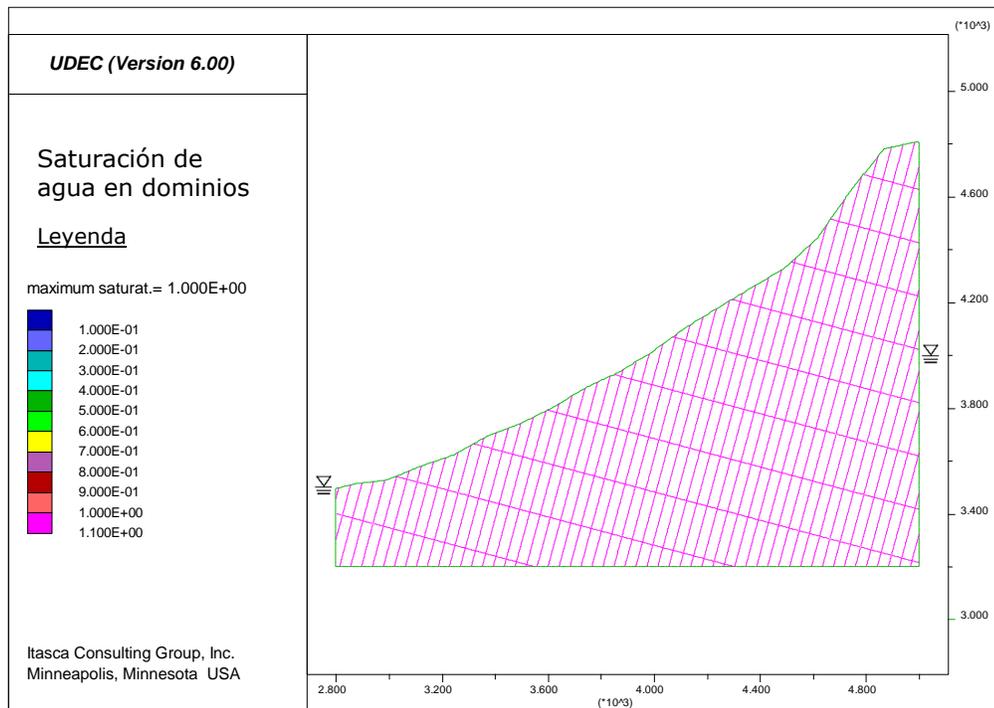


Figura 28: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

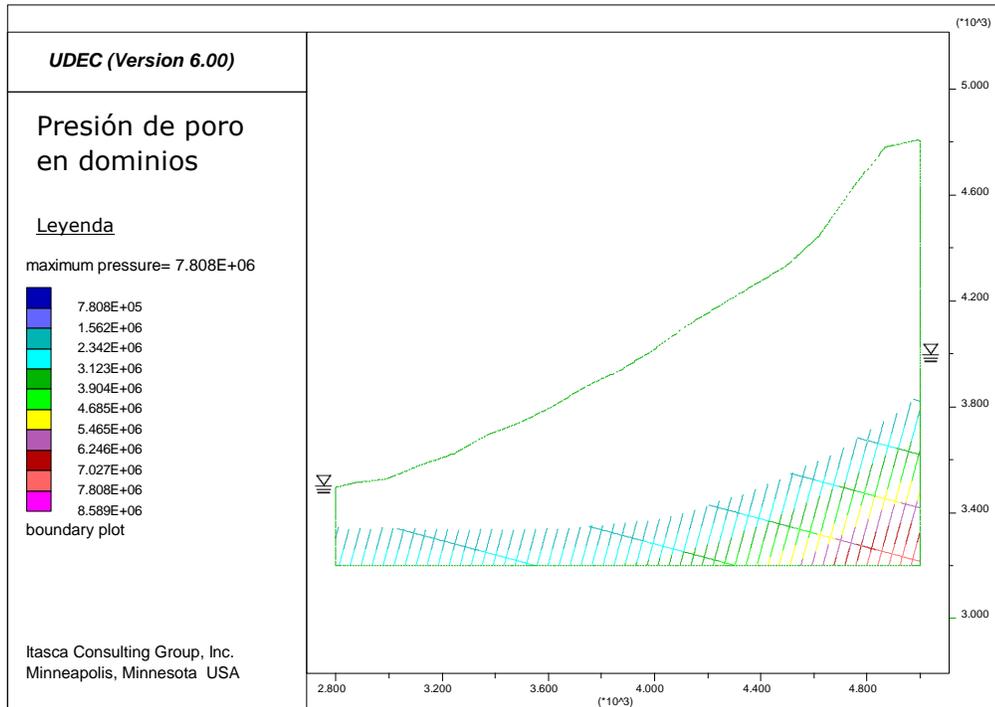


Figura 29: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

Al mismo tiempo, el flujo es generado bajo el nivel freático como se muestra en la Figura 30 por las diferencias de presión de agua entre el borde (impuestas) e interior del esquema, por lo que se observan mayores flujos en la parte superior derecha del modelo (indicados en círculo negro de la imagen). El máximo valor alcanzado es de $8,82 \cdot 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$. Sobre el nivel no se forman flujos de agua ya que no hay diferencias de presiones ni flujos ingresando que puedan cambiar esta condición.

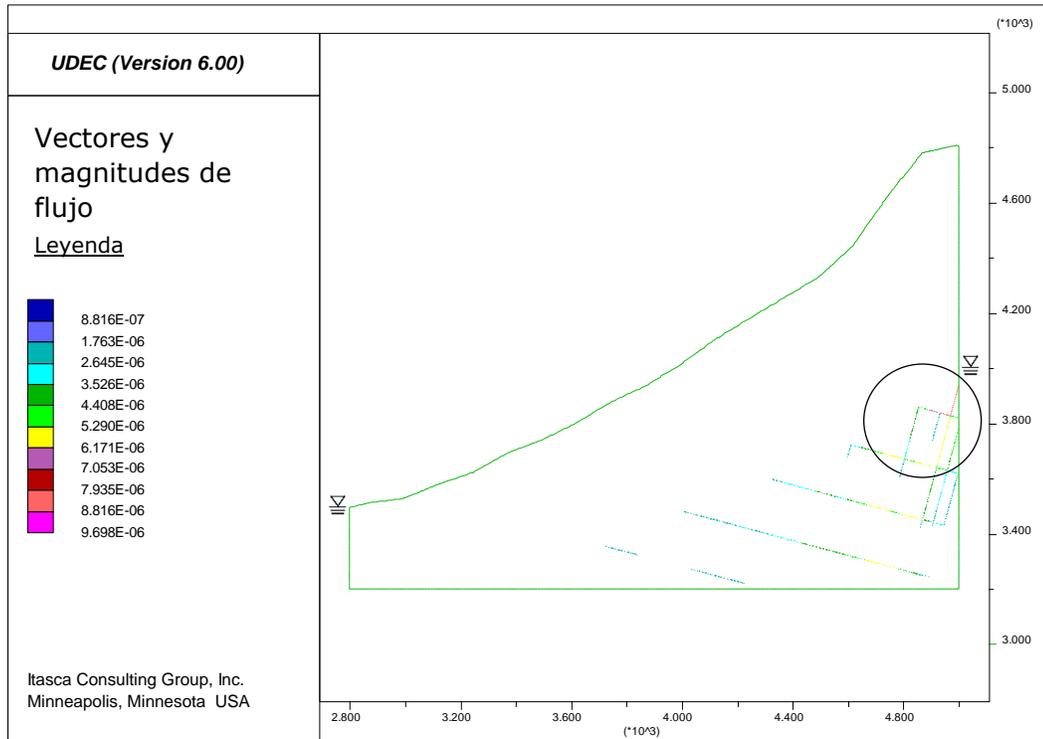


Figura 30: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo. Zona de mayores flujos indicada en círculo negro.

En la Figura 31 no se observan estructuras fracturadas luego de la simulación y en la Figura 32 se distinguen 4 estructuras que fueron separadas $0,28m$ como máximo, en el borde inferior derecho del modelo (indicadas en círculo negro de la imagen). Además, en esa misma zona se observa un cierre del set de estructuras con menor manto (Figura 33) pero, no es continuo y es en menor magnitud (el máximo es de $1,7 \cdot 10^{-3}m$).

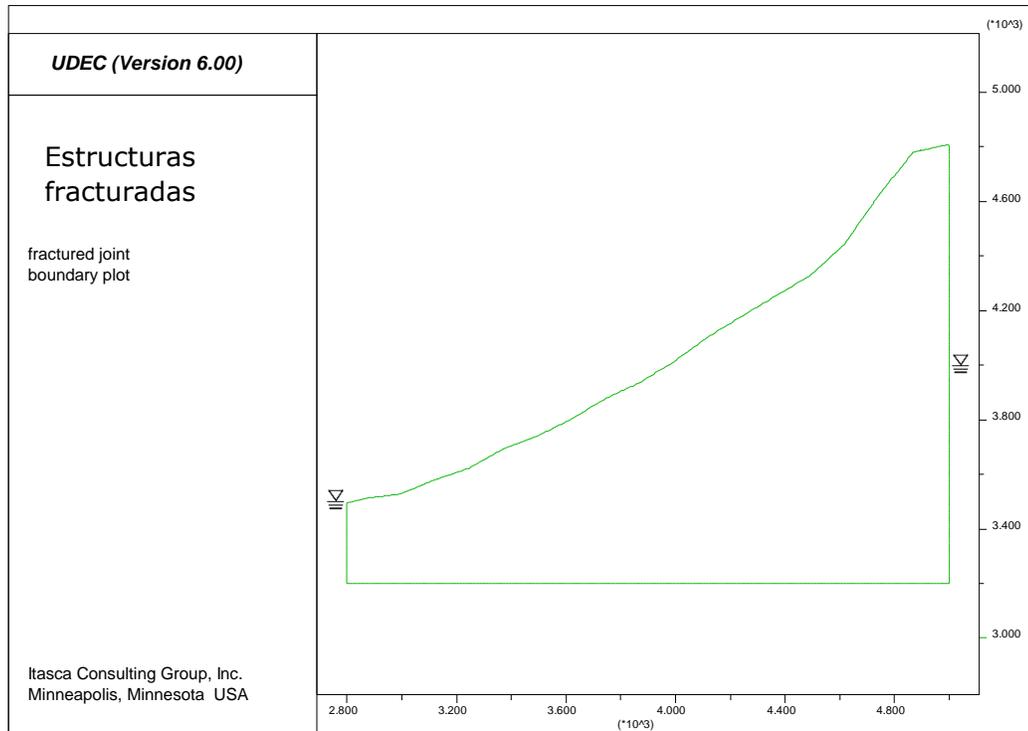


Figura 31: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

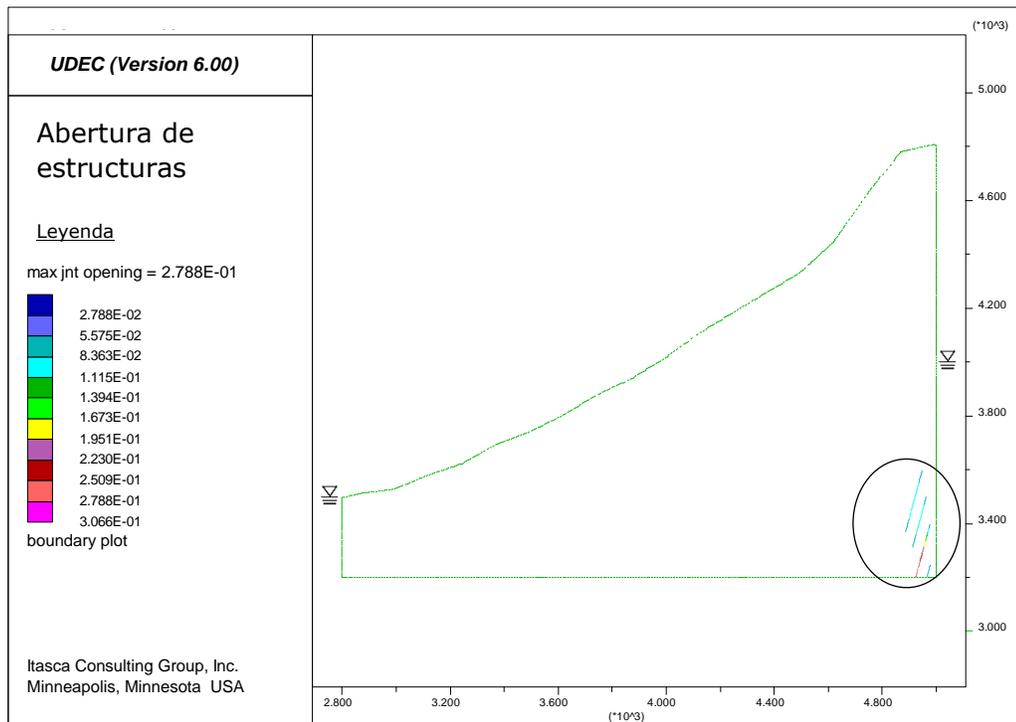


Figura 32: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo. Se generan el borde inferior derecho indicadas por círculo negro.

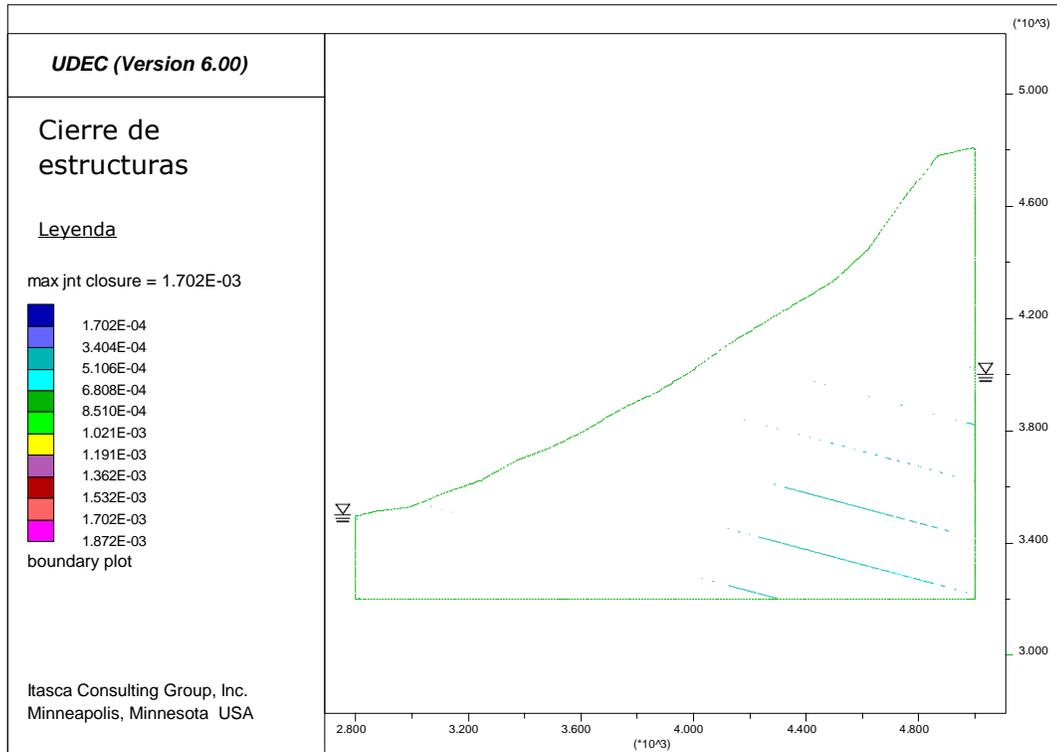


Figura 33: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

Con respecto al cizalle de las estructuras, se presentan las Figuras 34 y 35, donde se puede apreciar el desplazamiento de cizalle y las estructuras en el límite de cizalle, respectivamente. En la primera imagen se observa una zona que cruza el modelo desde el borde lateral derecho a la superficie de la ladera, presentando desplazamientos en las estructuras con mayor manto con un valor máximo de 0,12m. En la segunda figura se observan zonas, rodeando a la anterior mencionada, donde las estructuras con mayor manto están en el límite de cizalle, además en esta misma condición se observan las estructuras con menor manto, pero en la parte baja y superficial de la ladera.

En el comportamiento plástico de la Figura 36 se observan algunas zonas activas que superan el esfuerzo de fluencia, pero principalmente en los bordes del modelo. Se generan, además, una continuidad de zonas que superaron el esfuerzo en el pasado que siguen aparentemente la misma zona de los desplazamientos de cizalle.

La distribución de desplazamientos mostrada en la Figura 37, presenta una variación con respecto al modelo estático, pero en profundidad, aumentando las magnitudes (el doble aproximadamente) en la misma zona afectada por los cizalles y plasticidad. En superficie no se observan mayores variaciones observando las Figuras 38 y 39 de los puntos de control, ya que presentan la mayoría, una estabilización final.

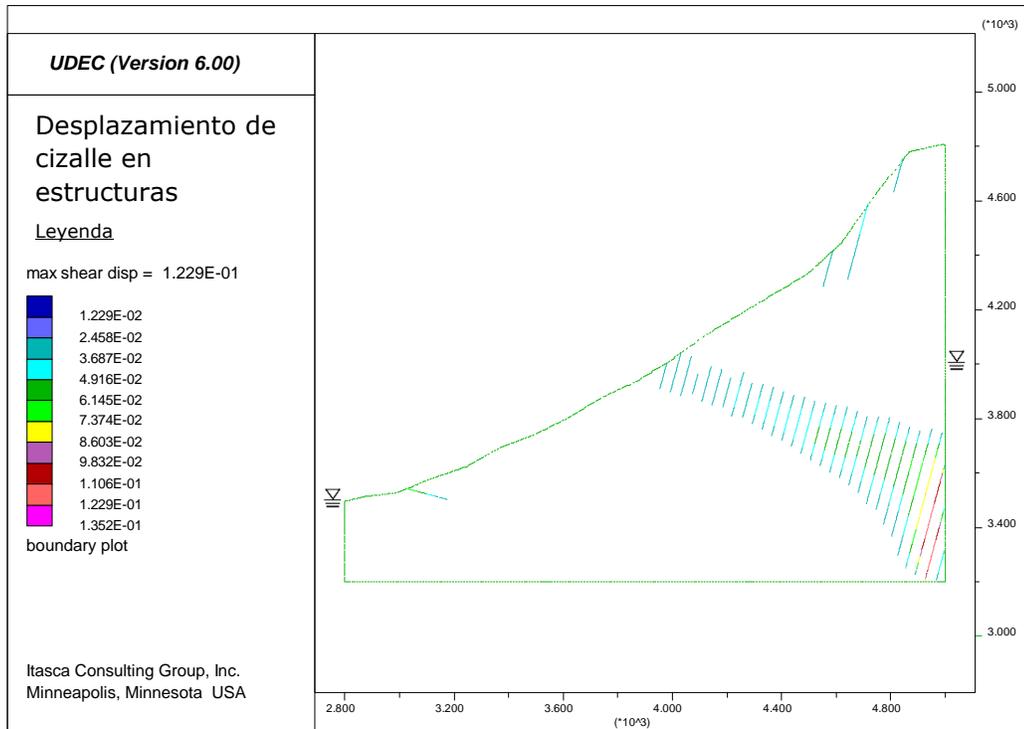


Figura 34: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

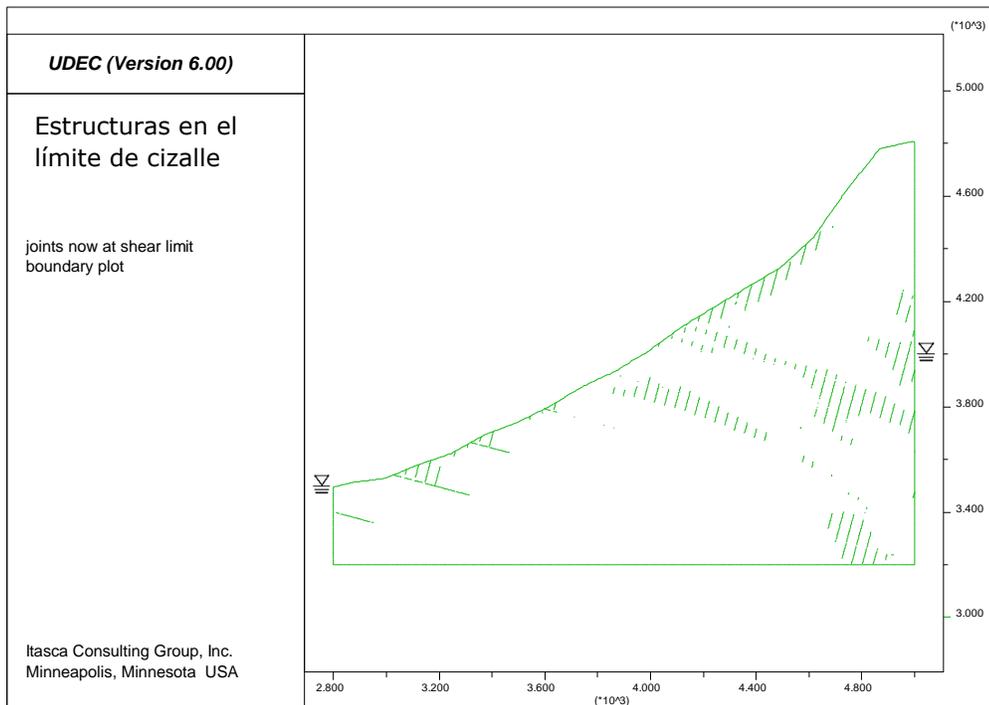


Figura 35: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

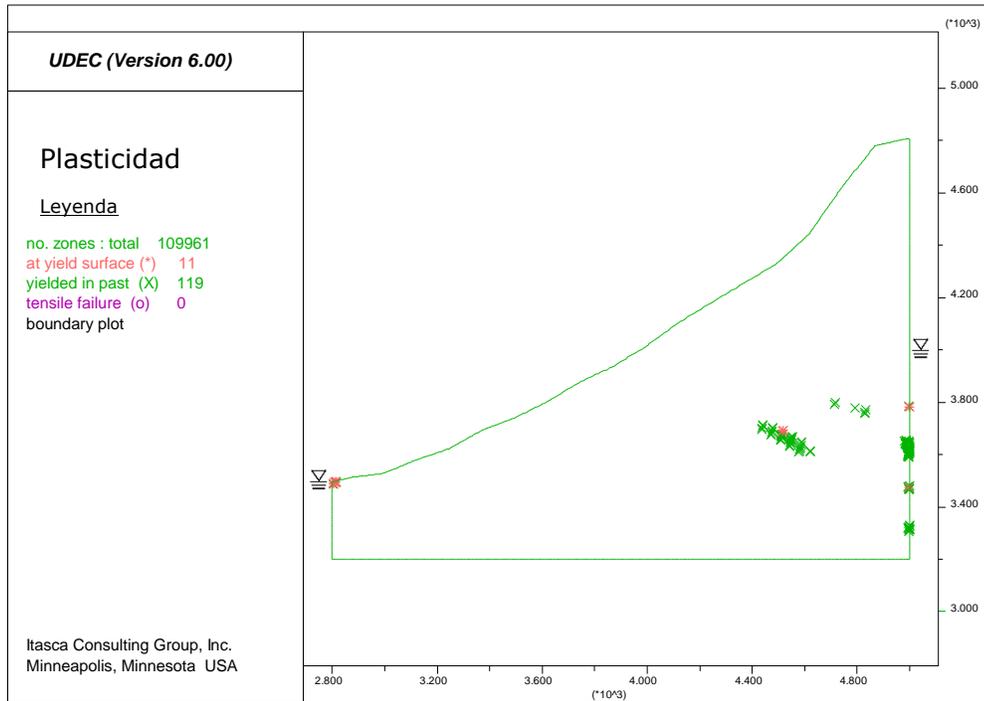


Figura 36: Comportamiento plástico para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

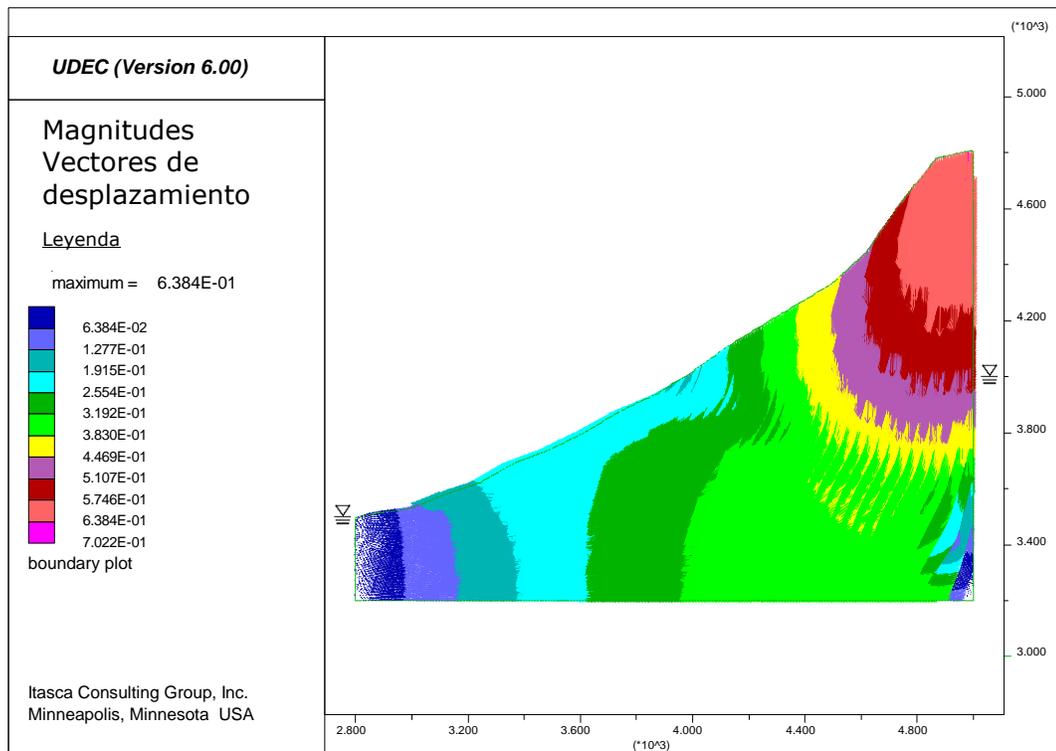


Figura 37: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

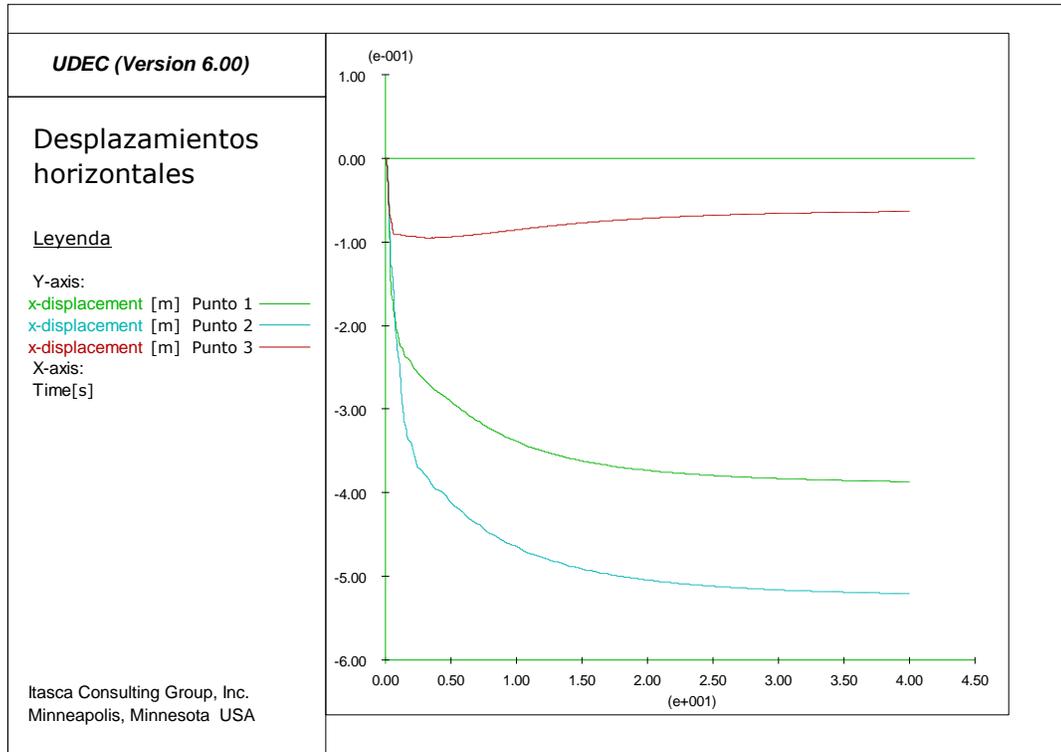


Figura 38: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

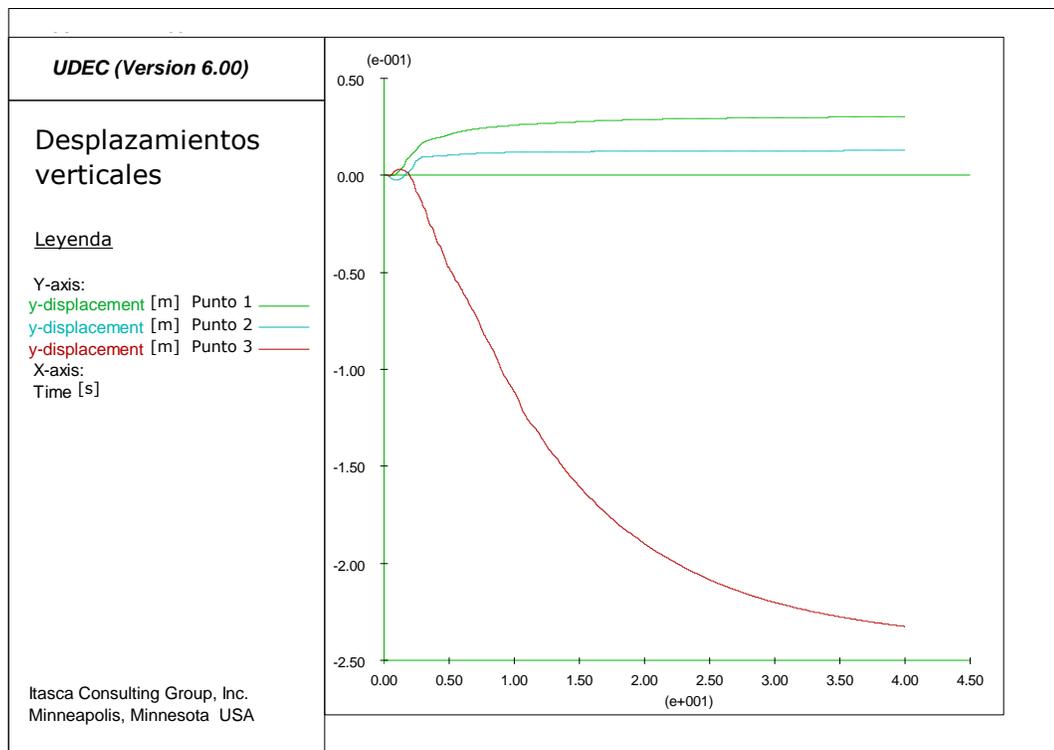


Figura 39: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo estacionario con nivel freático bajo.

5.2.1.2 Modelo nivel freático alto

El siguiente modelo corresponde al caso estacionario con el nivel freático alto cubriendo toda la ladera. La presión de agua implementada en el borde derecho es " $p=47,04 \cdot 10^6 - 9800 \cdot y$ " manteniéndose la del borde izquierdo en " $p=34,3 \cdot 10^6 - 9800 \cdot y$ " (Figura 26). Este horizonte es alcanzado luego de 40 segundos de simulación donde las presiones de poro en dominios son generadas en bandas subparalelas a la topografía del talud y disminuyen hacia la superficie donde se considera presión de agua cero (Figura 40). La máxima presión ($1,57 \cdot 10^7$ Pa) se forma en la parte inferior derecha del modelo (indicadas en círculo negro en la imagen) y es mayor a la generada en la simulación anterior.

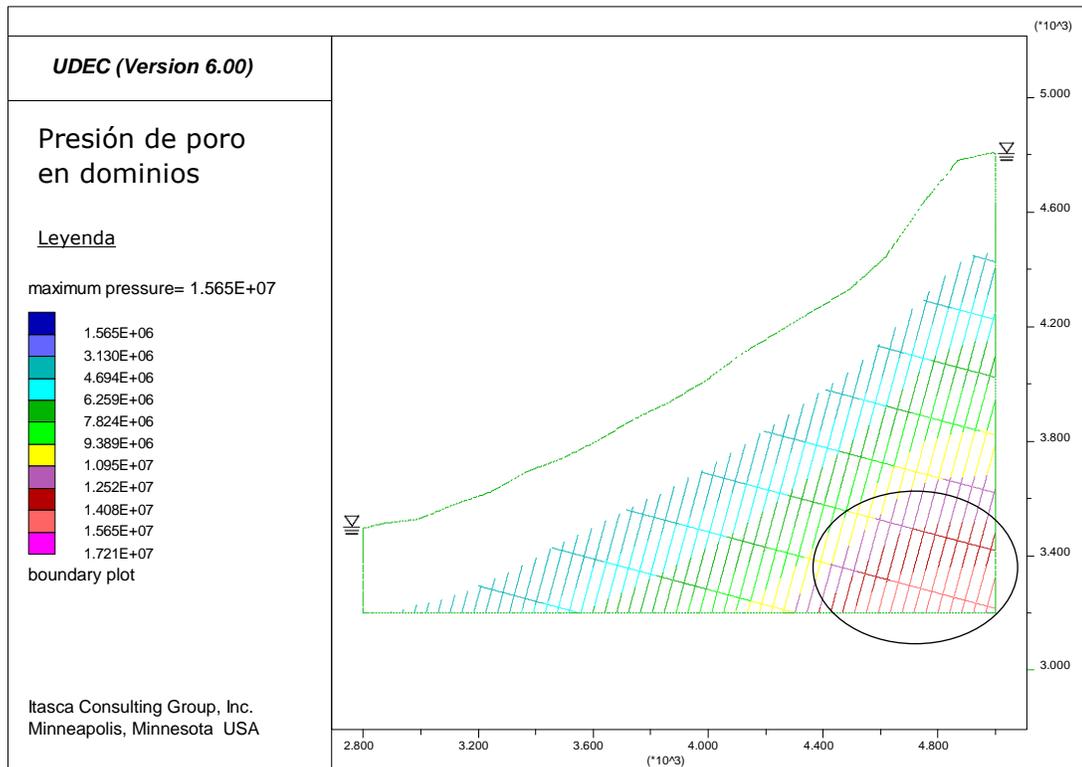


Figura 40: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto. Máximas presiones indicadas en círculo negro.

En este caso, los flujos también se visualizan bajo el nivel freático (Figura 41), pero en la sección más superficial del modelo, diferenciándose del caso anterior. En las zonas inferiores no se observan flujos debido a que se estabilizan al alcanzar las mismas presiones de agua los dominios involucrados.

No se observan estructuras fracturadas luego de la simulación y se generan más aperturas (Figura 43) en comparación con el modelo anterior, en el borde lateral derecho (indicadas en círculo negro) exhibiendo también, un valor máximo mayor igual a 0,82m. La Figura 42 muestra las estructuras que se cierran y su magnitud indicando un predominio en la parte baja del talud, principalmente en el set de estructuras con mayor manto (valor máximo de $2,74 \cdot 10^{-3}$ m).

Los desplazamientos de cizalle de estructuras (Figura 44) se visualizan en el mismo sector en que se producen las aperturas y las estructuras en el límite de cizalle (Figura 45) se concentran en la parte izquierda del modelo, en superficie, en los 2 set de discontinuidades.

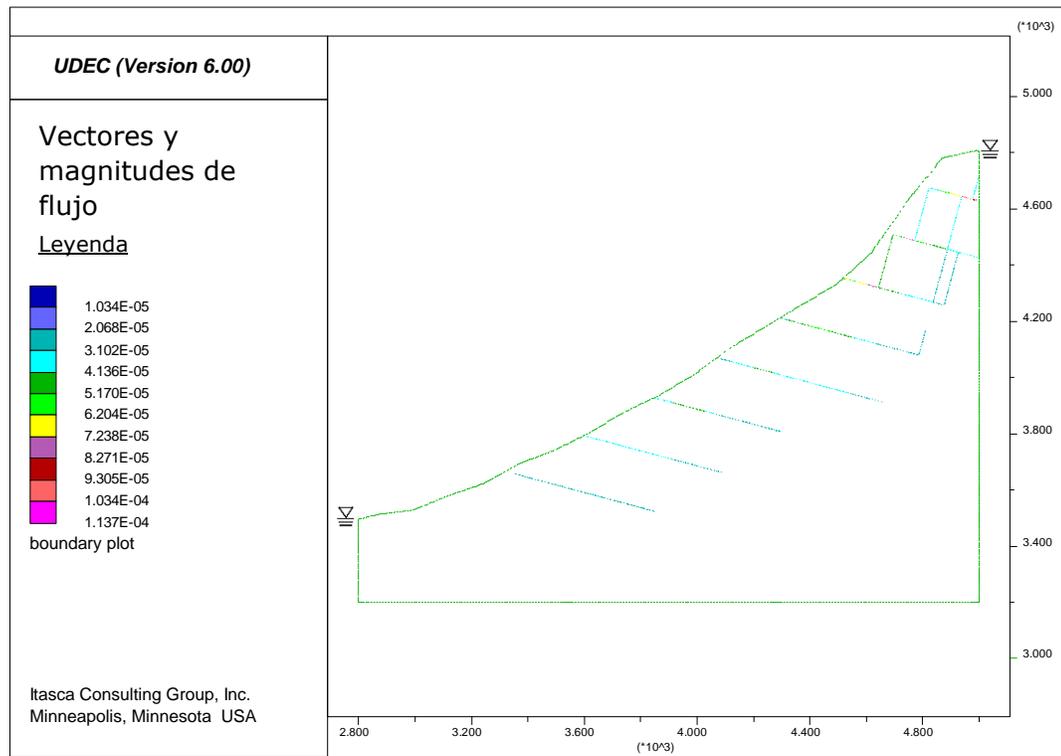


Figura 41: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.

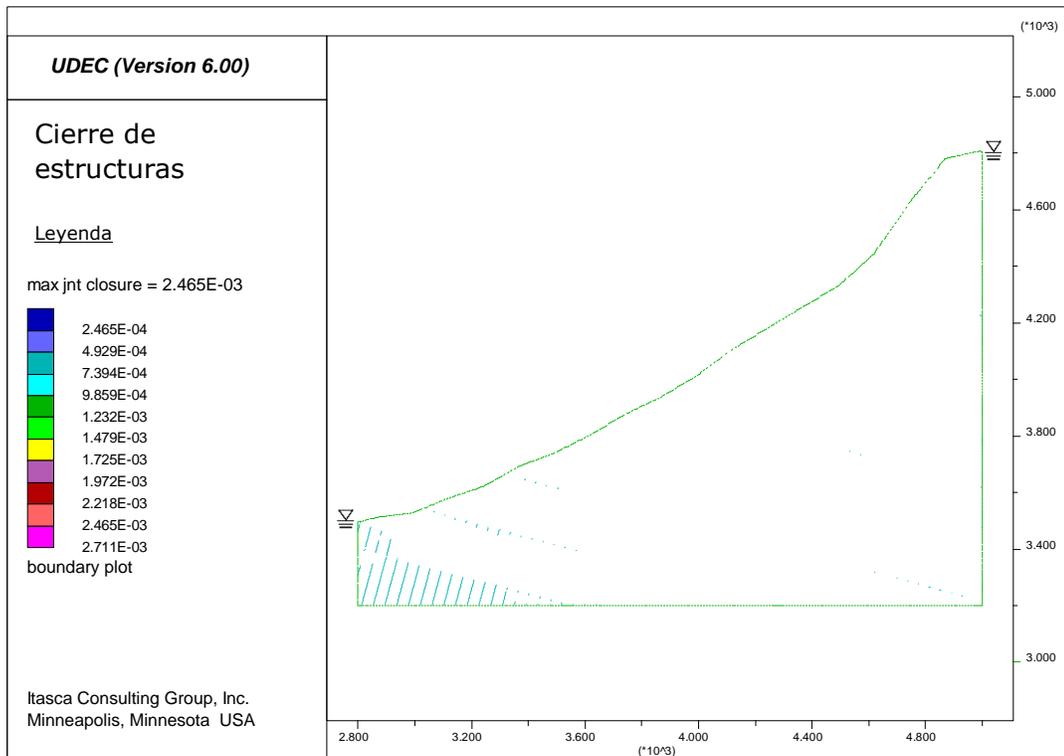


Figura 42: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.

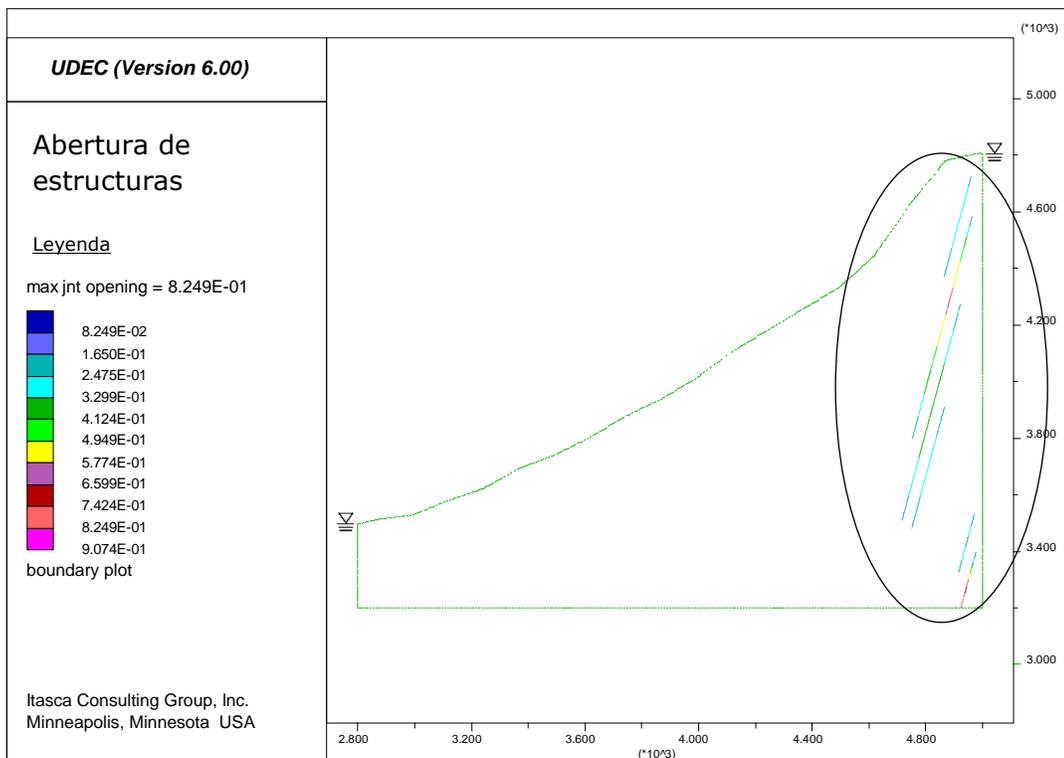


Figura 43: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto. Se generan en borde lateral derecho indicadas en círculo negro.

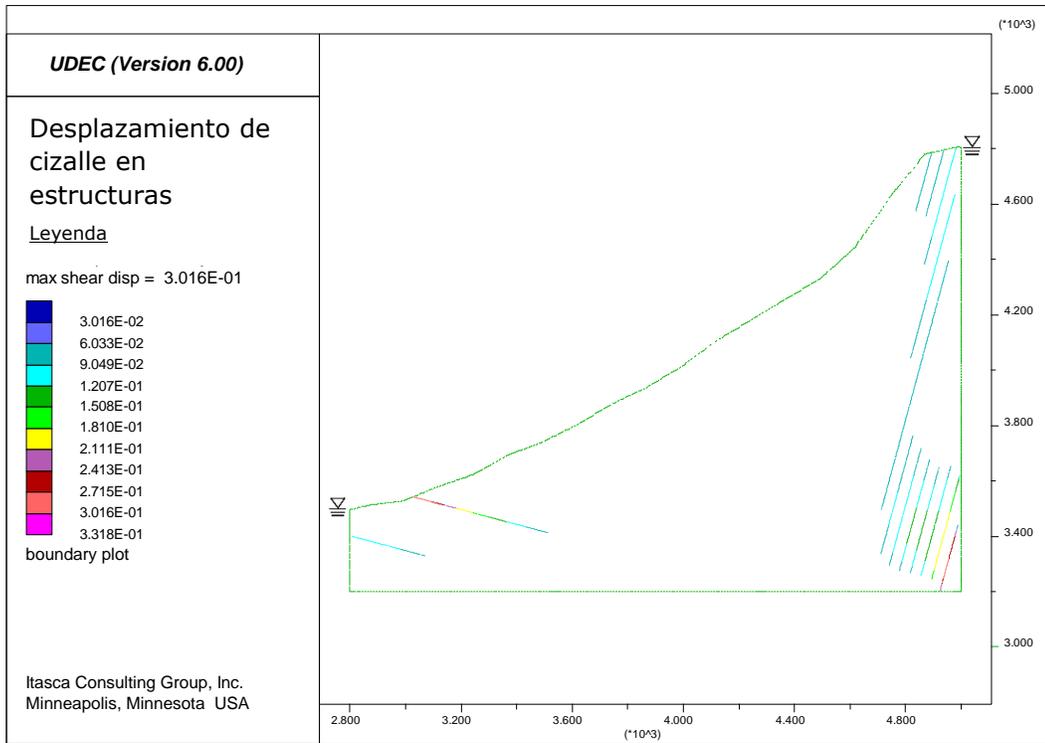


Figura 44: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.

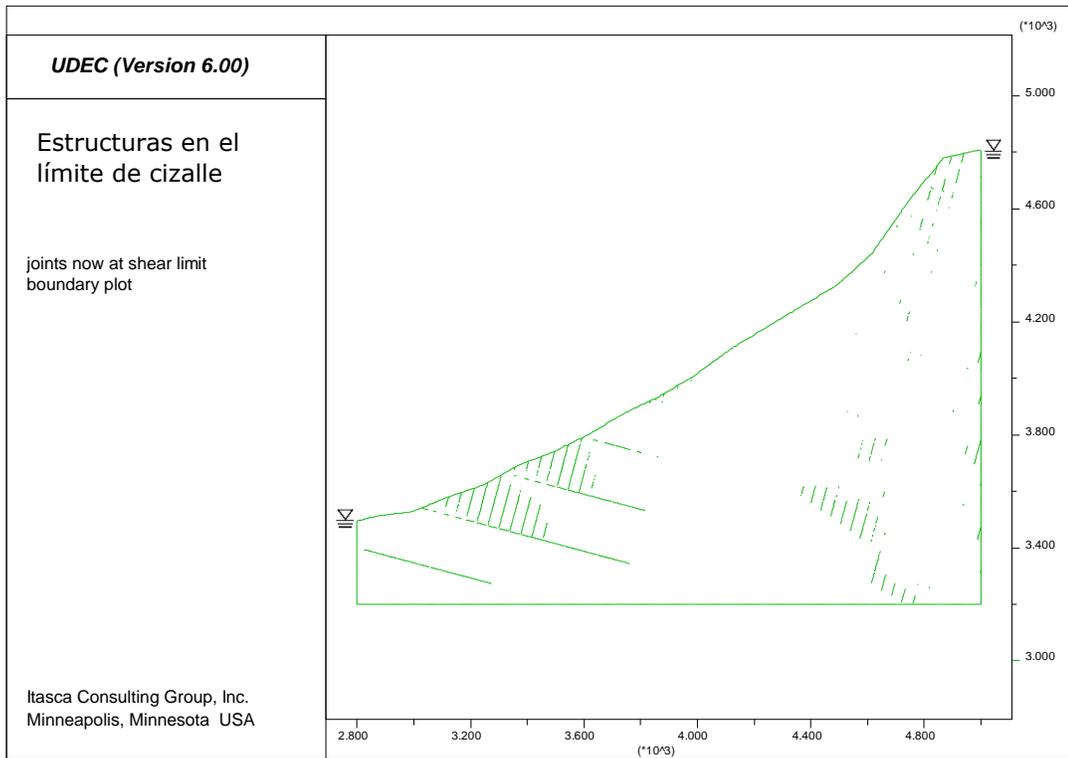


Figura 45: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.

En la Figura 46 se puede observar el comportamiento plástico del talud, donde se distinguen superficies que superan el esfuerzo de fluencia, pero principalmente en los bordes del modelo.

Finalmente, el diagrama de desplazamientos (Figura 47) muestra un gran cambio en la distribución de estos. Se aprecia superficies donde los desplazamientos cambian claramente de un lado a otro y no de la forma convencional en que lo hacen por la gravedad. Estas superficies están asociadas justamente a estructuras por donde anteriormente se identificaron aperturas y movimientos de cizalle. En este caso, el valor máximo de desplazamiento es mayor (1,03m) con respecto al modelo de nivel freático medio. Lo anterior también se ve reflejado en la parte superficial del modelo donde, en los puntos de control en la componente vertical (Figura 48), se observan desplazamientos negativos de hasta 0.8 metros. En la componente horizontal (Figura 49) el mayor desplazamiento es generado por el punto 2 de 0,47 metros.

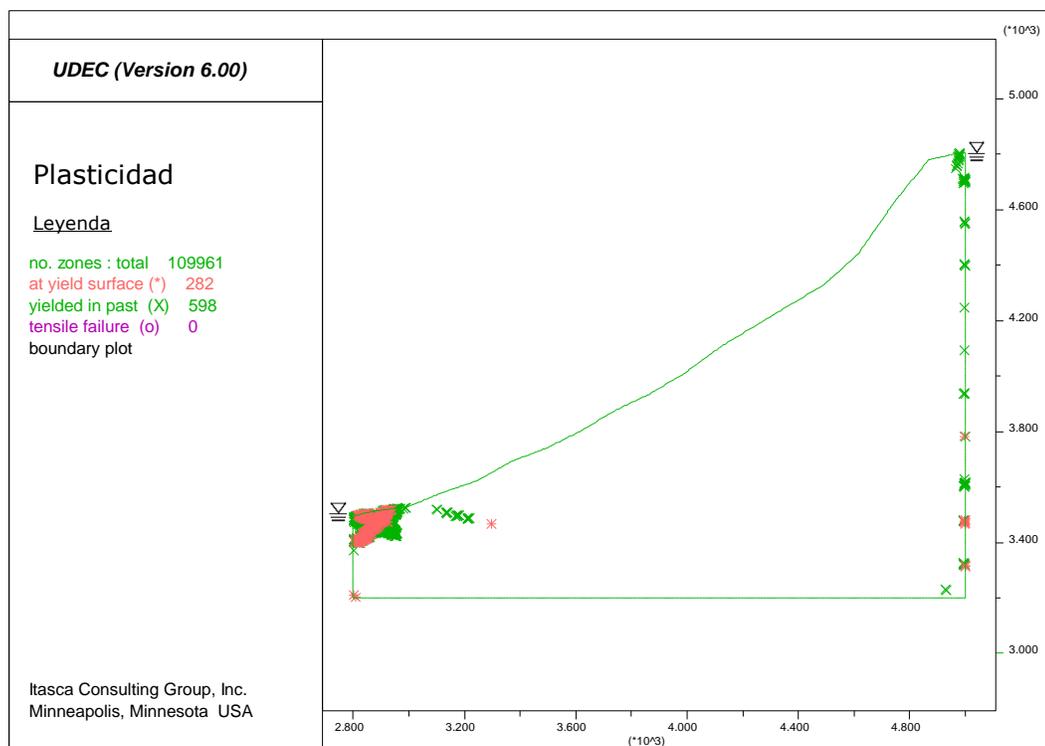


Figura 46: Comportamiento plástico para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.

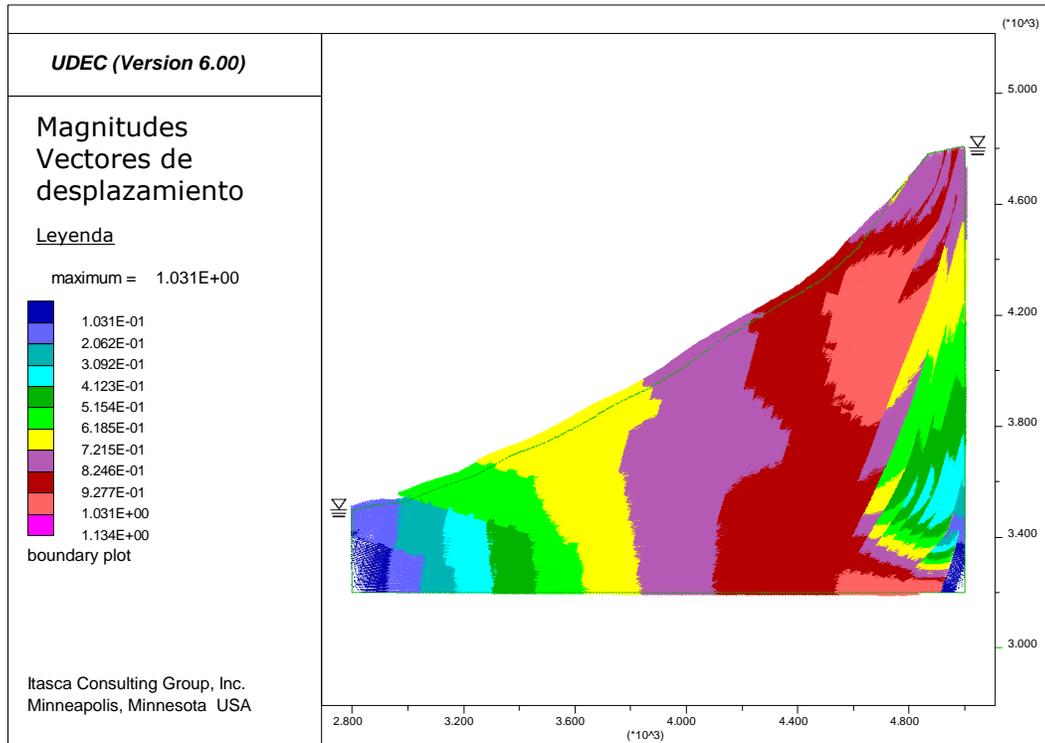


Figura 47: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.

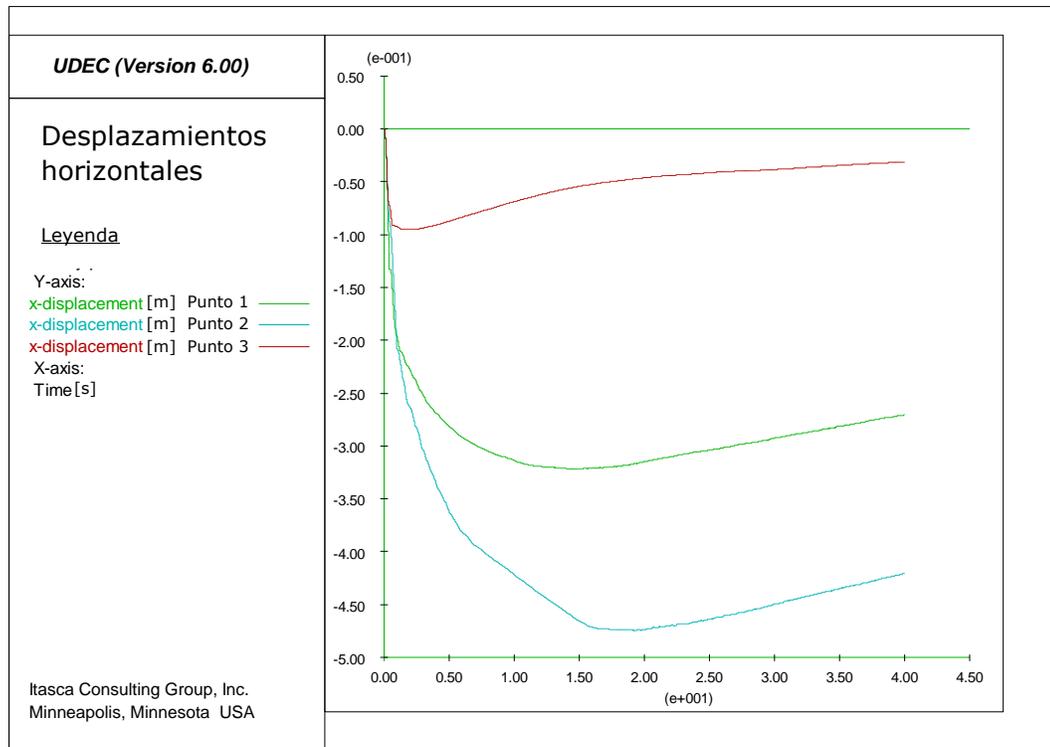


Figura 48: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.

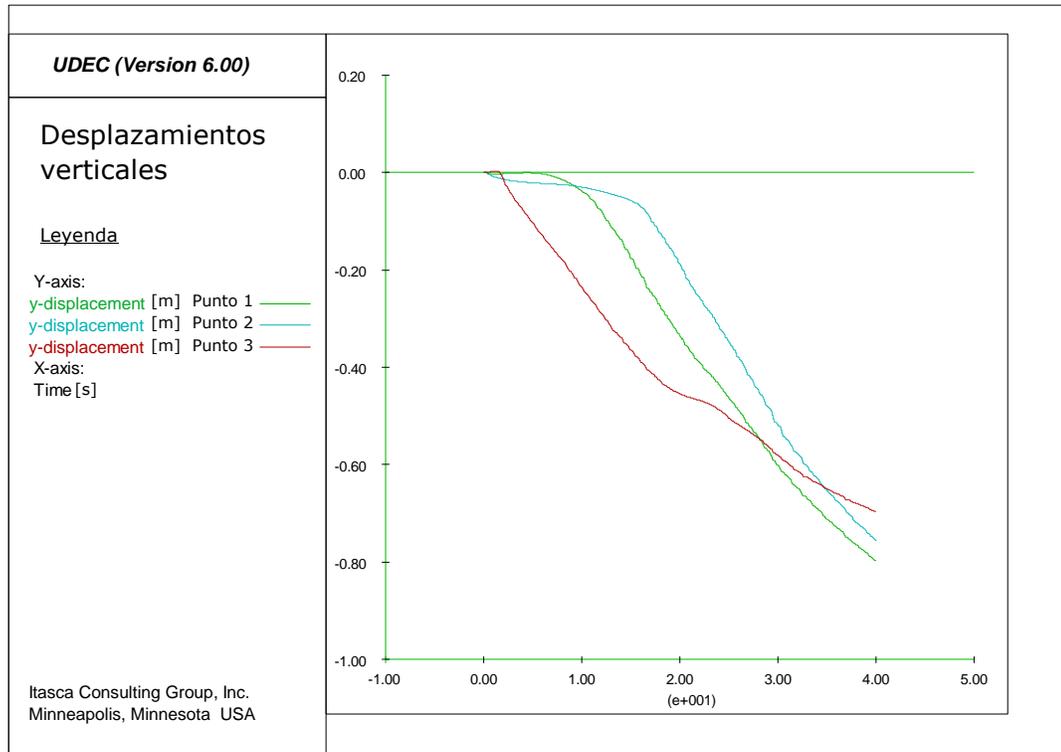


Figura 49: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo estacionario con nivel freático alto.

5.2.2 Modo de flujo transitorio de fluido incompresible

En este caso no es necesario definir presiones de agua en los bordes, ya que no se analiza los casos estacionarios definidos por un nivel freático. Como el flujo transita por todos los bordes (superficies permeables) se restringe esta condición al borde lateral derecho y a la parte superior de la ladera. Se impide el flujo de agua a través de superficies impermeables en la parte inferior (base del modelo) y en el borde lateral izquierdo, ya que la ladera no es infinita y en algún momento debería frenar el flujo de agua en profundidad. Además, si consideramos la presencia del intrusivo en el borde lateral izquierdo, representaría una barrera para el flujo de agua ya que no fue modelado con estructuras y el agua solo fluye a través de estas en el programa. Asimismo, las superficies impermeables podrían provocar la acumulación de agua dentro de la ladera y generar un nivel freático local, sin embargo, estos resultados serán determinados por el programa de acuerdo con las condiciones de cada modelo. La configuración mencionada se puede observar en la Figura 50.

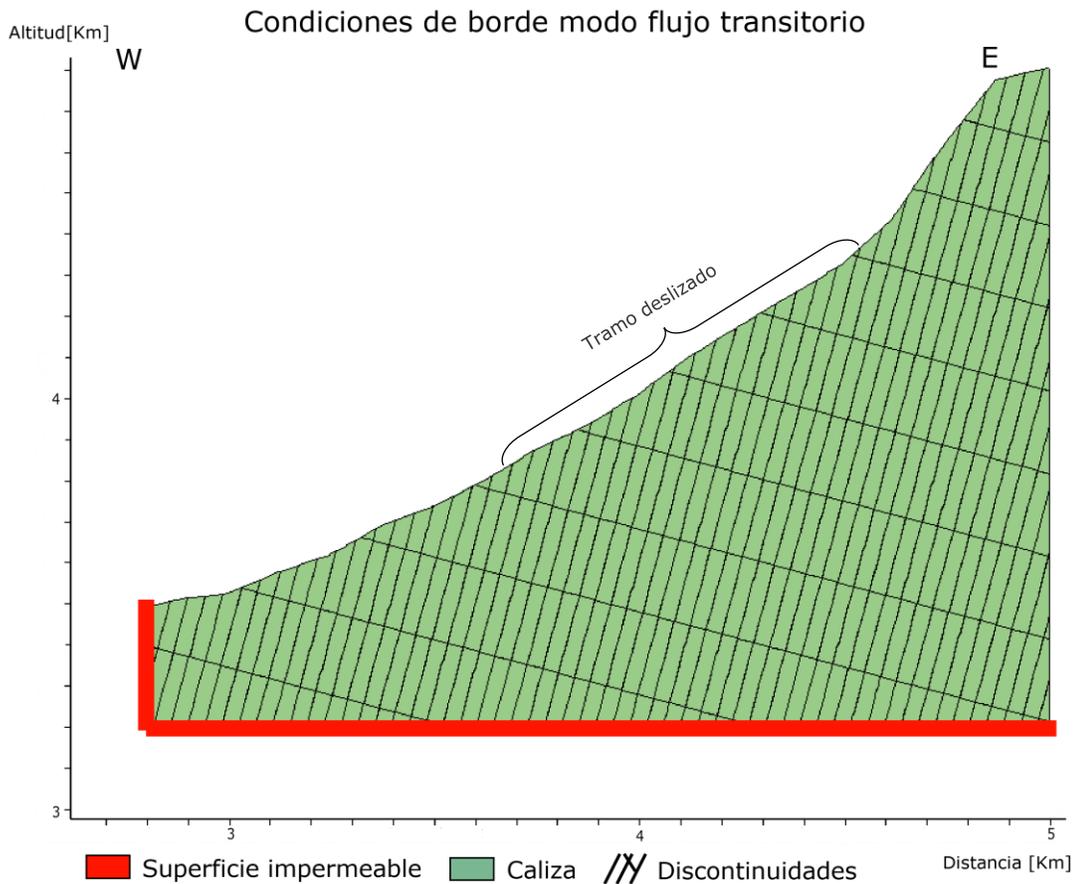


Figura 50: Condiciones de borde para flujo estacionario. Como referencia para los análisis que se mostrarán, se indica en esta figura el tramo deslizado.

Para generar un flujo de agua por la parte superficial de la ladera, el programa permite ingresar una tasa de flujo en cada dominio superficial de las estructuras (*gridpoints*). Esto quiere decir que por cada estructura va a ingresar un flujo en m^3/s asociado directamente a la tasa de derretimiento de nieve en superficie. En el trabajo de Comte (2017) se registra el derretimiento diario durante 1 año desde abril del 2015 hasta abril del 2016 en una estación de Valle Nevado. El derretimiento significativo del manto de nieve ocurre durante noviembre, alcanzando un máximo de 44mm por día (Figura 51). Como la remoción de 1987 ocurrió en noviembre, en la alta codillera, relativamente cercana a la estación mencionada, se toma el dato de derretimiento máximo y se transforma a m^3/s considerando que 44mm equivalen a tener, en un metro cuadrado, una altura de 44mm de agua en el tiempo registrado. El dato de flujo final ingresado es de $5,09 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$.

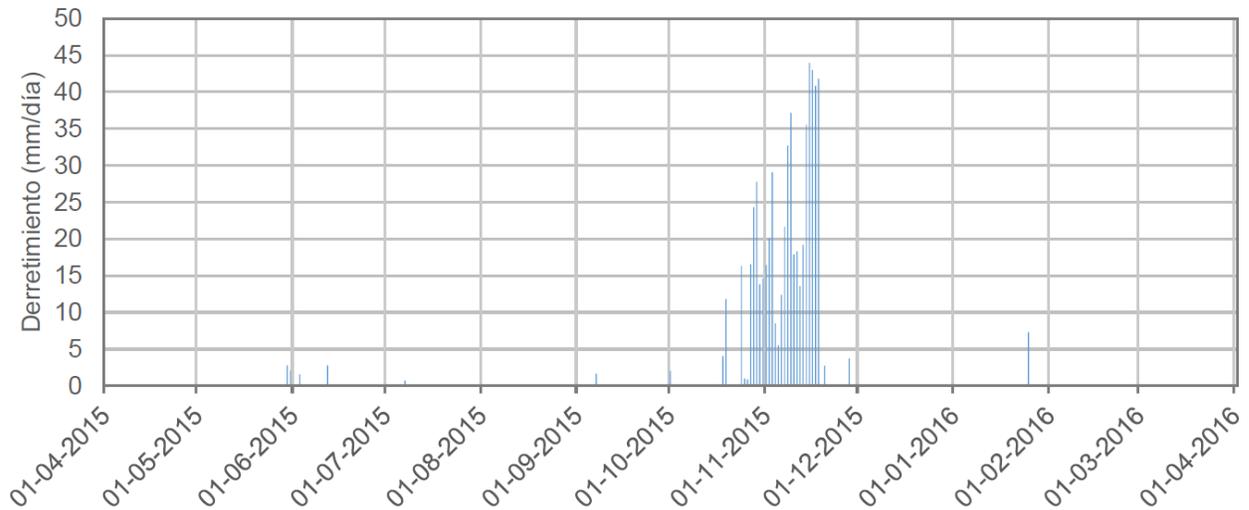


Figura 51: Derretimiento diario estación Valle Nevado (Comte, 2017).

Para correr la simulación es necesario ajustar los tiempos y ciclos de flujo. El comando `"dtflow"` indica el tiempo en segundos en cada paso de flujo (*fluid timestep*), `"cycle n"` indica que se ejecutaran n ciclos de flujo (*n timestep*) por lo que, el tiempo total en segundos de flujo será `"dtflow·n"`. Otra forma de iniciar el modelo es emplear el comando `"step ftime"` en vez de `"cycle"` ya que indica el tiempo de duración del flujo directamente. Hay que considerar también que por cada paso de tiempo de flujo (*fluid timestep*) se generan una serie de pasos de relajación mecánica (mencionado en sección 2.3.2.3) que pueden ser modificados por el usuario con el comando `"maxmech"` para ajustar el modelo. Además, UDEC incorpora una función de saturación permitiendo ajustar esta variable en cada dominio al inicio de la simulación.

Para analizar el comportamiento de la ladera bajo la influencia del agua en este modo de flujo, se generan varios modelos cambiando los parámetros de entrada y los comandos de ejecución. De esta forma, se generan una serie de gráficos que permiten visualizar diversos comportamientos que fueron explicados anteriormente: deslizamiento puntos de control, plasticidad, magnitud de vectores de desplazamiento, abertura y cierre de estructuras (*joint opening/closure*), desplazamiento de corte de discontinuidades (*shear displacement*), dirección y magnitud de flujo, presión de poros en dominios, saturación y estructuras fracturadas (*fractured joint*). Se presentan a continuación cuatro modelos cambiando la saturación inicial. Un modelo con saturación cero, otro con saturación 0,5 y finalmente dos modelos con saturación 1.

5.2.2.1 Modelo no saturado

En primer lugar, se prueba asumiendo saturación cero en todo el modelo, es decir, no hay agua en las estructuras al inicio de la simulación. Esta variable se representa en un rango de 0 a 1 donde el último valor corresponde al 100% de saturación en los dominios. Se ajusta un tiempo de 10 segundos para el paso de flujo (*dtflow*), los pasos mecánicos en 300 y se varia la cantidad de pasos o ciclos (*step*) partiendo con un valor 0 para verificar las condiciones bases y que no se esté generando ningún flujo. Los gráficos asociados a esta fase se muestran en el Anexo G. Otros modelos son generados y mostrados en el Anexo I para entender el

comportamiento al variar los comandos. Luego, se aumenta la cantidad de ciclos para ir observando el ingreso del flujo y los cambios en los comportamientos asociados. Los primeros resultados que se muestran a continuación son generados luego de 1200 ciclos lo que da un tiempo de duración de flujo de 12000s (3,3 horas). Para estos modelos fue necesario aumentar la rigidez normal en tres órdenes de magnitud debido a que se generaban errores de superposición de contactos asociados a esta variable.

Las Figuras 52 y 53 muestran los desplazamientos de los puntos de control, donde se distinguen comportamientos parecidos entre ellos. En la vertical caen entre 1,8 a 2,3mm a las 3,3 horas y en la horizontal se desplazan en ambas direcciones llegando a un máximo de 0,1mm el punto 1. Ambos desplazamientos son muy bajos y se pueden observar también en la Figura 54, donde el máximo vector de desplazamiento observado es de 2,5mm y las direcciones son principalmente verticales negativas.

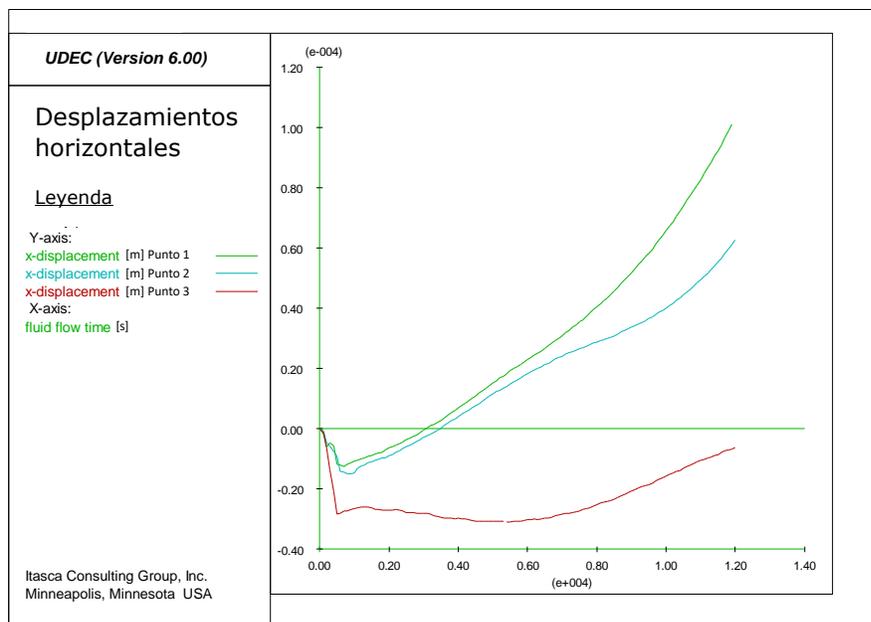


Figura 52: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.

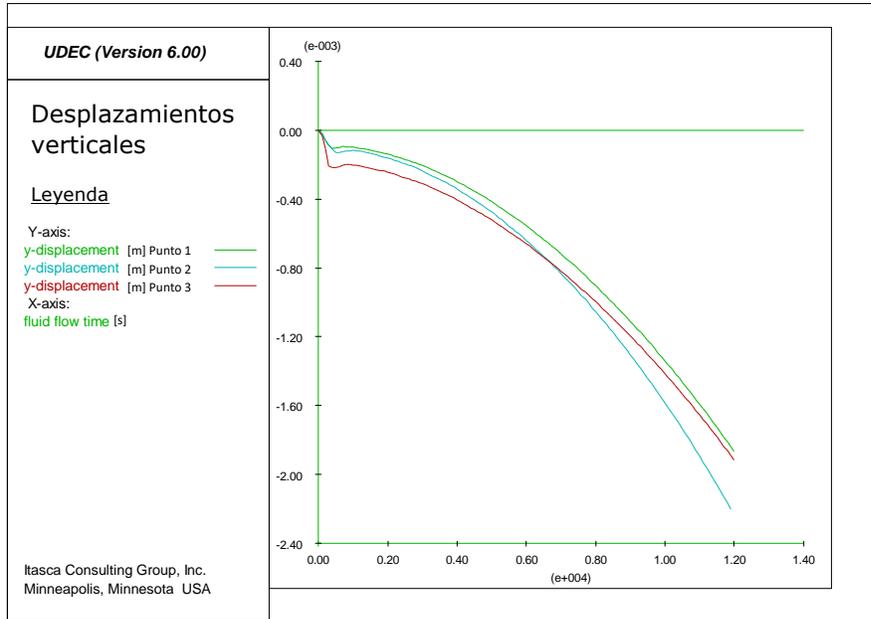


Figura 53: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.

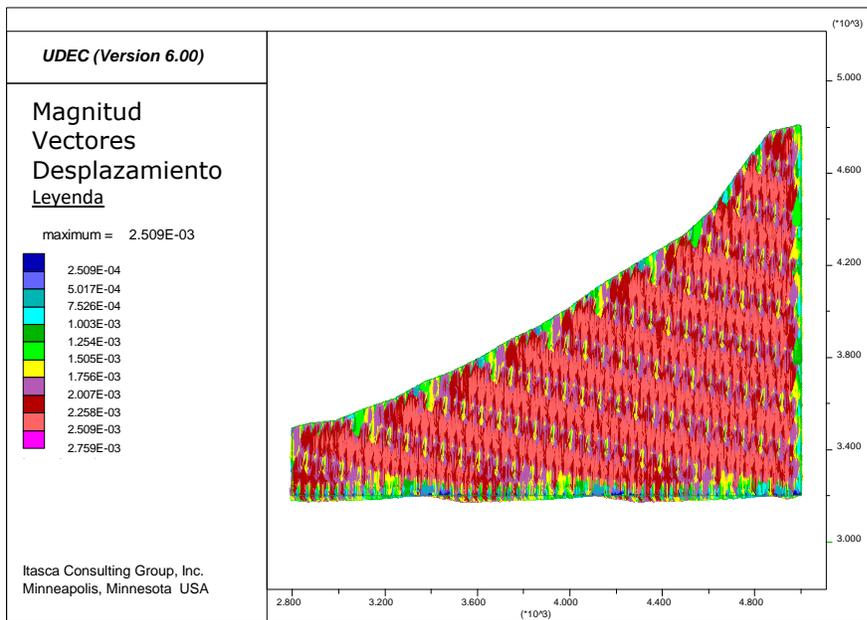


Figura 54: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.

En las Figuras 55 y 56 se observa que no se producen estructuras fracturadas ni zonas que superen el esfuerzo de fluencia en el comportamiento plástico.

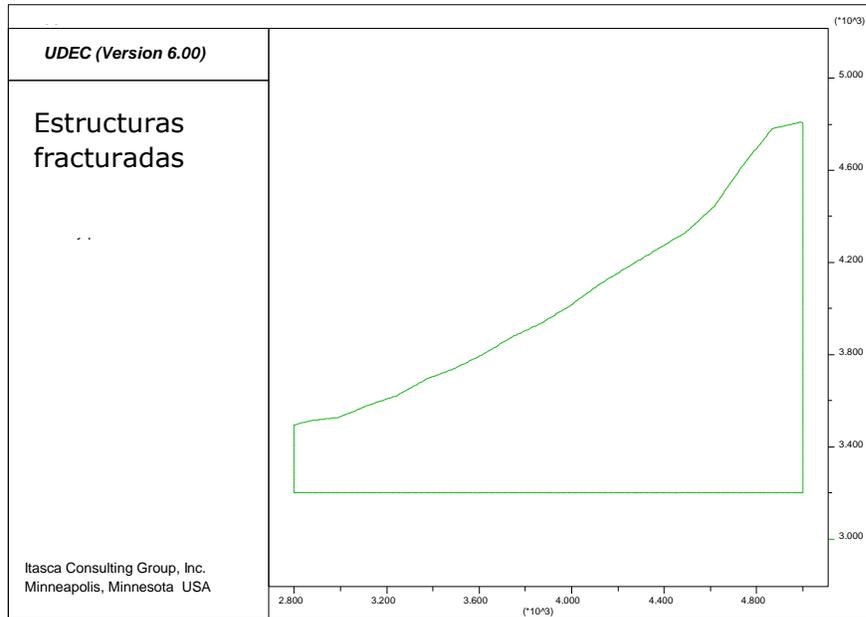


Figura 55: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.

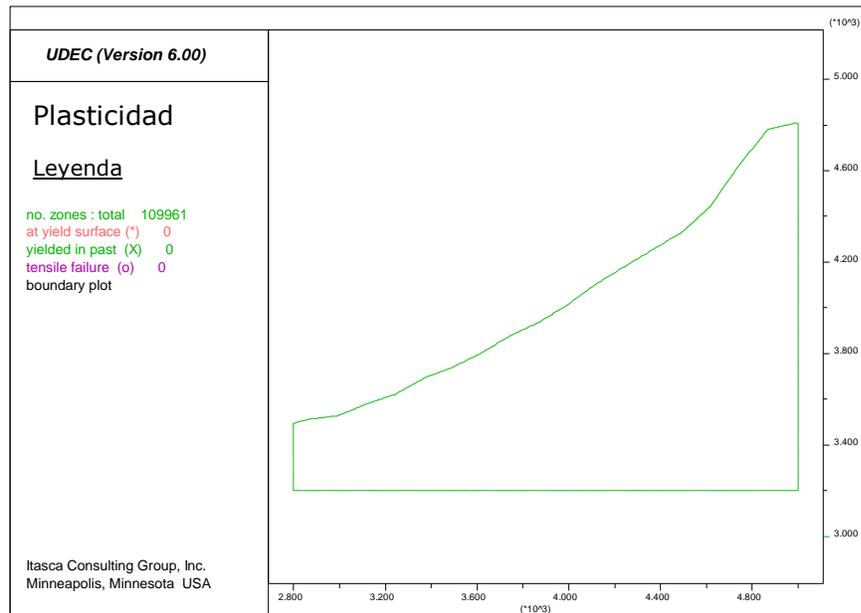


Figura 56: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.

En la Figura 57 se pueden ver aisladas y pequeñas disminuciones en la abertura de las discontinuidades (*joint closure*) en la parte inferior del modelo encerradas en el círculo negro, con un valor máximo de $3,04 \cdot 10^{-7} \text{m}$.

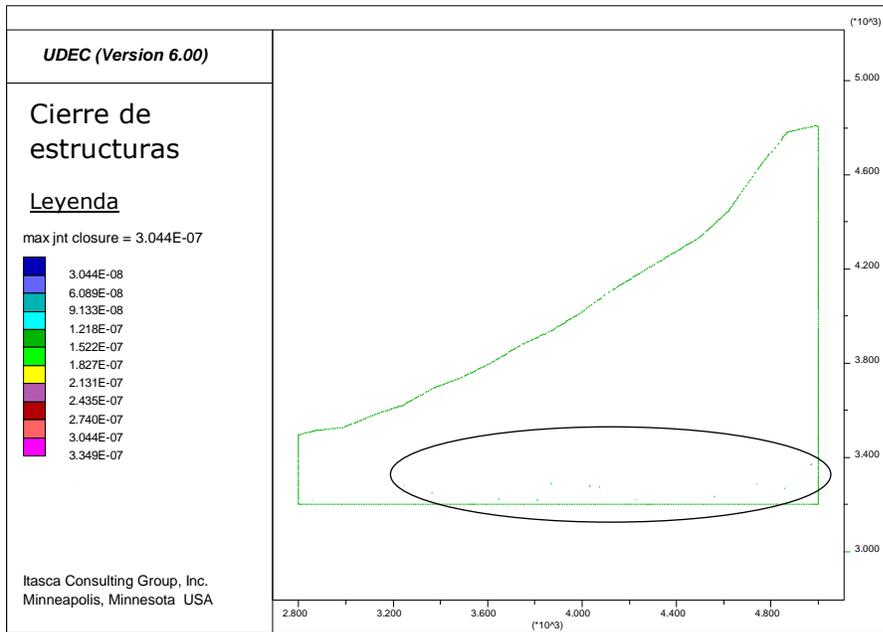


Figura 57: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas. Se concentran en la parte inferior encerradas en círculo negro.

Los desplazamientos de corte de estructuras en la Figura 58 se identifican principalmente en la superficie de la ladera y en los bordes laterales, por las estructuras con manto de 75°W. Algunos pequeños desplazamientos de corte segmentados se aprecian en las estructuras menos empinadas con manto contrario al talud. Aun así, son todos pequeños en magnitud, siendo el máximo de 1,79mm. Por el contrario, en la Figura 59 se observa que las principales aberturas de diaclasas se generan en las estructuras que mantean contrario al manto de talud y también, superficialmente. La máxima registrada es de 1,775mm. Si se compara la ubicación de estas deformaciones con respecto a la zona deslizada se aprecia que los mayores cizalles (color rojo) ocurren en las cotas más altas de la superficie de la ladera, fuera del tramo deslizado. En cambio, las aberturas mayores, se observan en la parte central y baja de esta superficie, abarcando el segmento deslizado.

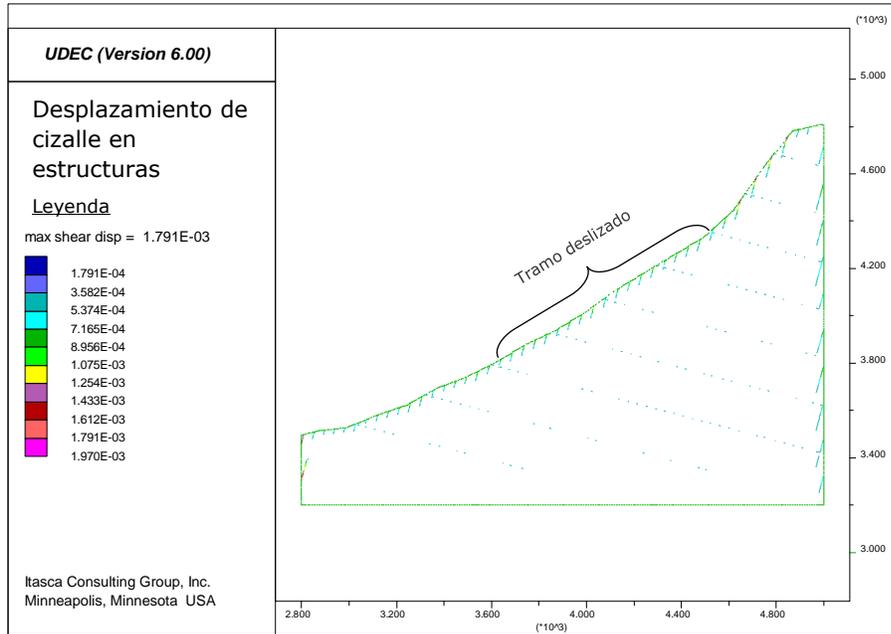


Figura 58: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas. Como referencia se muestra tramo deslizado.

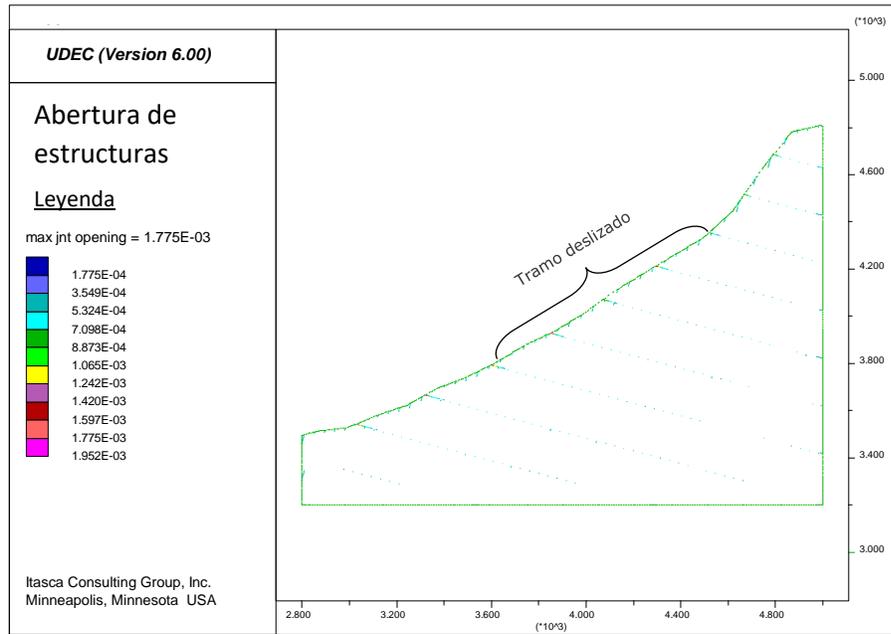


Figura 59: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas. Como referencia se muestra tramo deslizado.

Finalmente, se grafican las presiones de poro de dominios y los vectores de flujo con su magnitud en las Figuras 60 y 61 respectivamente. En el primero, no se observan presiones de poro ya que como la ladera no estaba saturada, el agua ingresada no alcanza a generar presiones en los dominios. De la segunda figura se

aprecia que el flujo avanza en profundidad paralelamente a la superficie y son las estructuras más verticales las que adquieren mayor magnitud (el mayor flujo es de $9,87 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$). En particular, aquellas en su parte alta son cercanas al otro set de estructuras debido a que, en la intersección, el flujo tiende a fluir por el set más vertical, lo que genera mayor volumen en esas estructuras. El mismo comportamiento se observa en la Figura 62 donde se muestra la saturación de agua en el modelo. En general a medida que avanza el flujo se comienzan a llenar las discontinuidades de agua (subsaturadas), expresando en este caso, un máximo de saturación de 0,17.

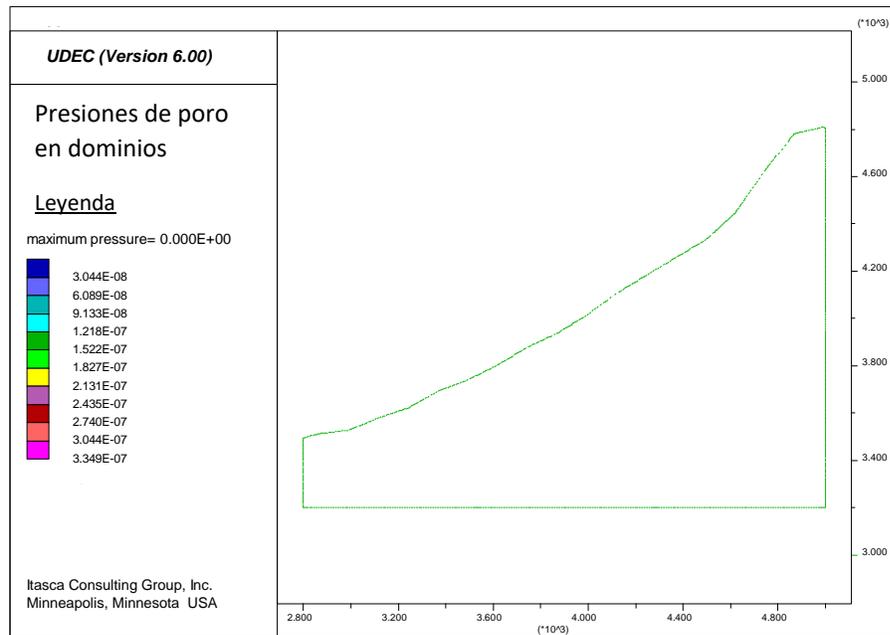


Figura 60: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.

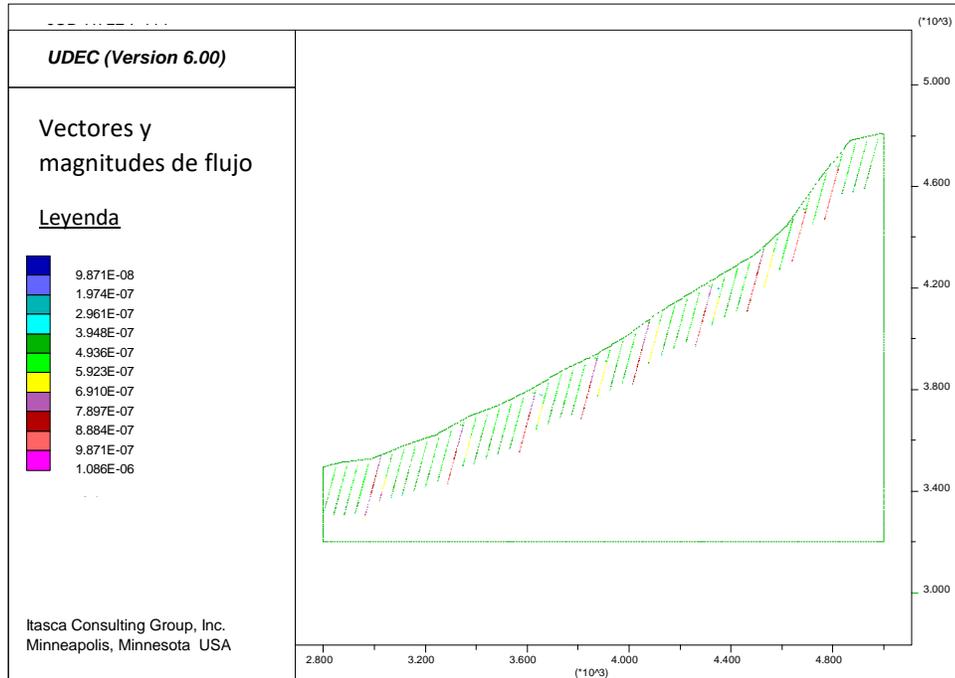


Figura 61: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.

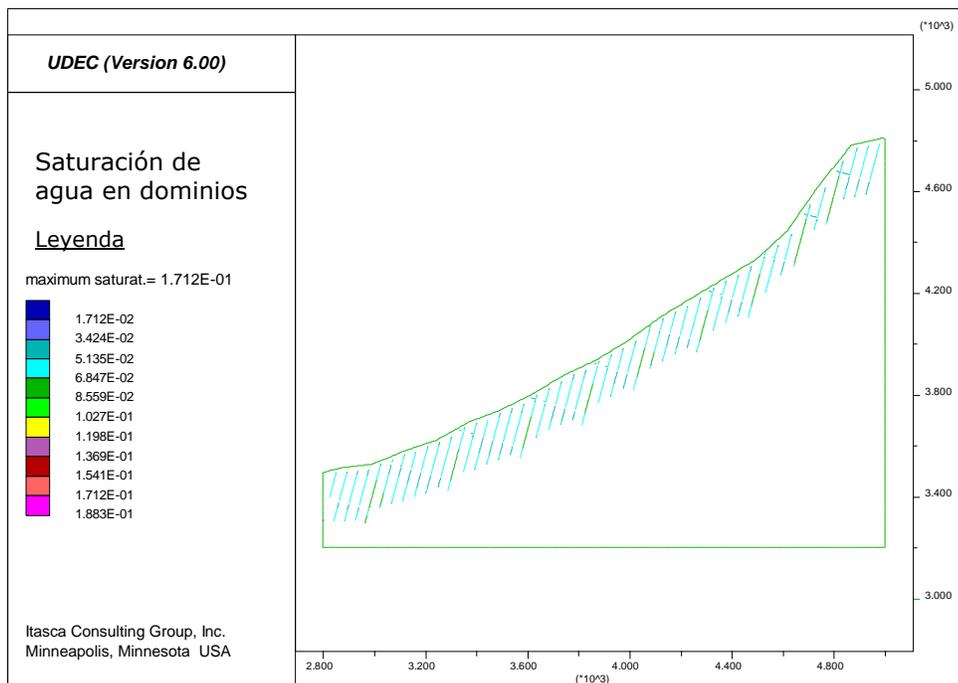


Figura 62: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial cero ejecutado por 3,3 horas.

Al intentar generar este mismo modelo durante un tiempo superior de flujo, se generan nuevamente los errores de superposición antes mencionados. El último ciclo posible de ejecutar es el 1800 que representa 5 horas de cómputo y los modelos no

difieren mucho del anterior, a excepción de los vectores de flujo que avanzan en profundidad aún más. Las figuras asociadas a este esquema se muestran en el Anexo H.

5.2.2.2 Modelo con 50% de saturación

Cuando se aumenta la saturación inicial a 0,5 se necesita ajustar tiempos de paso y computo mucho más pequeños. Se prueba con un *dtflow* de 2 s y se ejecuta el modelo preliminar de 1 ciclo. El valor de *maxmech* se establece en 1000. La Figura 63 muestra el diagrama de vectores y magnitud de flujo de este modelo donde se aprecia que en el inicio de la simulación ya se están generando flujos en toda su extensión. Sin embargo, en este paso no se generan aún presiones de poro ni deslizamientos, cierres o aperturas de diaclasas. Además, en la Figura 64 se puede apreciar la saturación inicial impuesta en las estructuras de todo el modelo.

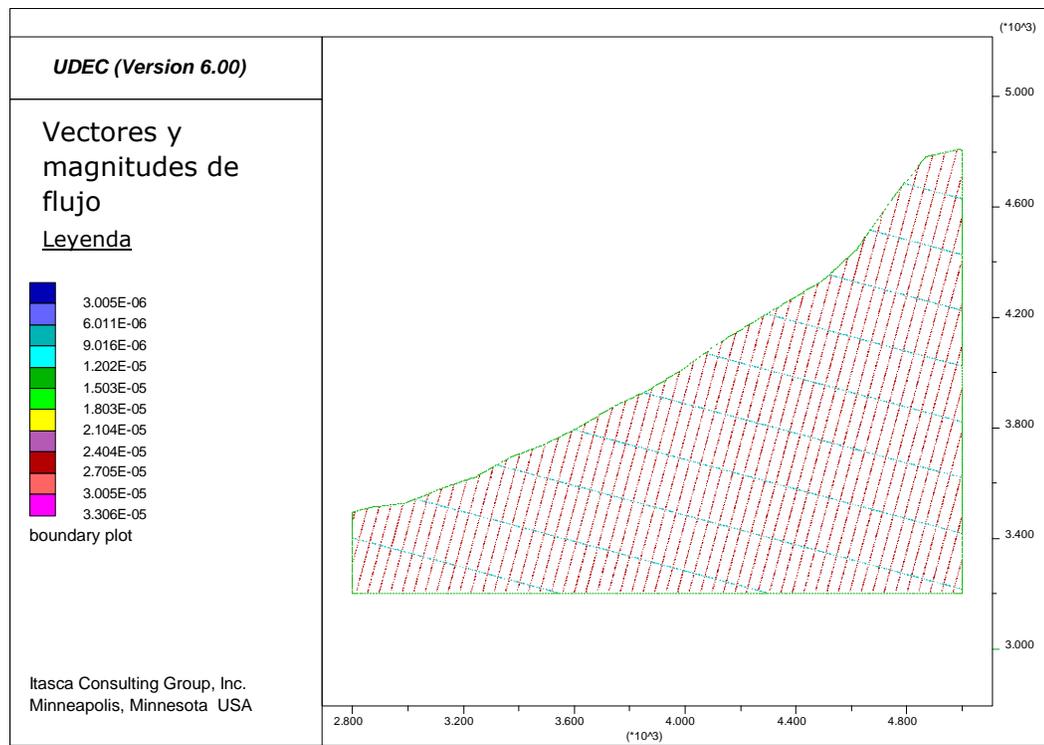


Figura 63: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado por 2 s.

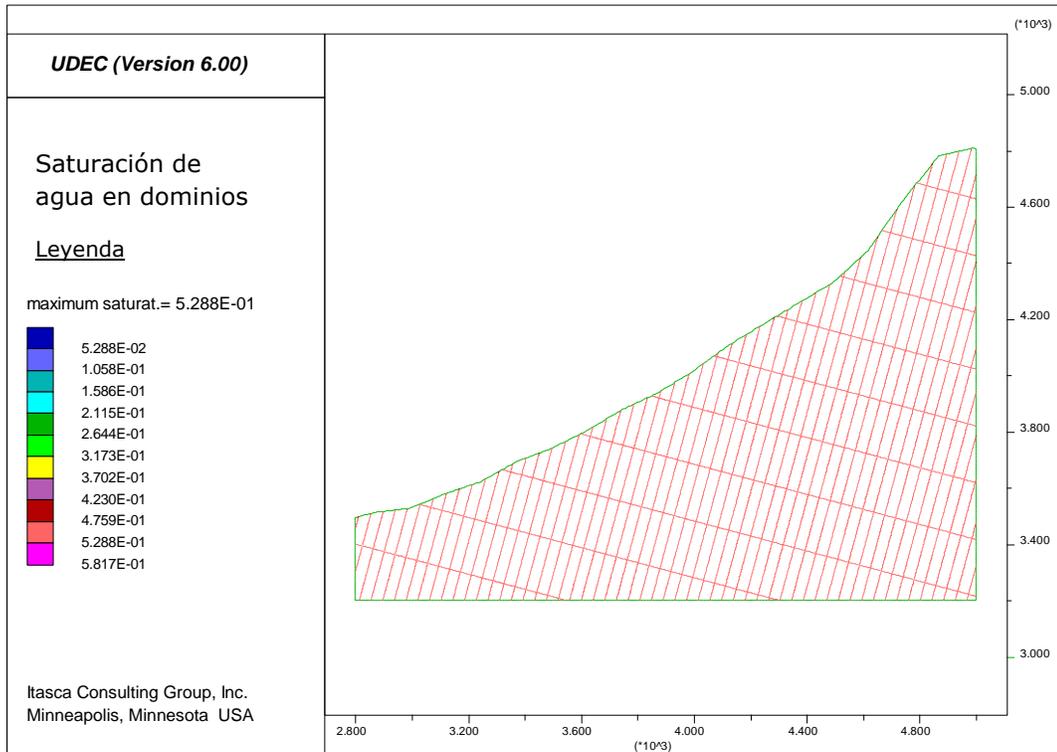


Figura 64: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado por 2 s.

Luego de 50 ciclos (1,67 minutos) se vuelven a visualizar los resultados del modelo. En la Figura 65 se presenta el diagrama de estructuras fracturadas, donde no se distingue ninguna en esta condición. Las Figuras 66 y 67 representan el cierre de discontinuidades y aquellas estructuras que están en el límite de cizalle, respectivamente. Sin embargo, son escasos los puntos que se pueden observar y en el primer caso, son de baja magnitud (el máximo es de $2,03 \cdot 10^{-3} \text{mm}$). Con respecto a los desplazamientos de bloques, la Figura 68 muestra un máximo de 10,9cm mientras que, las Figuras 69 y 70 señalan comportamientos parecidos de los puntos, indicando que el punto 2 tiene mayor movimiento tanto en la vertical como en la horizontal, seguido por el punto 1 y 3.

Por otro lado, se mantiene el comportamiento de las estructuras de los modelos anteriores al observar los desplazamientos de cizalle y aberturas (Figura 71 y 72 respectivamente), ya que, se generan superficialmente, existiendo un predominio de mayores aberturas en el set de estructuras de menor manteo y, de igual forma, superioridad de mayores cizalles en el set de estructuras con mayor pendiente y misma orientación que la ladera. Estos valores son mayores en las zonas más altas del talud, particularmente, fuera de la zona deslizada. Aun así, para ambas deformaciones, se observa un sector donde en ambos sets se producen cizalles y aperturas (círculos negros en las imágenes), presentando la mayor abertura de $7,69 \cdot 10^{-2} \text{m}$ y el mayor cizalle de $6,02 \cdot 10^{-2} \text{m}$.

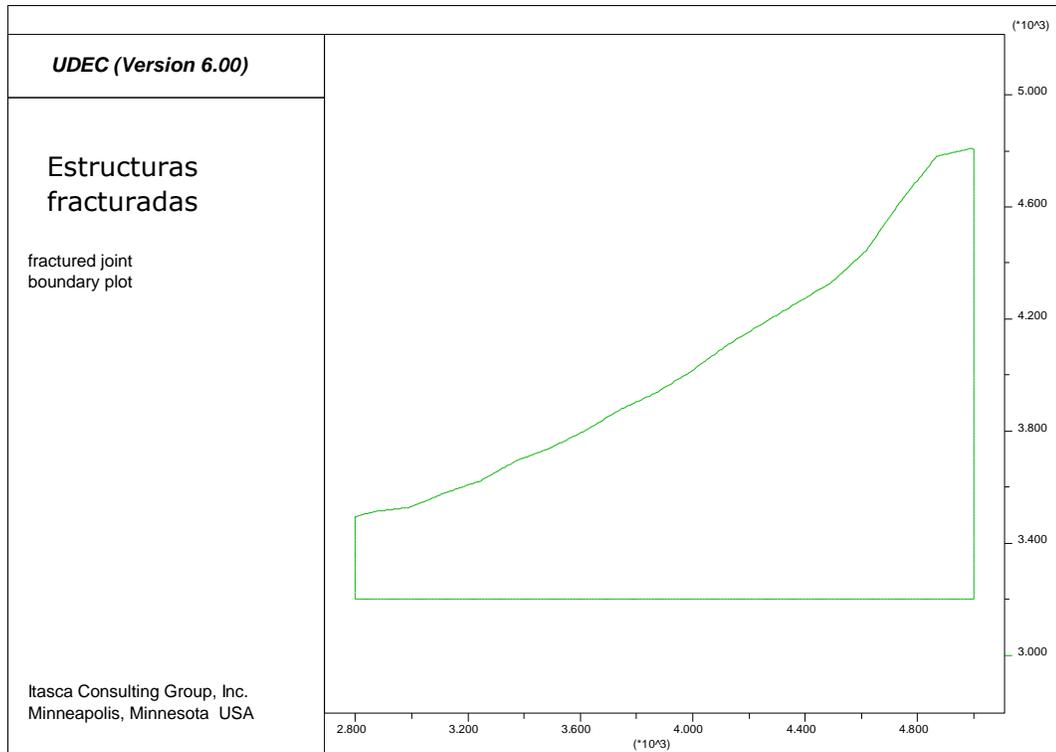


Figura 65: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.

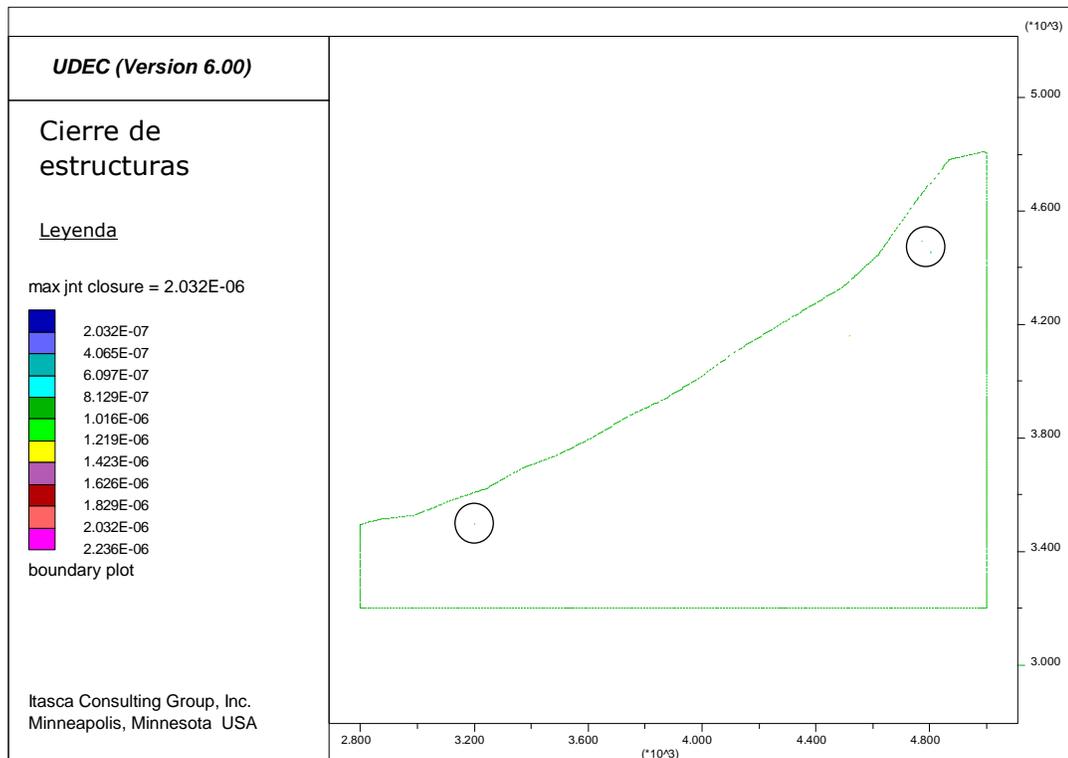


Figura 66: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado por 1,67 minutos. Círculos negros indican las zonas afectadas.

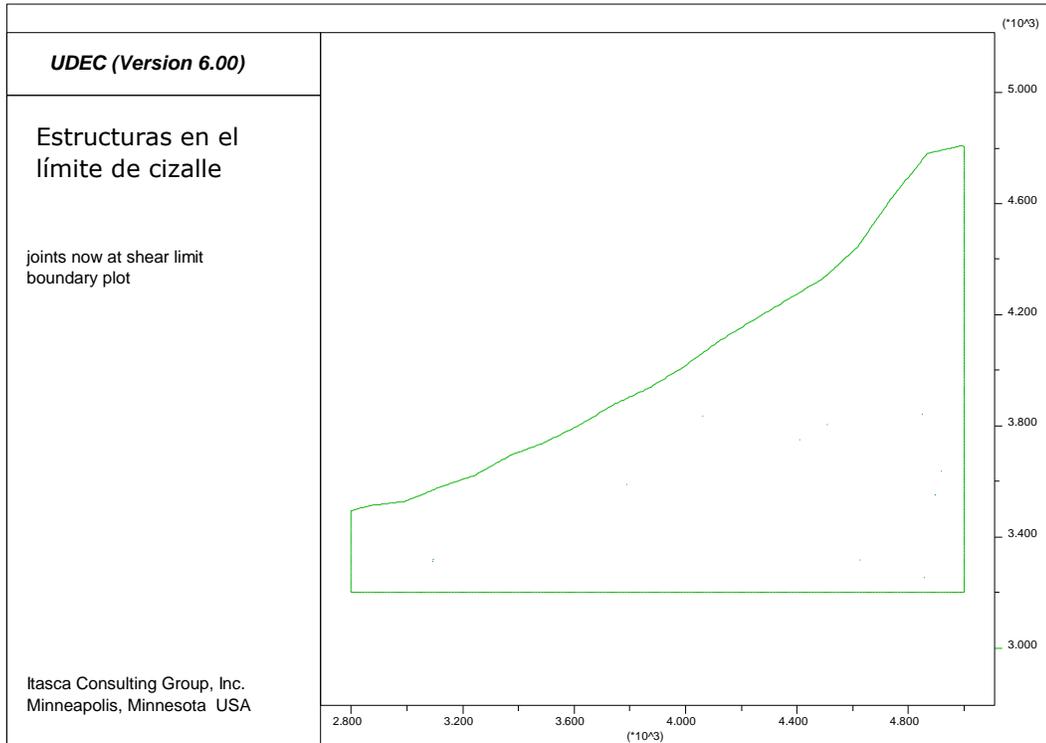


Figura 67: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.

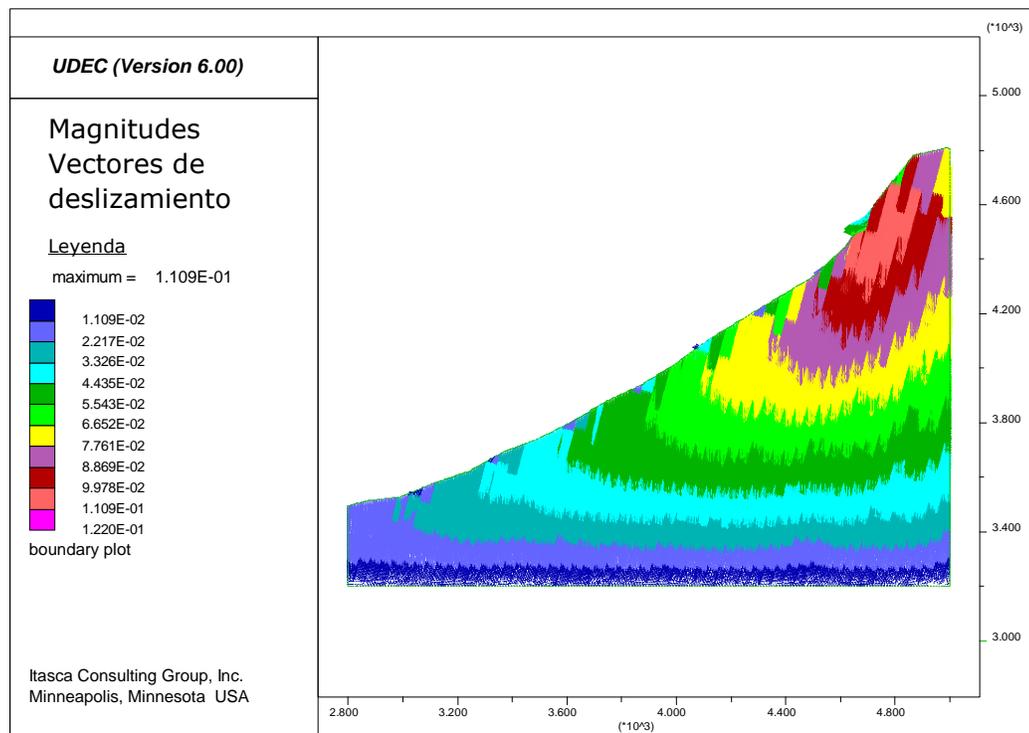


Figura 68: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.

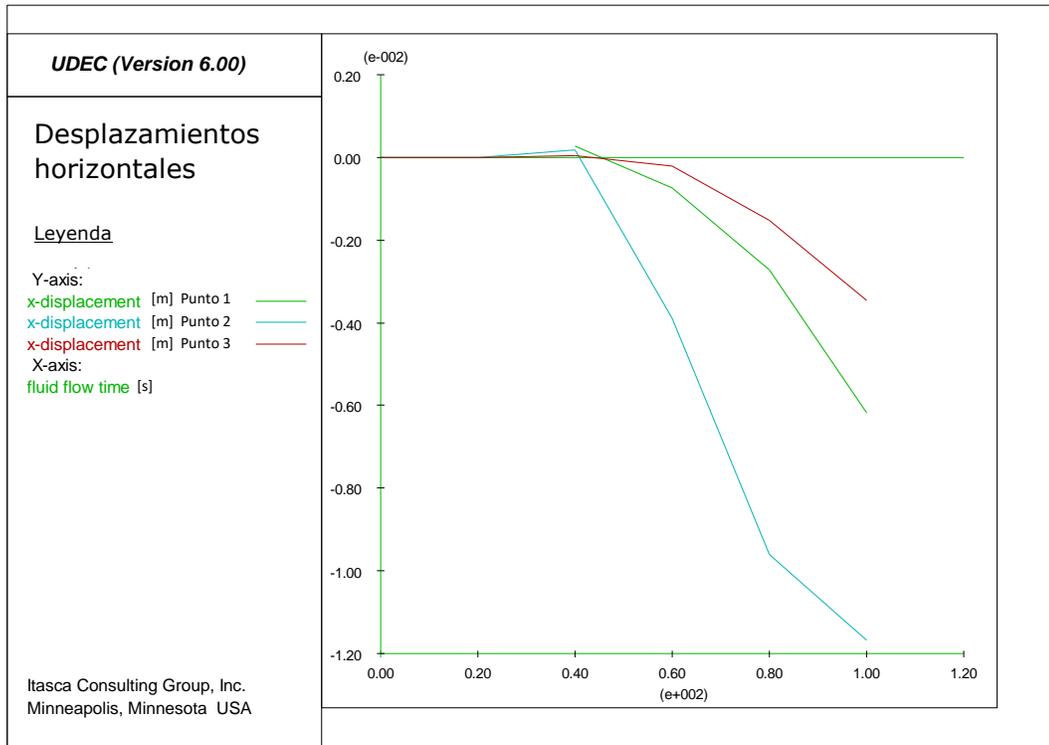


Figura 69: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.

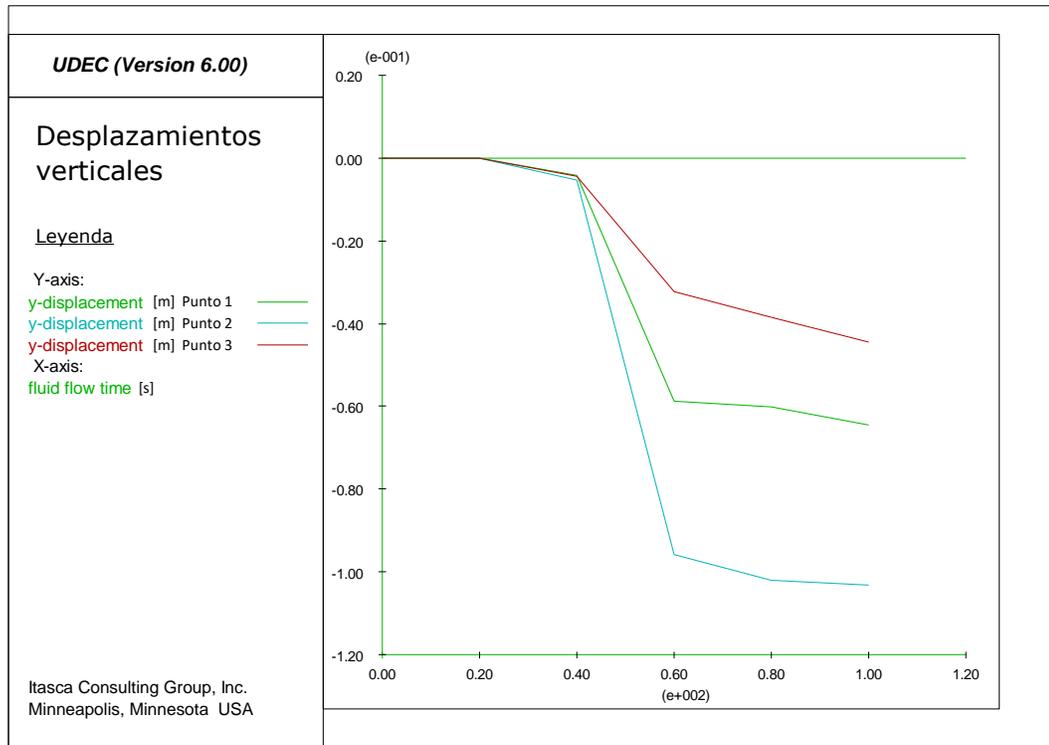


Figura 70: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.

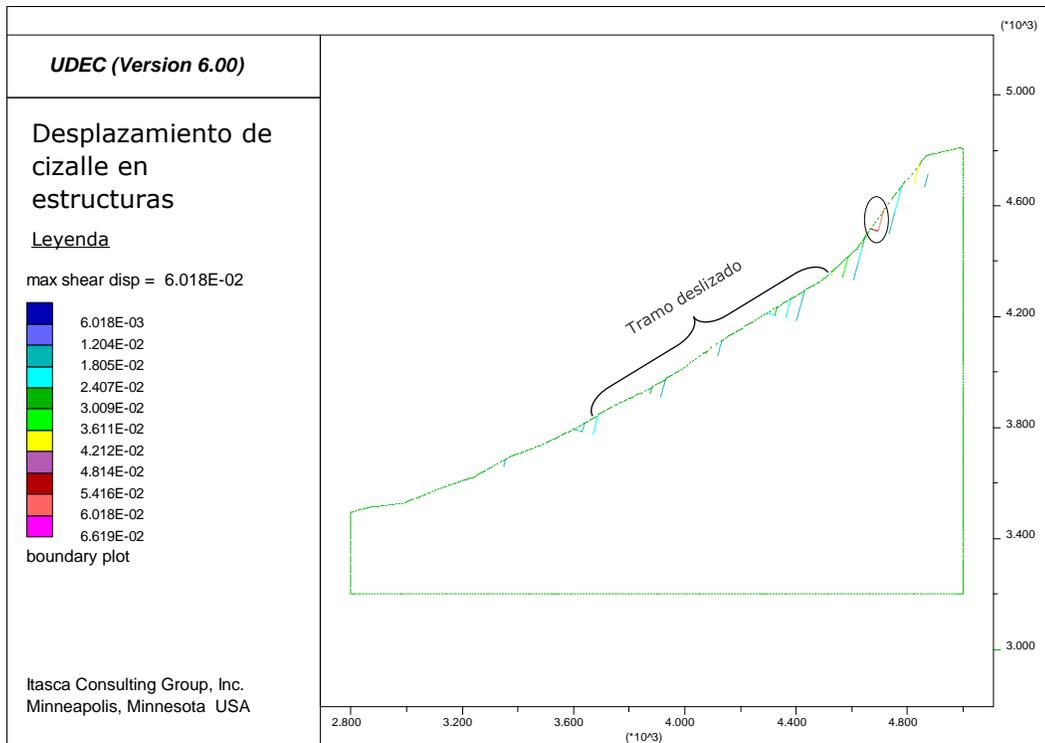


Figura 71: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos. En círculo negro se muestra el sector donde en ambos sets se producen cizalles. Como referencia se muestra tramo deslizado.

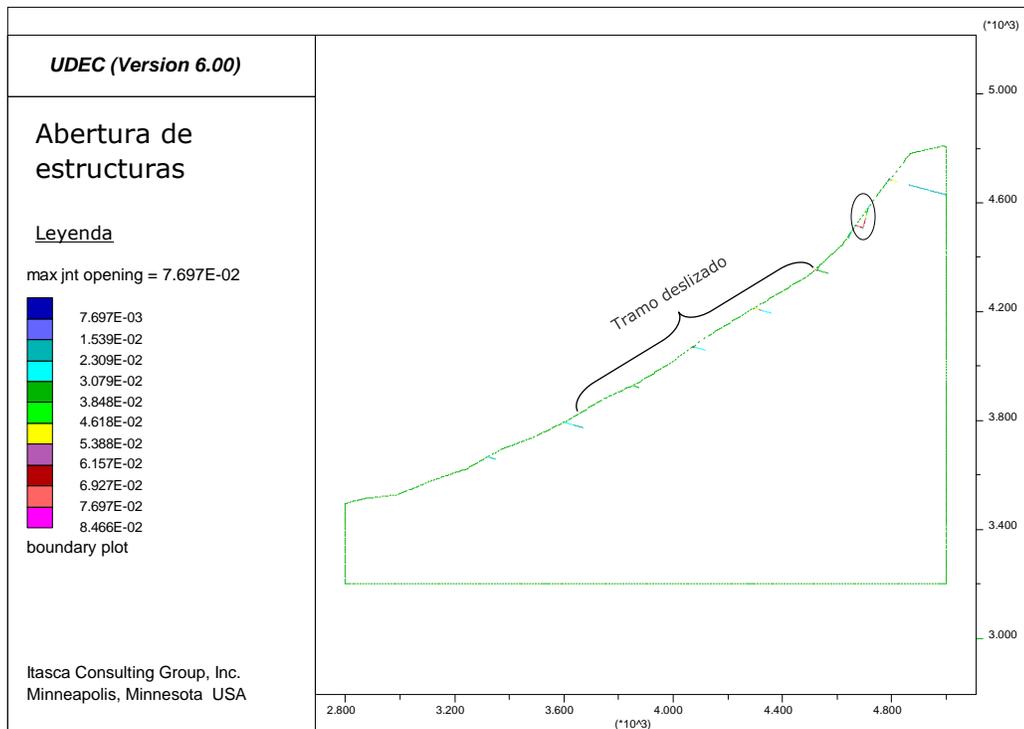


Figura 72: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos. En círculo negro se muestra el sector donde en ambos sets se producen aberturas. Como referencia se muestra tramo deslizado.

Con respecto al comportamiento plástico observado en la Figura 73, solo presenta zonas que superaron el esfuerzo de fluencia en algún momento del cómputo, pero no representa zonas activas. Sin embargo, estas zonas coinciden con aquellas en que se producen mayores movimientos de cizalle y aperturas. Finalmente, las Figuras 74 y 75 muestran los vectores de flujo y presiones de poro en los dominios donde se puede apreciar que se genera un *gap* en profundidad de estas variables. Este mismo espacio irregular es observado en la Figura 76 en las zonas donde se observa un cambio en la saturación (subsaturada).

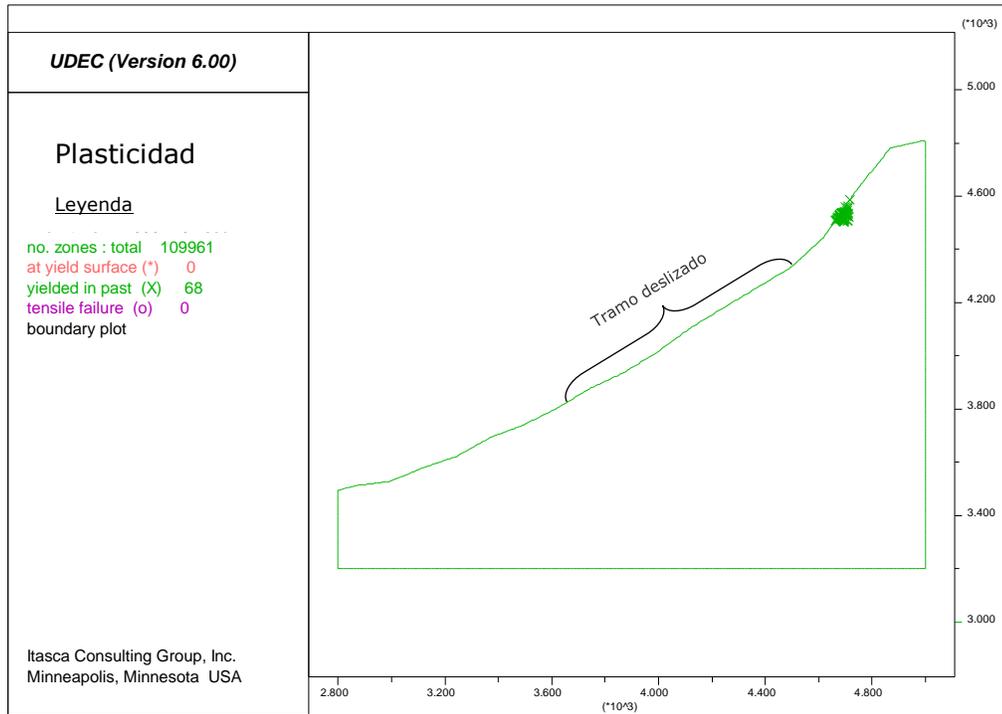


Figura 73: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos. Como referencia se muestra tramo deslizado.

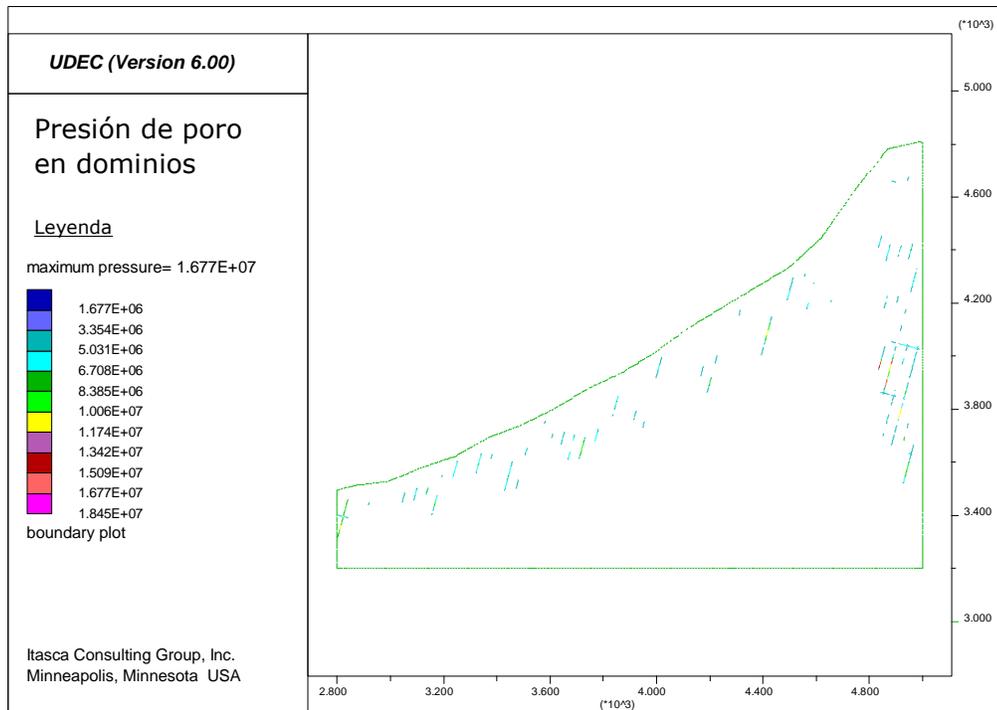


Figura 74: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.

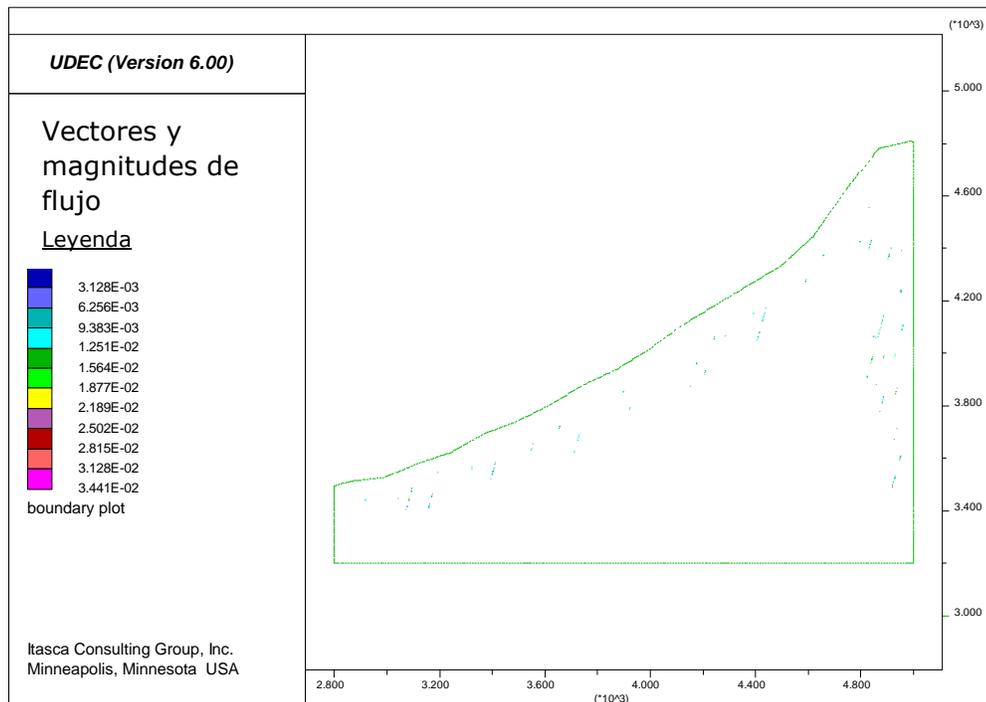


Figura 75: Vectores y magnitud de flujo en m³/s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.

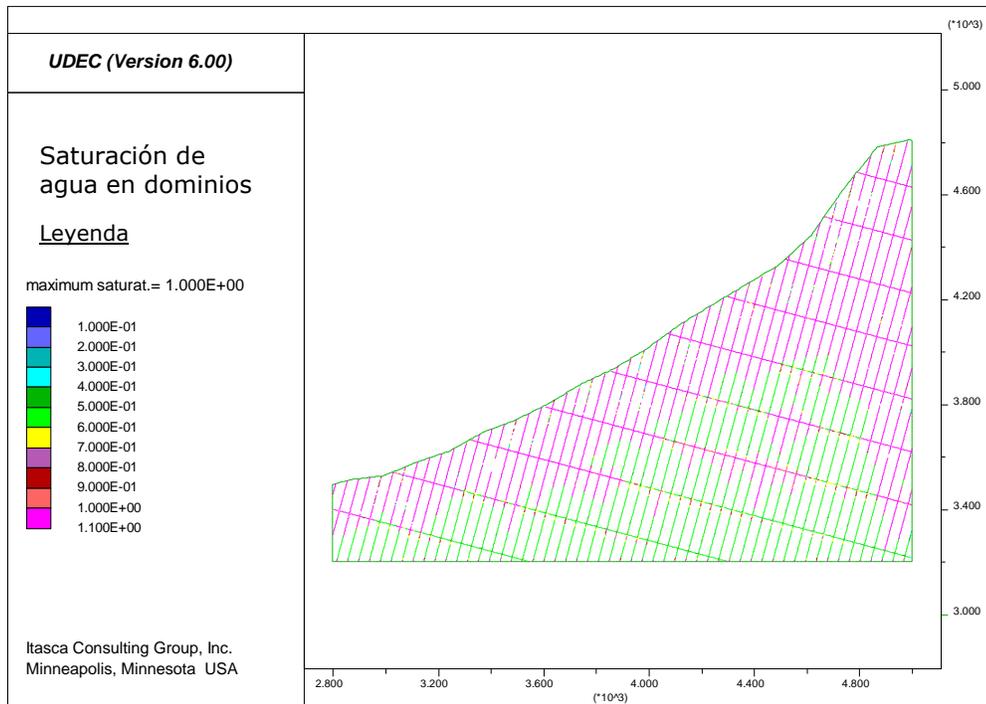


Figura 76: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 0,5 ejecutado durante 1,67 minutos.

5.2.2.3 Primer modelo con 100% de saturación

La última etapa consiste en analizar la estabilidad en un modelo completamente saturado antes de ingresar el flujo (saturación 1). En este caso se utilizan valores más pequeños aún para definir el tiempo y paso de flujo. Se ingresa un $dtflow$ de 0,1 y ejecutan 15 $step$ generando un tiempo de flujo total de 1,5 segundos. Los resultados son mostrados desde la Figura 77 hasta la 88.

En la Figura 77 se puede apreciar dos pequeñas fracturas bajo la superficie de la ladera al igual que en la Figura 78 se observan zonas aisladas de cierre de estructuras muy cercanas a las anteriores. Con respecto a las aperturas y deslizamientos de cizalle de las estructuras se vuelve a visualizar en las Figuras 79 y 80 el mismo comportamiento superficial mencionado en los otros modelos. Se producen separaciones de discontinuidades en el set de estructuras con menor manto, pero en menor medida que los modelos anteriores, mientras que, se generan mayor cantidad de movimientos de cizalle en el set de estructuras con mayor manto, pero con menor magnitud ($4,69 \cdot 10^{-2}m$) que el modelo de la sección 5.2.2.2. En este caso, además, la magnitud máxima de separación es mayor (0,27m) comparada con los modelos anteriores. Si se contrasta la ubicación de los movimientos con respecto al tramo de deslizamiento, se puede observar que las aperturas ocurren principalmente en la parte media, que coincide con la zona deslizada, y también en las estructuras de mayores altitudes. En el caso de los movimientos de cizalle se indican mayores magnitudes y longitudes afectadas en la parte media de la superficie, lo cual también coincide con el segmento deslizado, pero no con su cota superior (corona de deslizamiento). Las estructuras en el límite de cizalle (Figura 81) se

visualizan como pequeños puntos aislados que no siguen ningún patrón o lineamiento particular.

Con respecto al comportamiento plástico (Figura 82), esta vez sí se generan zonas dentro del modelo donde el esfuerzo de fluencia es superado, principalmente cercana al borde superior y derecho del modelo. Además, en algunas de estas mismas zonas se producen también rupturas por tensión. Si observamos en detalle, la distribución de rupturas sigue la misma configuración que el set de estructuras de menor manto contrario al manto del talud.

Los desplazamientos observados en la Figura 83 presentan una distribución irregular, aumentando en magnitud con un máximo de 0,2m en las zonas de plasticidad recién mencionadas a diferencia de las zonas de alrededor. Los puntos de control en las Figuras 84 y 85 mantienen un comportamiento lineal, presentando nuevamente mayor desplazamiento en la vertical el punto 2.

Con respecto al fluido, se observan muy pocos vectores de flujo y presiones de poro en las Figuras 86 y 87 pero son de mayor magnitud comparados con los modelos anteriores (los máximos son $1,09\text{m}^3/\text{s}$ y $6,49\text{Pa}$ respectivamente). La saturación de agua en los dominios mostrada en la Figura 88, indica una disminución de esta en la superficie de la ladera, probablemente asociada a los cambios de flujos que se producen en esta zona.

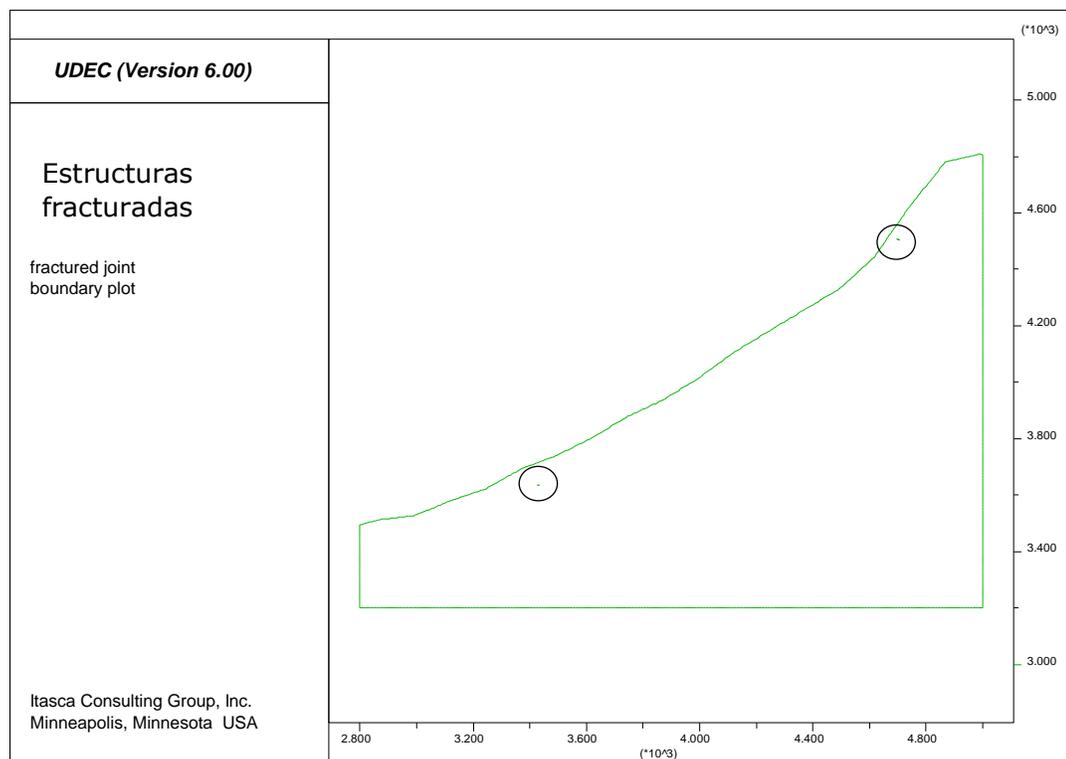


Figura 77: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos. Círculos negros muestran las estructuras identificadas.

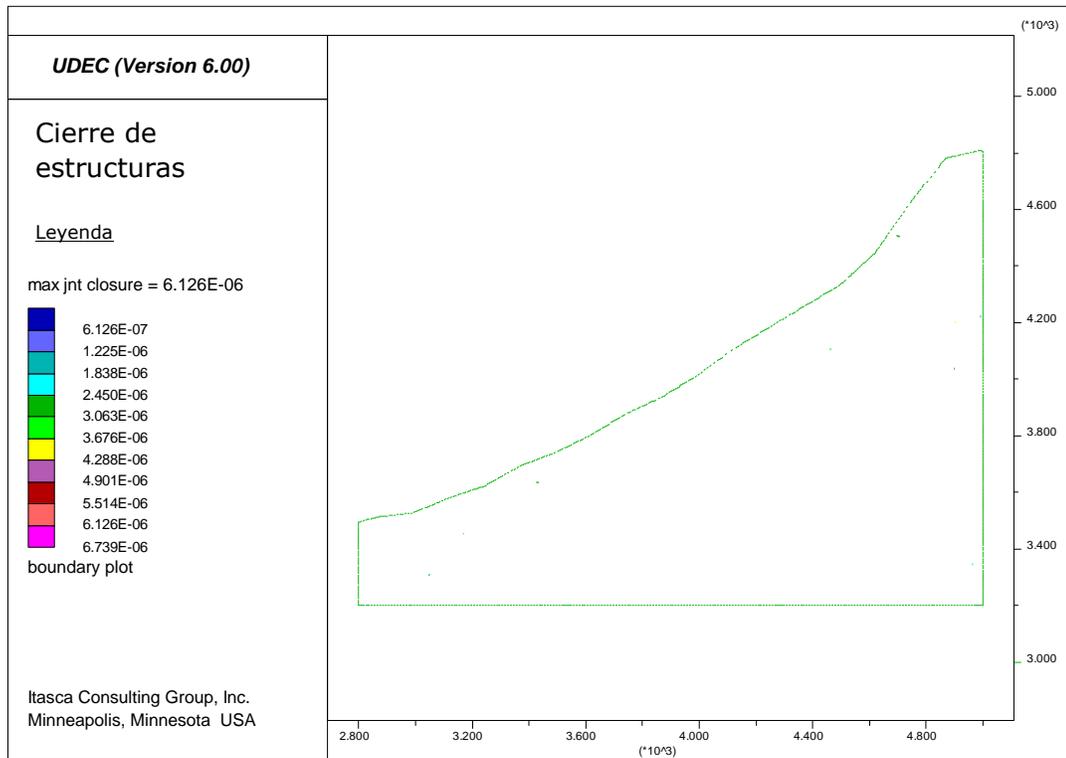


Figura 78: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado por 1,5 segundos.

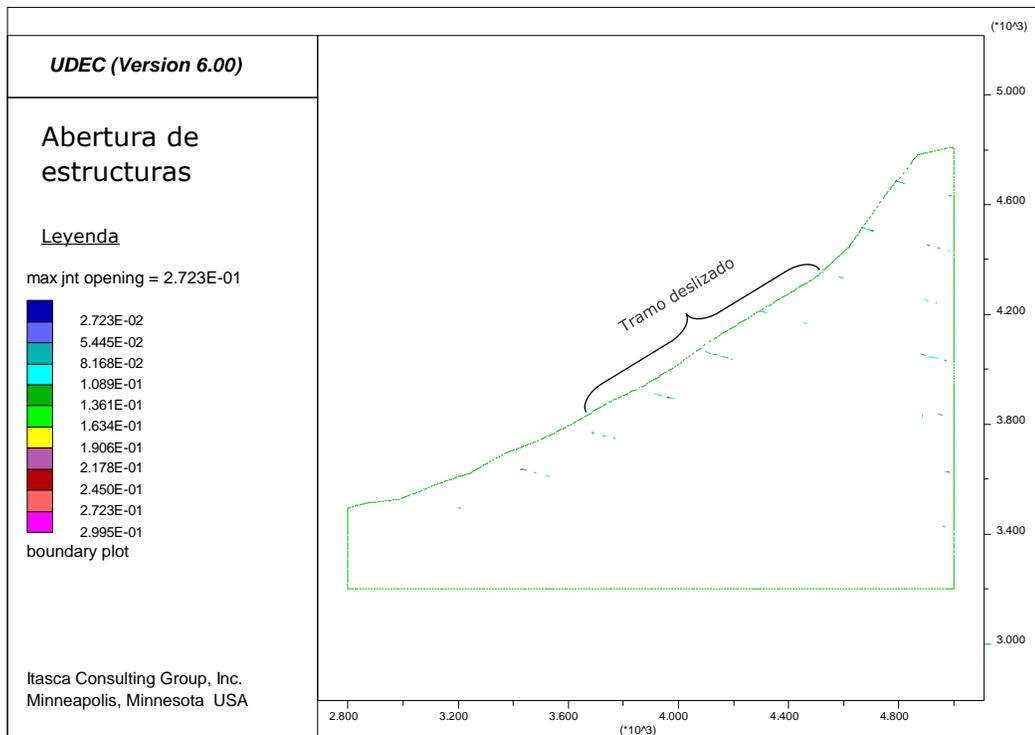


Figura 79: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.

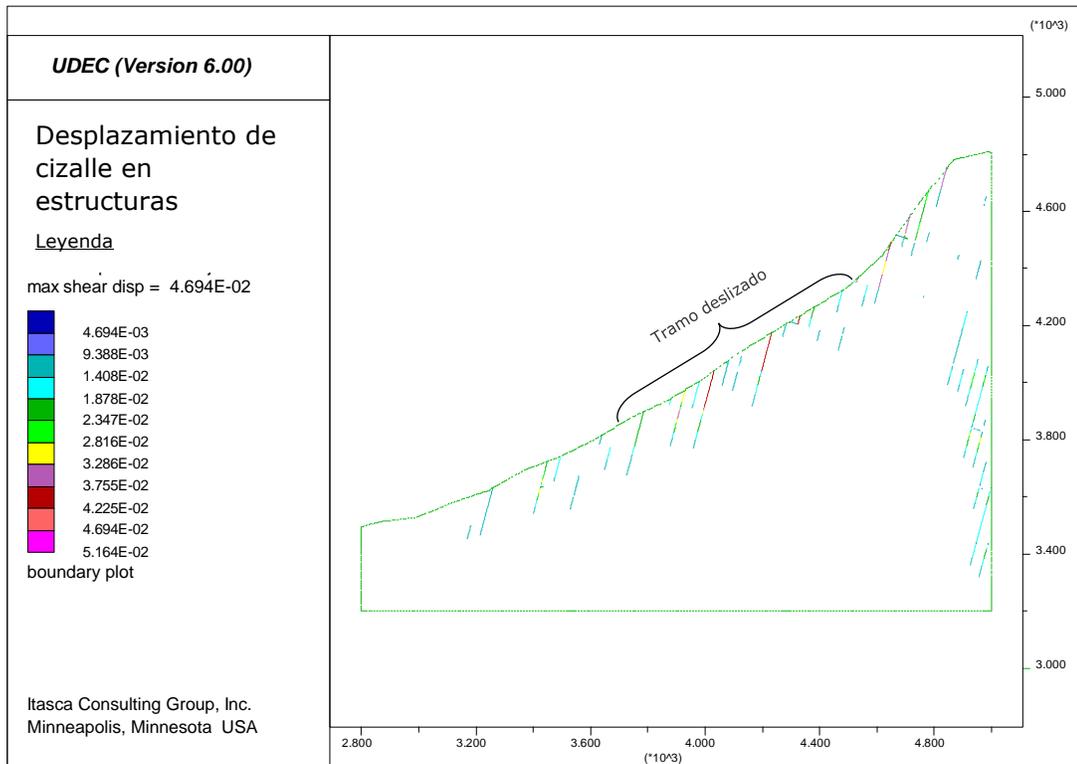


Figura 80: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.

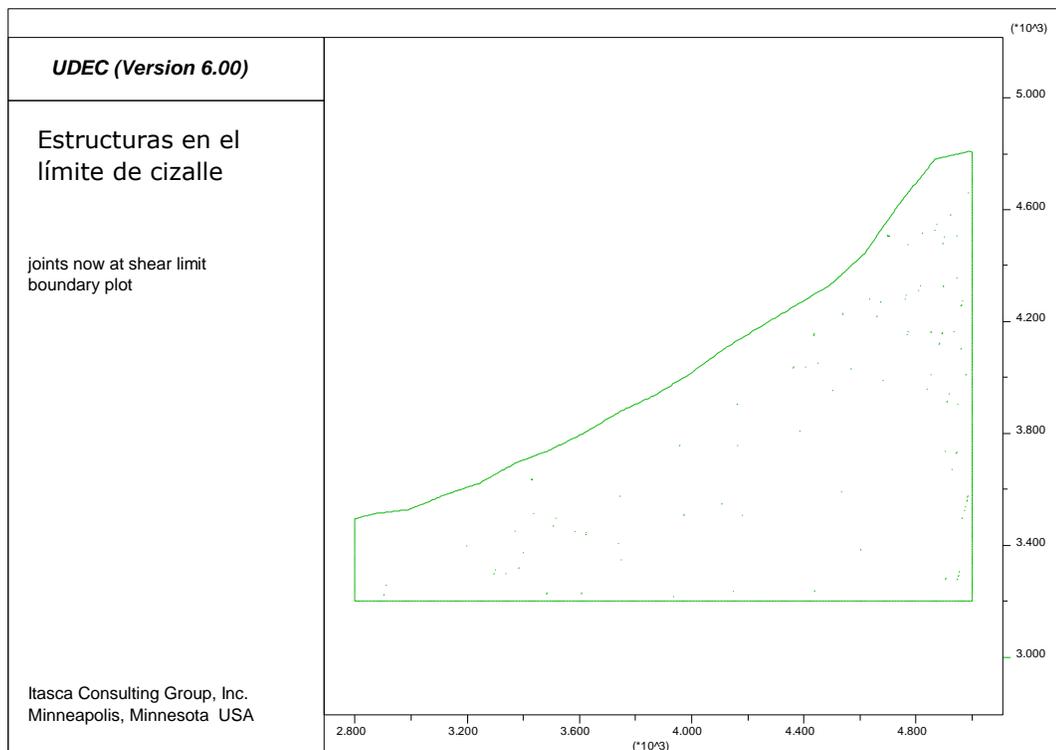


Figura 81: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.

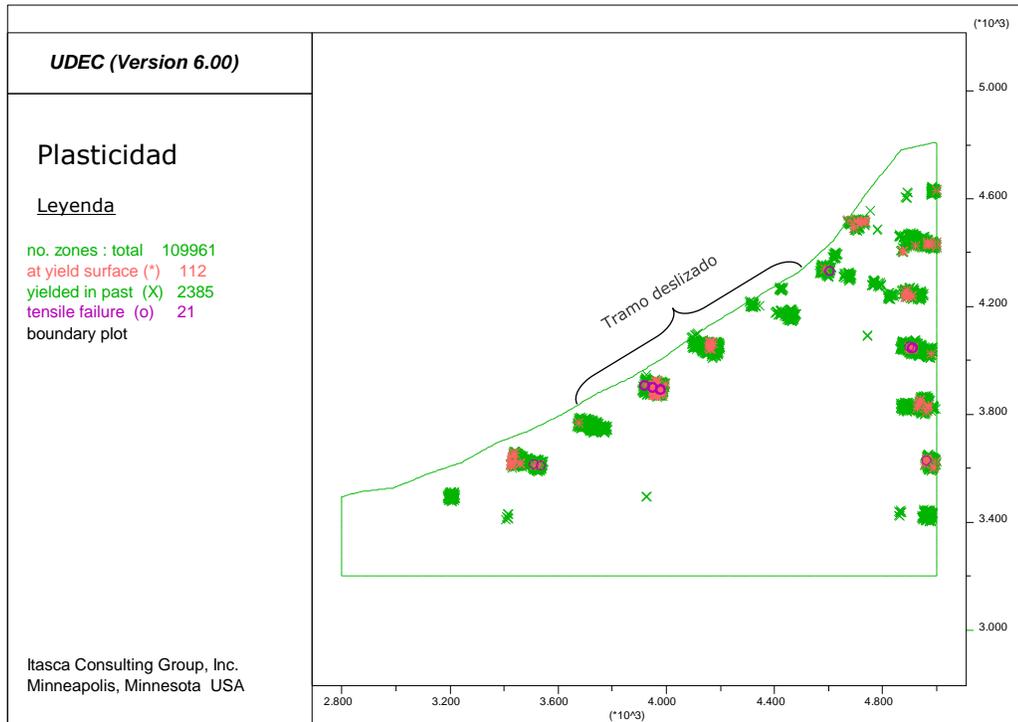


Figura 82: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.

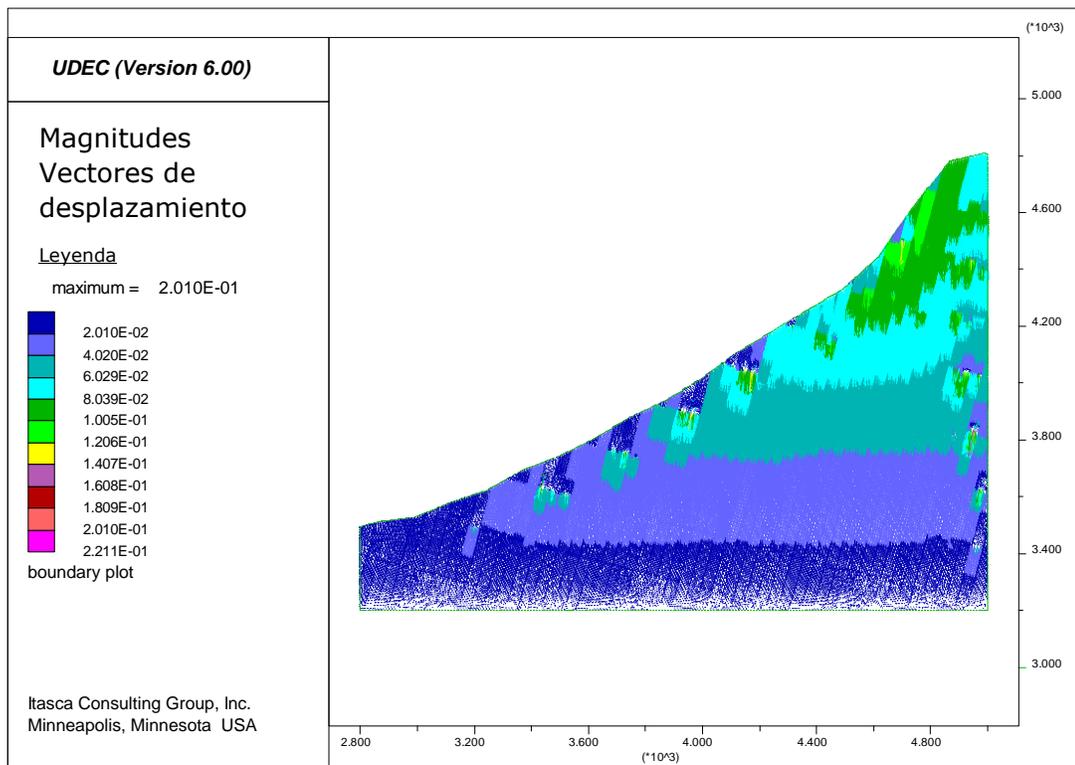


Figura 83: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.

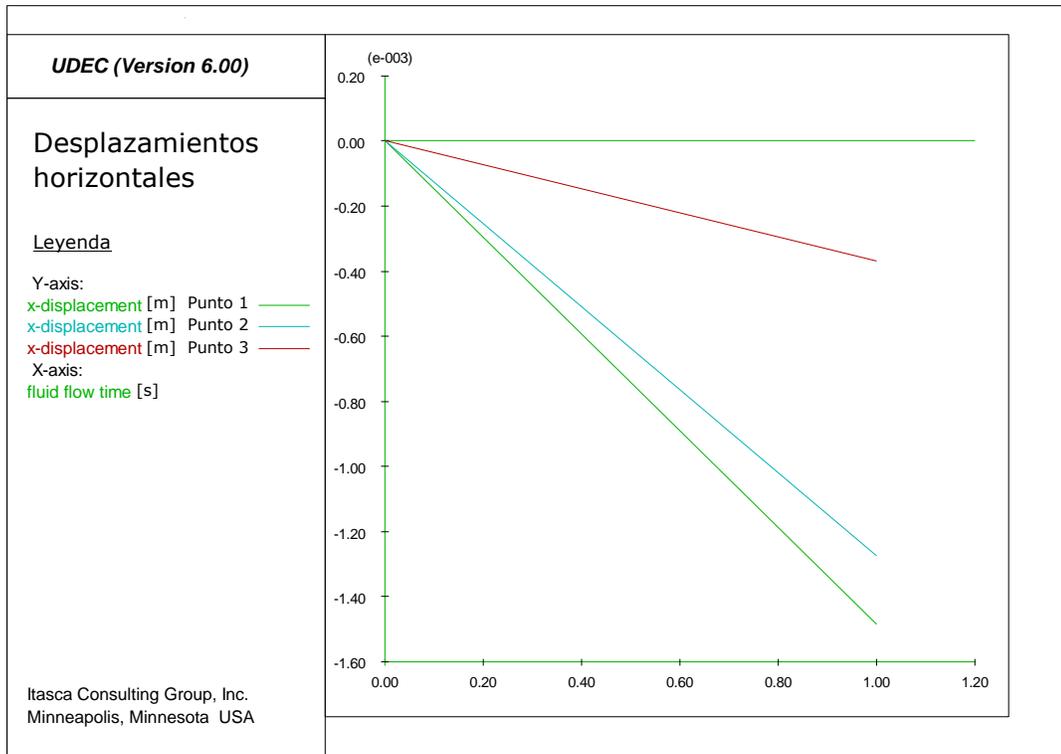


Figura 84: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.

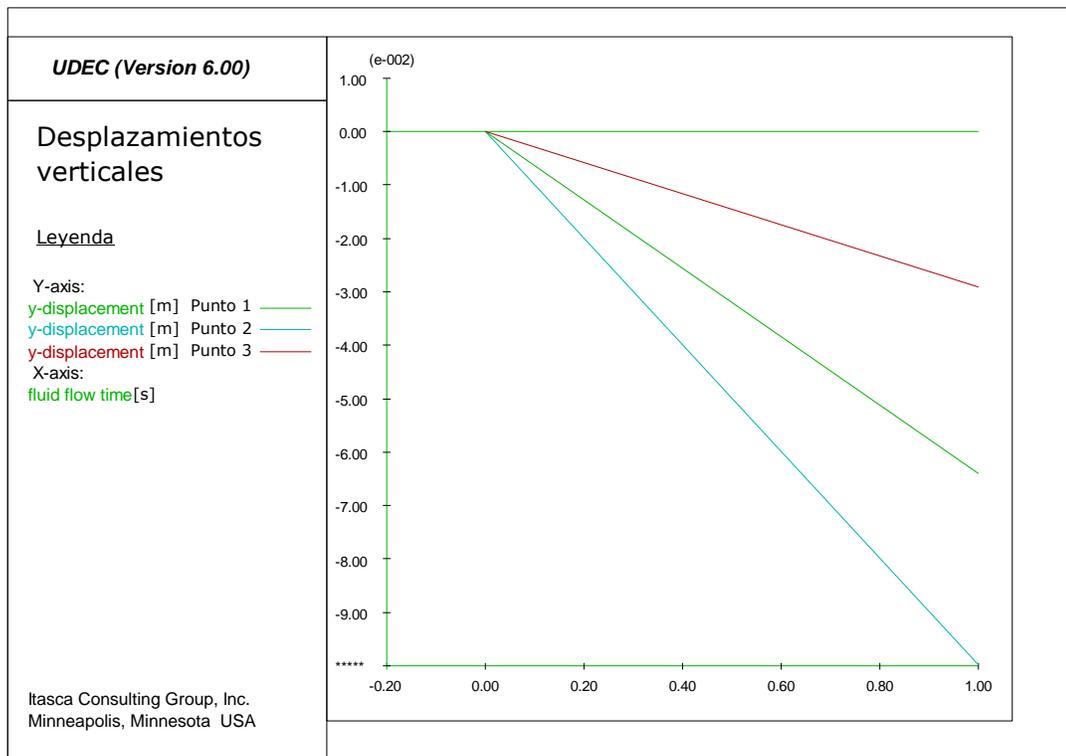


Figura 85: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.

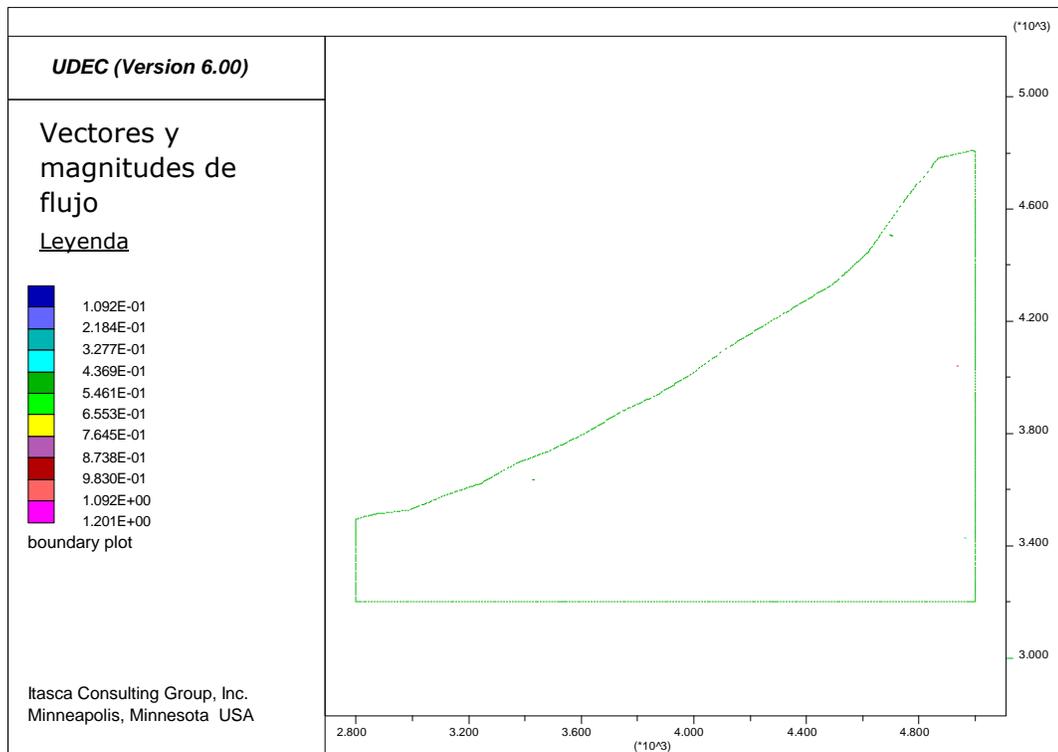


Figura 86: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.

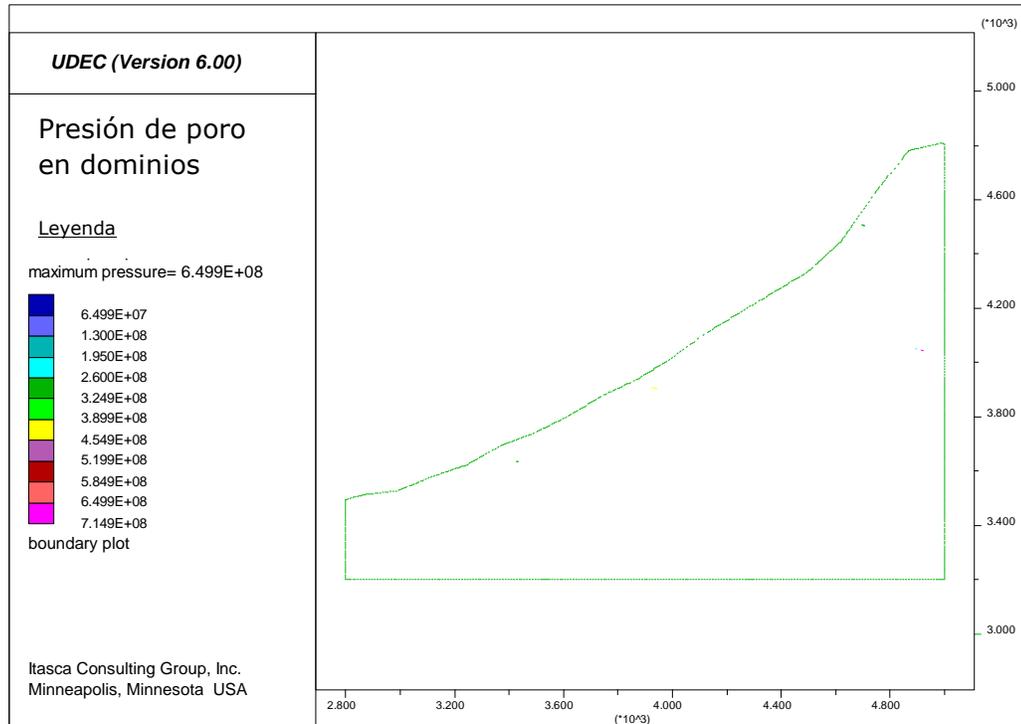


Figura 87: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.

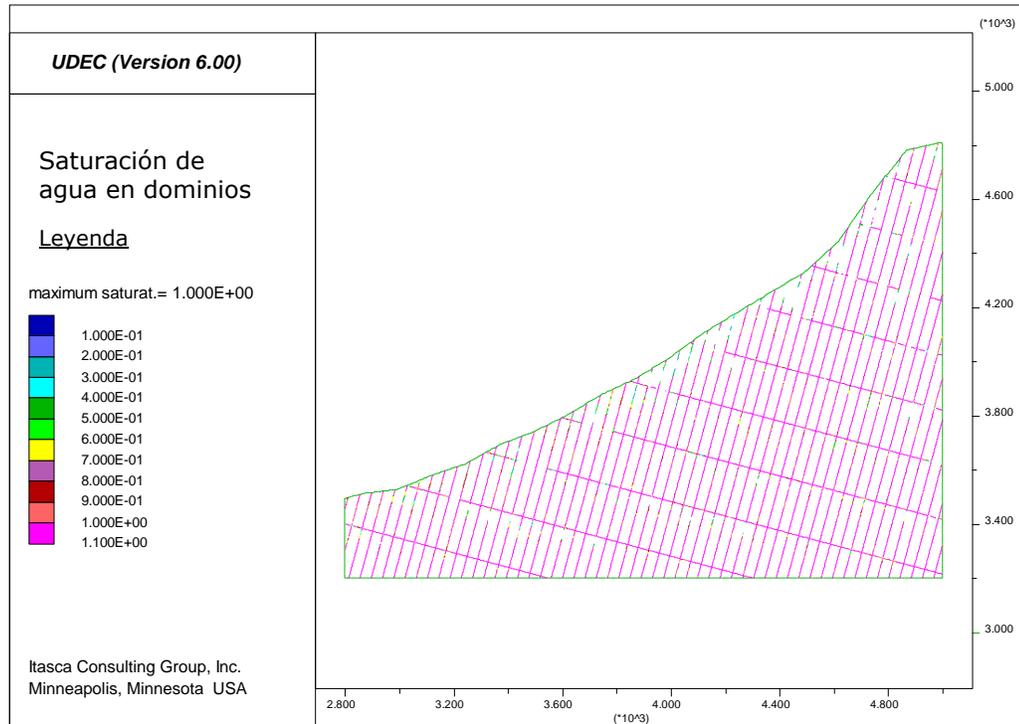


Figura 88: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 1,5 segundos.

5.2.2.4 Segundo modelo con 100% de saturación

El último modelo realizado corresponde a la misma configuración del modelo anterior, pero considerando un tiempo de simulación mayor de 10 segundos.

Los diagramas de estructuras fracturadas, cierre de estructuras y las discontinuidades en el límite de cizalle no son mostrados debido a que no se identifican diaclasas en esas condiciones.

Los desplazamientos de cizalle mostrados en la Figura 89 están distribuidos en la parte superficial del talud e irregularmente al interior, existiendo un predominio de estos en el set de discontinuidades con mayor manto. En el caso del diagrama de aberturas (Figura 90), cambia la distribución con respecto a los otros modelos. Ya no se visualizan en el sector más superficial y predominando en el set de estructuras con menor manto, sino que, son observadas en mayor medida en el otro set de estructuras y en la parte inferior de la ladera. Las últimas zonas de estructuras mencionadas se relacionan con las presiones de poro de dominios mostradas en la Figura 91, donde estas son generadas principalmente en el set de estructuras con mayor manto y también con mayor densidad en la parte inferior del modelo. Ambos comportamientos coinciden, a mayor presión (máxima $1,22 \cdot 10^9 \text{Pa}$) la estructura presenta mayor abertura (máxima 0,44m).

Los flujos ilustrados en la Figura 92 presentan una distribución irregular con mayor densidad en la parte inferior del modelo y no parecen ser continuos, es decir, se generan en ciertos dominios aislados. El diagrama de saturación de la Figura 93 también presenta un comportamiento parecido, pero en este caso, la mayoría del

modelo está completamente saturado a excepción de ciertas estructuras con distribución irregular que están subsaturadas.

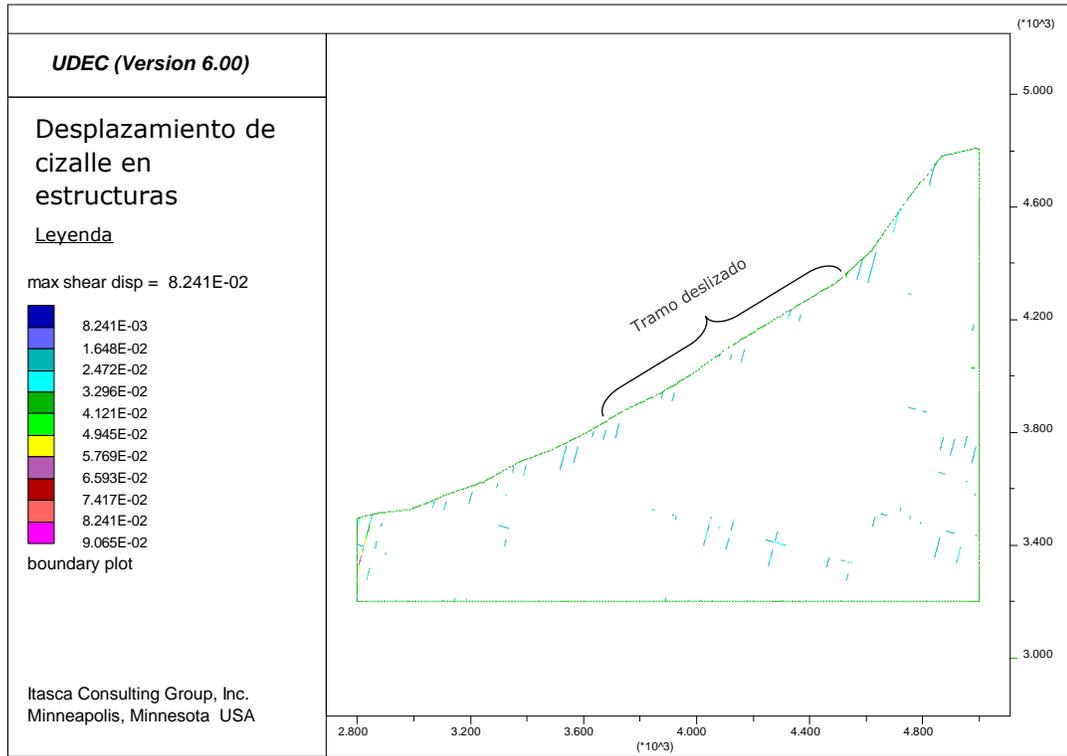


Figura 89: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.

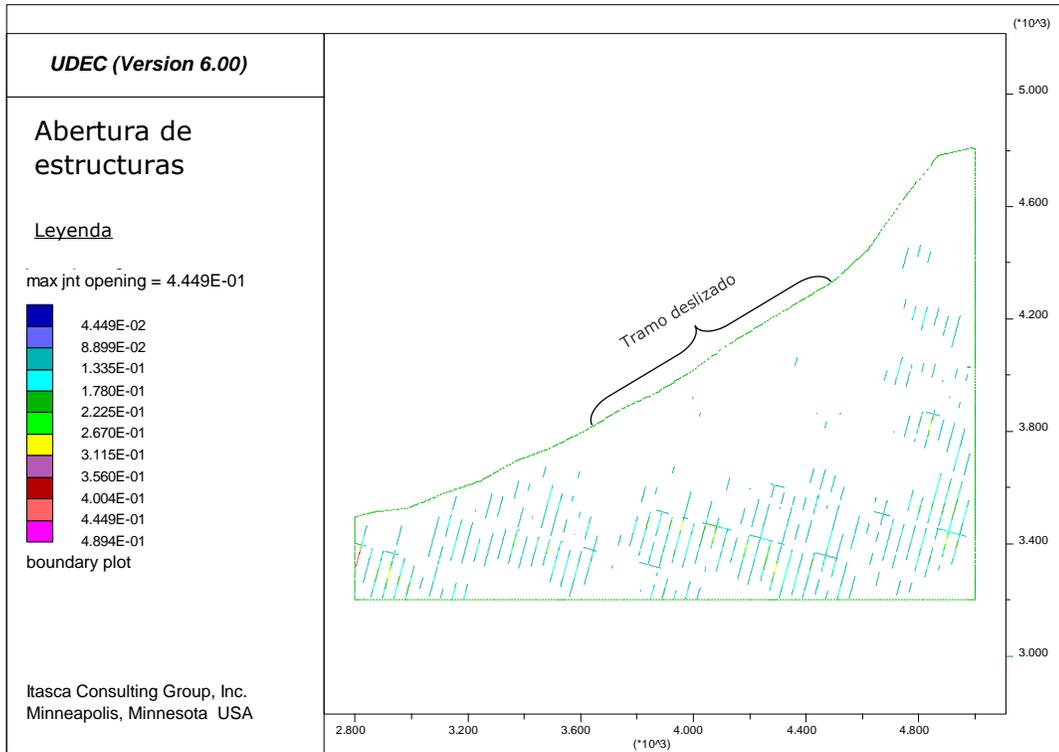


Figura 90: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.

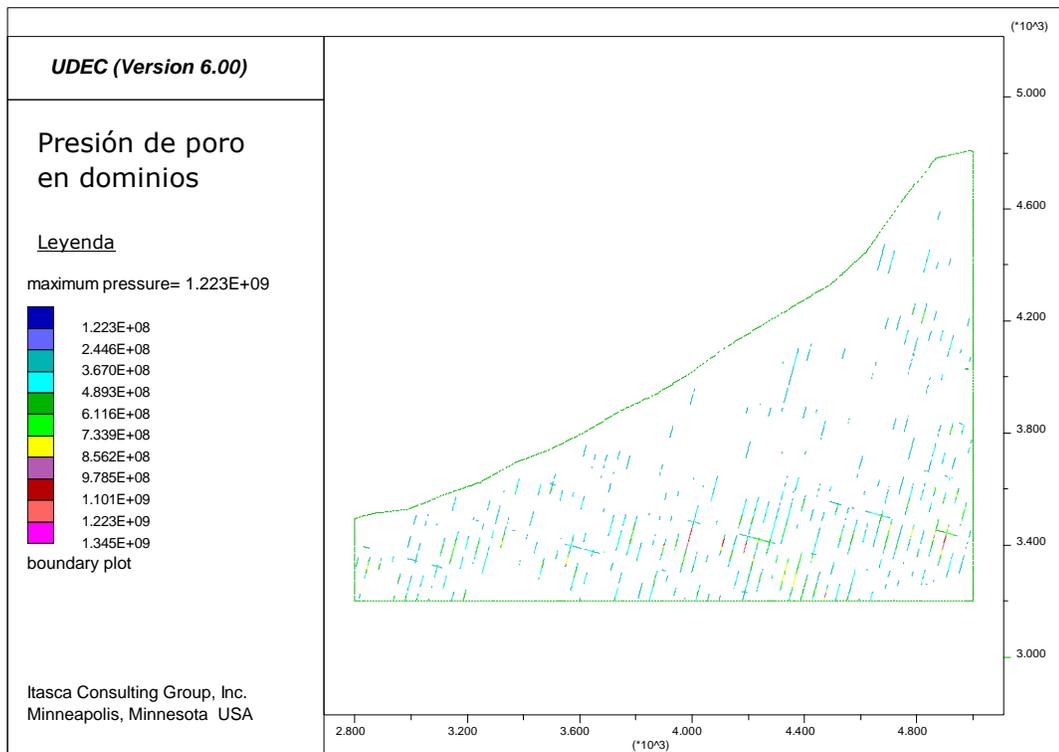


Figura 91: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.

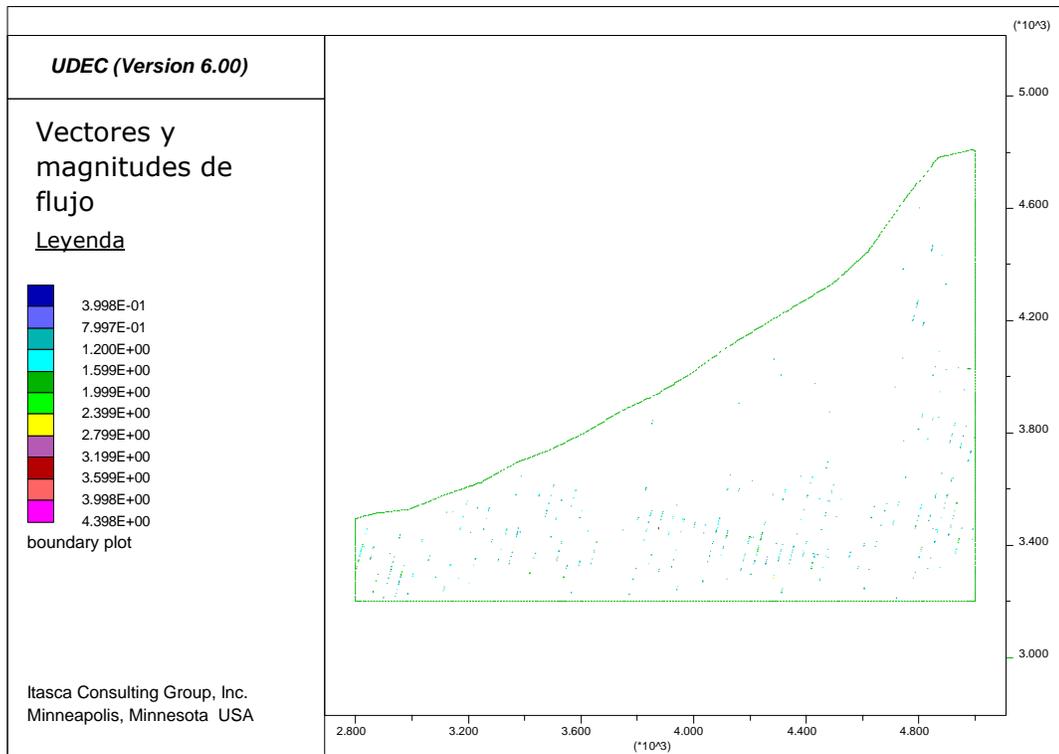


Figura 92: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.

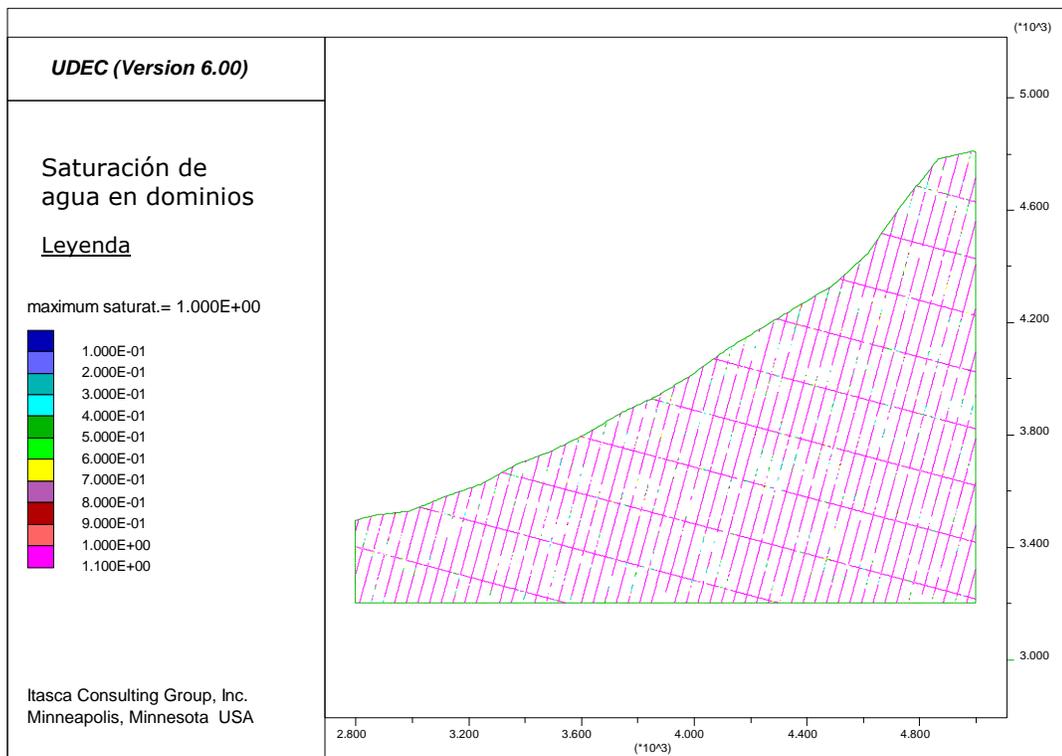


Figura 93: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.

Con respecto al comportamiento plástico visualizado en la Figura 94, se generan muchas más zonas que superan el esfuerzo de fluencia en la parte más baja de la superficie del talud, en los bordes laterales e inferior del modelo y al interior del esquema donde se observan ciertos lineamientos de estas zonas que parecen seguir la orientación del set de estructuras con menor manteo. Si se analizan y comparan estas zonas, se pueden relacionar con aquellas que presentan mayores aberturas y presiones de poro en lo dominios, es decir, las zonas que plastifican son perpendiculares a las discontinuidades que se separan y presentan mayores presiones.

La Figura 95 facilita la observación del comportamiento anterior ya que justamente esas zonas críticas son las que presentan mayores desplazamientos (en colores celestes y verdes) hacia el interior de cada bloque, es decir, de cierta forma, los bloques se contraen. Por otro lado, los desplazamientos en superficie son bajos (del orden de $10^{-2}m$), tanto en la componente horizontal (Figura 96) como en la vertical (Figura 97) y es el punto de control 2 el que presenta mayores magnitudes.

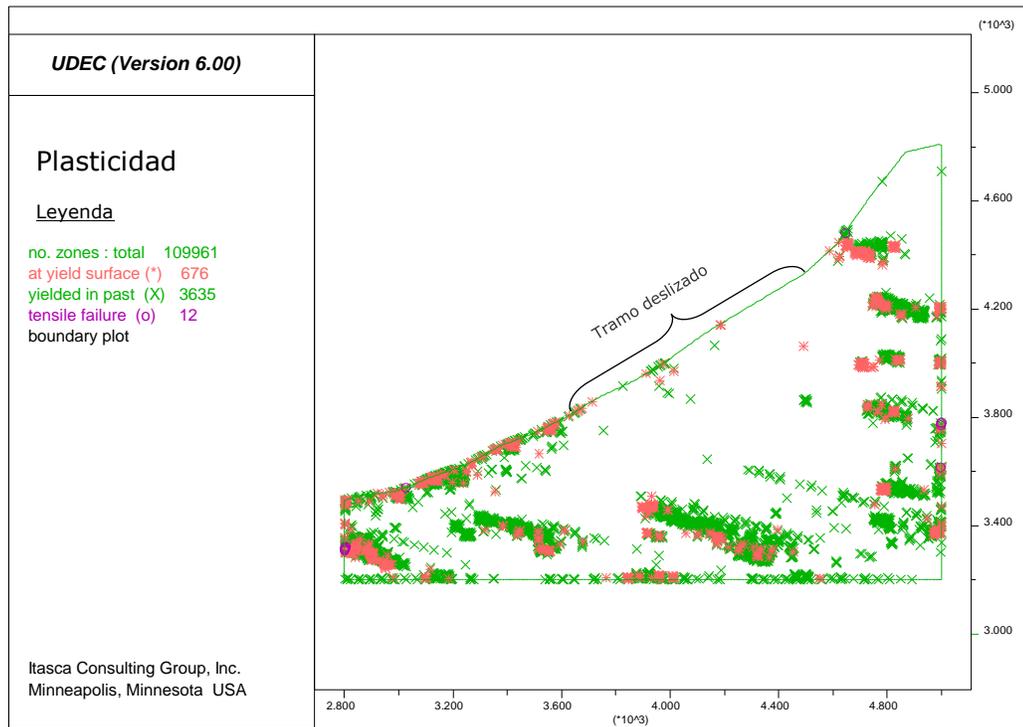


Figura 94: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos. Como referencia se muestra tramo deslizado.

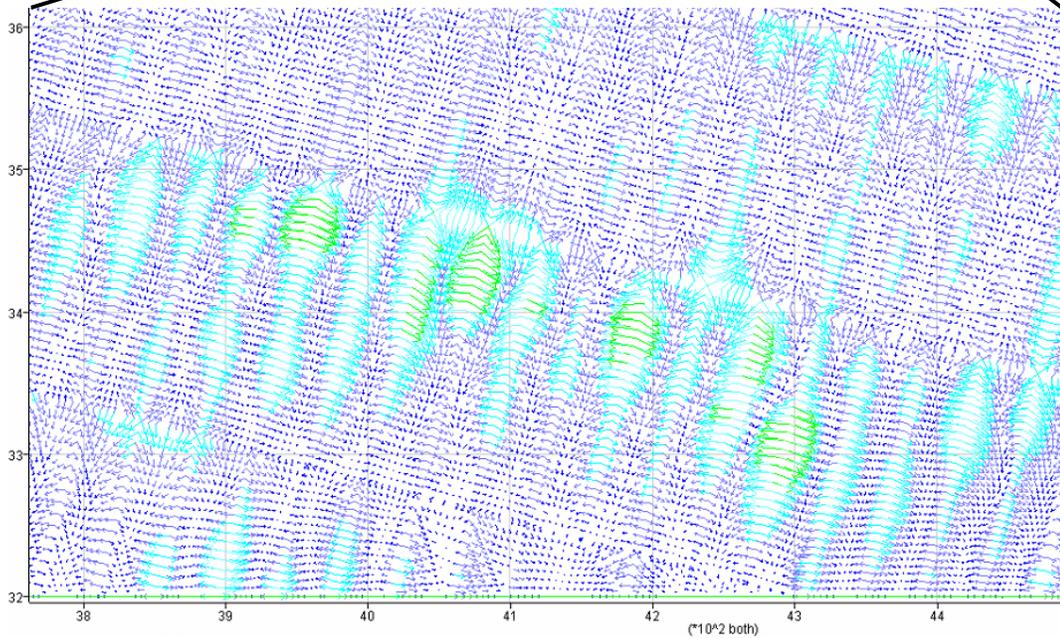
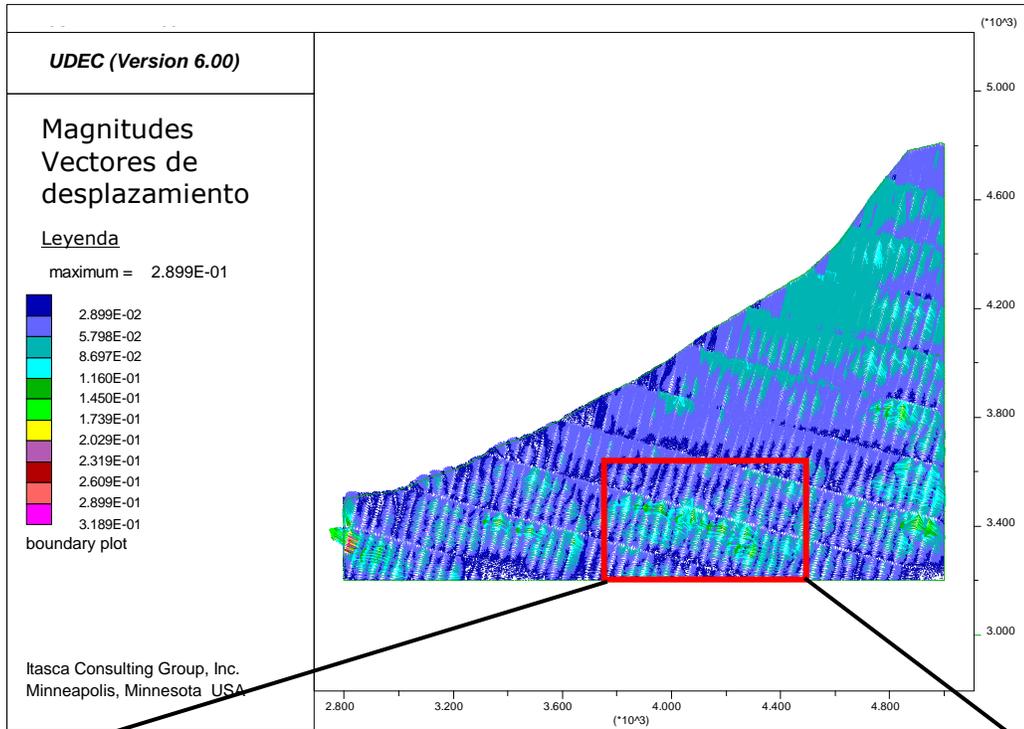


Figura 95: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos. Se muestra un acercamiento de los desplazamientos en el cuadrado rojo.

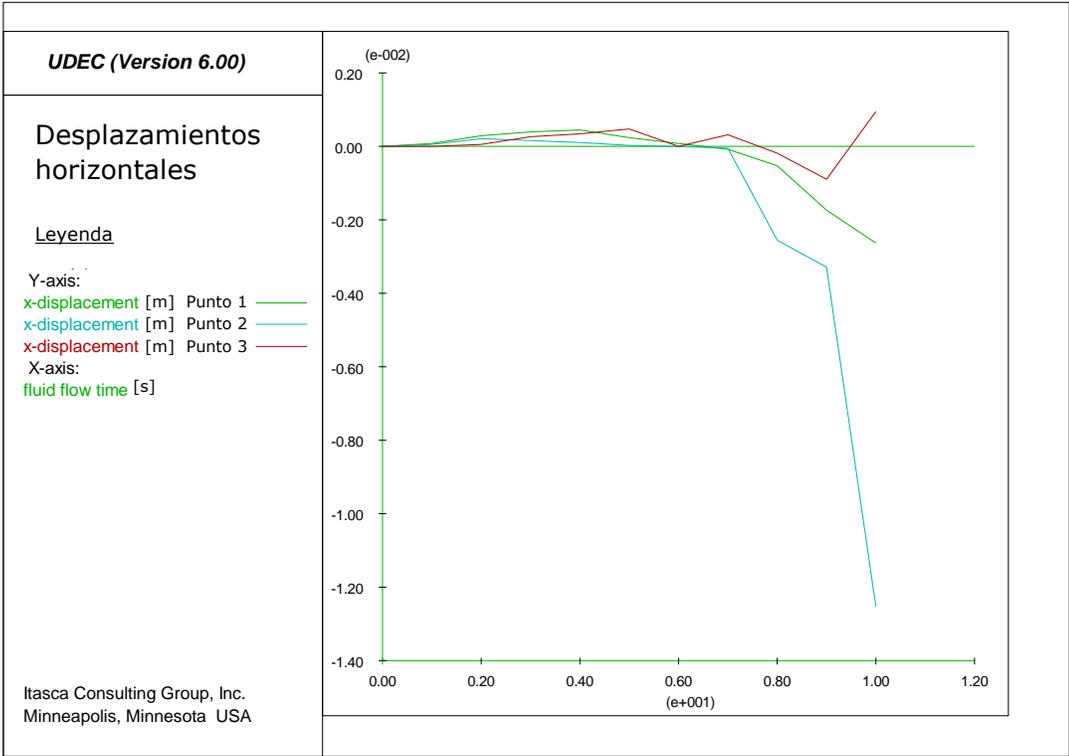


Figura 96: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.

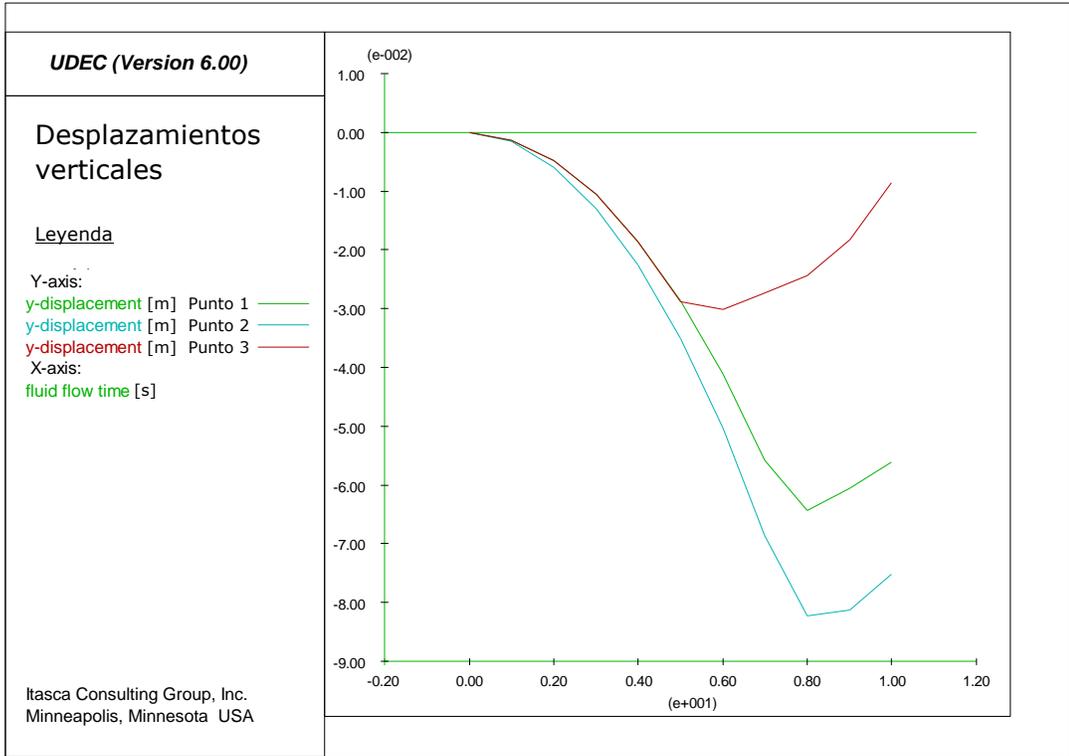


Figura 97: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación inicial 1 ejecutado durante 10 segundos.

En síntesis, se puede observar que, en general para este modo de flujo (a excepción del último modelo), el comportamiento esperado de la ladera es la generación de movimientos de estructuras en superficie ya sea de cizalle como de apertura. De esta manera, los modelos con menor saturación podrían reflejar el movimiento de bloques considerando el comportamiento en superficie de ambos sets de estructuras. Sin embargo, es difícil visualizar la mecánica del deslizamiento ocurrido, lo cual es discutido en el próximo capítulo.

Finalmente, con respecto a la generación de rupturas por la matriz rocosa, estas solo se identifican en el último modelo completamente saturado, pero con distribuciones complejas que no indican zonas muy continuas de plastificación, por lo que no se alcanzan a distinguir superficies de falla.

6. Discusiones

En este capítulo se discuten y analizan principalmente dos temáticas, la interpretación de los resultados en la sección 6.1, además de la construcción y el desarrollo del modelo dividido en las secciones 6.2 a la 6.7. Se finaliza con una breve sección de las limitaciones del *software*.

6.1 Interpretación de los resultados

6.1.1 Representación de los modelos aplicando agua

De los tres modos de flujos presentados en un principio, se considera que el más adecuado para representar las condiciones asociadas al deslizamiento es el modo de flujo transitorio de fluido incompresible debido a que, es necesario estudiar la incorporación de agua por derretimientos de nieve que conlleva tiempos más largos en el proceso y que varían también a través de este. Es así, como en este modo es posible analizar flujos de agua en el tiempo y por mayores períodos, a diferencia del flujo transitorio de fluido compresible que solo es apto para una ventana de tiempo muy pequeña (menor que segundos). En el caso del flujo estacionario, no se pueden representar flujos en el tiempo.

El modo de flujo estacionario representaría una situación en donde el agua que percola por las estructuras desde la superficie se acumula y genera un nivel freático estable, asignado por el usuario. Simbolizaría un estado en el tiempo posterior a la infiltración, donde el flujo se estabiliza. Las presiones de agua bajo el nivel freático descienden paralelamente desde la superficie hasta la base impermeable.

De esta manera, se modela un flujo de agua que proviene de los bordes laterales del perfil porque en estas zonas es impuesta una presión de poro gradual que disminuye hacia la superficie (o cotas más altas). Es la diferencia de presiones entre el borde y el interior del modelo lo que genera el flujo y progresivamente se va transportando hacia la parte central. La superficie inferior es impermeable por lo que permite la acumulación de agua dentro del modelo y a medida que se van sobresaturando los dominios el nivel freático se va elevando.

Las tasas de flujos varían de acuerdo con el estado estacionario en que se encuentre y la posición del nivel freático en cada modelo geométrico. Si las diferencias de presiones entre dominios son cero, se dejarán de producir flujos.

Por otro lado, el modo de flujo transitorio incompresible puede representar mejor el comportamiento de la ladera bajo derretimientos de nieve en superficie, ya que no es relevante alcanzar un nivel freático en equilibrio. Se introducen fluidos que pueden ser ingresados como tasas de flujo en las discontinuidades por la superficie y se analiza la distribución de presiones de agua, saturación y deslizamientos generados interiormente en distintos tiempos determinados por el usuario. En este modo además se puede variar la saturación inicial en los dominios de discontinuidades.

Es importante volver a mencionar, que en el modo de flujo estacionario no se puede representar el movimiento de fluidos en el tiempo, incluso, según Itasca (2014), el tiempo de flujo no tiene ningún significado físico en este modo, solo es relevante el tiempo mecánico. Por el contrario, en el modo transitorio solo el tiempo de flujo tiene significado físico, siendo irrelevante el tiempo mecánico.

6.1.2 Influencia del agua en la estabilidad de ladera

En el modo de flujo estacionario se observa que al generar el primer nivel freático a los 4000 m de altitud no se generan rupturas de roca intacta. Las zonas que superan el esfuerzo de fluencia ubicadas en los bordes artificiales, como lo son los bordes laterales e inferior, no son relevantes y se deberían descartar según Itasca (2014), ya que no representan una superficie real y podrían estar generando errores por esfuerzos diferenciales impuestos por la geometría. Por esta misma razón, los movimientos o comportamientos observados en estos bordes de distintas variables analizadas no se consideran completamente correctos o válidos.

En este modelo se generan movimientos de cizalle y aperturas de discontinuidades, pero no se observa que se logren producir movimientos o fallas de bloques. Además, en superficie, en la zona en que se debería producir el deslizamiento no se observan grandes cambios con respecto al caso estático, solo se identifican pocas superficies de desplazamiento de cizalle que no llegan a representar una ruptura capaz de generar la remoción.

Al elevar el nivel freático, las magnitudes de los desplazamientos de cizalle y aperturas aumentan, pero justamente cercano al borde lateral, lo cual puede ser un comportamiento erróneo dada la simplificación de las condiciones de borde impuestas. Aun así, en el comportamiento plástico no se observan zonas válidas que superen el esfuerzo de fluencia, por lo que el modelo sigue sin fallar por roca intacta.

Con respecto al tiempo de ejecución de estos modelos estacionarios, se verifica que el tiempo de flujo no tiene significado físico, ya que durante el mismo tiempo se ejecutaron dos modelos que involucran 2 volúmenes de agua completamente distintos. En este caso, son las ecuaciones mecánicas las que rigen los tiempos de los modelos.

En el modo de flujo transitorio incompresible, el comportamiento de la ladera está determinado principalmente por las propiedades y comandos de flujo que se asignen. El tiempo juega un rol fundamental en la incorporación del fluido y la generación de presiones de poro en los dominios. Además, el tiempo de paso de flujo (*fluid timestep*) pareciera determinar el avance de fluido por las estructuras en el tiempo. A bajos valores el flujo recorre poca distancia en menores tiempos antes que se produzcan errores asociados a la superposición de contactos. Por el contrario, al aumentar este valor, fue posible observar el comportamiento de saturación y generación de presión de poro por la acumulación de fluido. Por otro lado, si se modifica la rigidez normal asignando valores más altos, los modelos son capaces de ejecutarse por más tiempo. Este parámetro es fundamental en análisis de flujo por estructuras, ya que, de cierta forma, regula la cantidad de desplazamiento normal que se puede generar y por ello también regula la abertura, los flujos y presiones que se pueden instaurar.

El comando *maxmech* también influye en la ejecución ya que, si no es suficientemente alto, el programa no es capaz de realizar los pasos de relajación necesarios para mantener la continuidad del fluido. Pero, por el contrario, si el modelo no es capaz de mantener una eficiente continuidad y el valor de *maxmech* es muy alto, el comando analizará con más detalle y puede fallar la ejecución. Los modelos finalmente se realizan tratando de variar estos parámetros para observar cuando se

producen distintos comportamientos y encontrar la combinación adecuada para cada escenario.

En algunos casos fue necesario variar el tamaño de las zonas deformables, lo que permitía generar mayor avance del flujo, sin generar errores en la simulación. Esto se puede deber a que zonas más grandes implican menor cantidad de dominios y menor cantidad de ecuaciones mecánicas que resolver, por lo que el comando *maxmech* sería más eficiente y podría existir una mejor continuidad del fluido.

Otro fenómeno que considerar con respecto a los comandos de ejecución, revisado en el Anexo I, es que el comportamiento mecánico, refiriéndose a los desplazamientos de la ladera, no dependen del tiempo de flujo por paso (*dtflow*), sino que dependen solo de la cantidad de pasos que se realicen.

Con respecto a la saturación, es una variable fundamental que debiese ser conocida en la zona donde se estudia la influencia del agua, ya que, si se tienen valores altos, el tiempo en que demora el flujo en acumularse y generar presiones de poros es más corto, por lo que la ruptura o inestabilidad de la ladera podría ocasionarse antes.

Con respecto a los resultados del modo de flujo transitorio de fluido incompresible, en los primeros modelos donde no se alcanzan a generar presiones de poros en los dominios y no se observan mayores inestabilidades. Solo se generan superficialmente aperturas y desplazamientos de cizalles de las estructuras. Este comportamiento es visualizado en la mayoría de los modelos siguientes y puede ser interesante si se analiza en detalle. Considerando esta configuración, a pesar de que no se genere ruptura por roca intacta, podría ocurrir que las estructuras rompan y generen movimientos de bloques. El set de estructuras con menor manto contrario al del talud, que representa las superficies donde se producen las aperturas, puede representar la superficie que libera el bloque, mientras que las estructuras con mayor manto en la misma dirección que el manto del talud, son las que producen el deslizamiento del bloque y justamente estas son las que se indican con mayores deslizamientos de cizalle. Por lo tanto, en su conjunto, la intersección de estas estructuras podría generar desplazamientos como se muestra en la Figura 98. Además, de estos resultados se observa que el agua influye, en la mayoría de los modelos, en la parte alta del talud sobre la corona del tramo de deslizamiento y en menor medida en la parte media de la ladera coincidiendo con la zona deslizada.

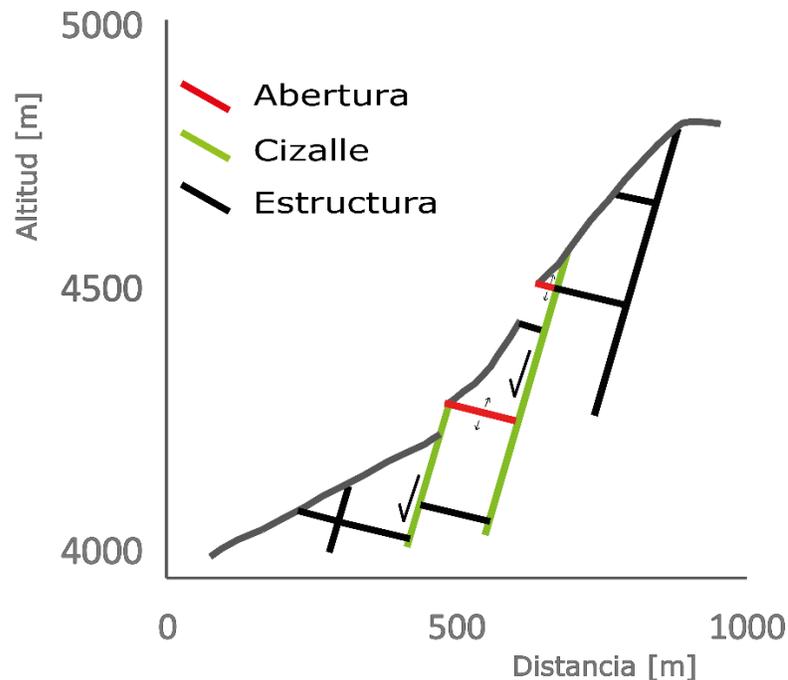


Figura 98: Diagrama esquemático del movimiento de bloques que se interpreta de los resultados de los primeros modelos del modo de flujo transitorio incompresible.

Sin embargo, de la misma Figura 98 se observa que, dada esa configuración y condición de estructuras no es posible generar una remoción y en particular un deslizamiento. Por este motivo se plantea que deben estar influyendo otras condiciones que no se están considerando y que podrían desencadenar la remoción. Por ejemplo, algún set de estructuras a favor de la pendiente de la ladera o simplemente un plano superficial en la zona que permita el deslizamiento. Hay que pensar en que la geometría fue construida a partir de trabajos antiguos (Hauser, 2002) donde existía poca instrumentación de mapeo. De la misma manera, la estimación de la ubicación de la corona y pie del deslizamiento puede ser incorrecta ya que, podría haber ocurrido en cotas más altas o bajas donde la pendiente fuese distinta (mayor). En particular en imágenes de Google Earth actualmente se observa el escarpe inferido en mayores altitudes. Si consideramos que la modificación de la pendiente de la ladera puede ser capaz de generar un mecanismo de ruptura, en el caso de que esta sea igual o mayor al manteo de la estructura a favor, es importante señalar que puede haber un error asociado a la construcción del perfil de elevación por la modificación de la pendiente del talud. Se debe considerar que, muchas veces estos procesos ocurren en zonas de condiciones locales muy particulares, como puede ser un sector con topografía muy abrupta y que también, no se ha reconstruido el modelo topográfico inicial por falta de datos.

A medida que se aumenta la saturación inicial, los modelos van generando presiones de poro antes y de mayor magnitud. En los últimos modelos la sobresaturación es tanta que se generan presiones de poro muy altas principalmente en las estructuras con mayor manteo, produciendo una contracción de los bloques en la dirección perpendicular a la estructura. En este caso sí se producen rupturas de roca intacta en esas mismas direcciones. Sin embargo, hay que considerar que este modo no representa realmente el comportamiento de compresibilidad del fluido. El volumen de flujo que ingresa tiene que ser igual al cambio de volumen del dominio,

por lo que en las partes bajas de la ladera donde existe gran acumulación de agua, las estructuras incrementan su espesor considerablemente. Para mejorar esta conducta, se podría tratar de implementar dos regiones de estructuras: una superficial y otra en profundidad, donde esta última presente las discontinuidades cerradas. Este modelo es muy inestable, produciendo rupturas tanto por roca intacta como por discontinuidades. Sin embargo, las aperturas generadas se indican como extremadamente anchas ($>10\text{cm}$) en la clasificación de ISRM (1981), lo cual no es razonable, menos aun pensando en que se producen en profundidad. Por lo tanto, este modelo no se considera realista y se descarta. A modo de visualización, se presenta a continuación en la Figura 99, un caso exagerado de saturación 100% donde transcurre más tiempo de ejecución que el modelo final mostrado en los resultados y se pueden observar las aberturas cavernosas ($>1\text{m}$) según ISRM (1981), identificadas al interior del modelo.

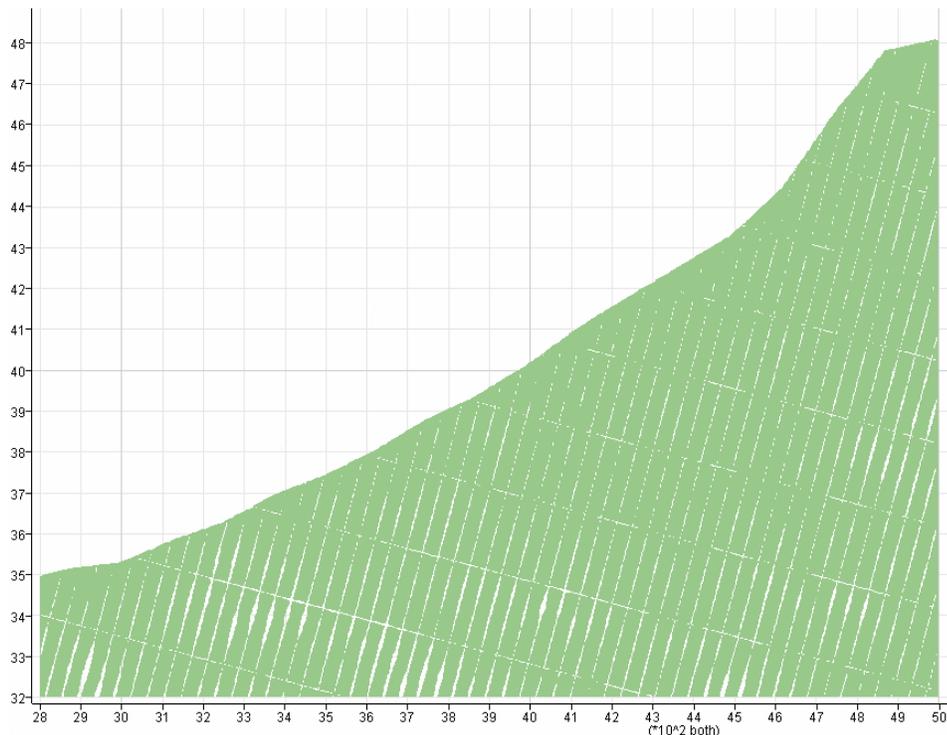


Figura 99: Modelo de bloques con saturación 100% pero con más tiempo de ejecución. Se observan las aberturas cavernosas por la gran presión de poros de estructuras que se genera.

En síntesis, se observa que bajo la influencia del agua no se producen rupturas asociadas a la roca intacta, sino más bien, se pueden producir deslizamientos de corte o aberturas en las estructuras que podrían llegar a desplazar bloques superficiales. De esta manera, ningún modelo puede reflejar directamente el comportamiento del deslizamiento descrito.

Esto también se puede considerar un error de la representatividad del modelo ya que, por los problemas computacionales, puede que no se esté llegando a un caso crítico o también, puede ser que el caso estático encontrado no sea el correcto. Es posible que la ladera sea inestable y se esté moviendo lentamente por lo que las perturbaciones terminan derrumbándola. De este modo, la validación del caso estático impide analizar laderas con ruptura de roca intacta iniciales. Lo anterior es una suposición ya que, de todas formas, el deslizamiento está registrado por ruptura

de estructuras y no por roca intacta. Es importante recalcar que el modelo generado no es el único caso estático posible, por lo que otros modelos podrían generar comportamientos distintos al incorporar el agua. Además, no se consideró que en algunos casos la existencia de puentes de roca en las discontinuidades puede estabilizar el modelo.

Otro factor que no se consideró en el análisis es la presencia de presiones de poros al interior de los bloques deformables. El agua ejerce una presión hidrostática que reduce los esfuerzos normales y reduce su resistencia al corte. En ambos casos, el agua presente en los poros o en las discontinuidades disminuye la resistencia del macizo rocoso en su conjunto.

Además, en materiales solubles como los carbonatos o el yeso, se producen procesos de disolución que dan lugar a la apertura de las discontinuidades y a la creación de nuevas cavidades o poros. En este caso, el agua que infiltra puede disolver estratos de calizas y generar más permeabilidad permitiendo mayor movilización y generar mayor presión de fluidos y, por consiguiente, disminuir el estrés efectivo σ' , el cual controla la resistencia y la deformación del material. UDEC dispone de un parámetro denominado *zone_pp*, que permite asignar una presión de poro dentro de los bloques para poder restarla a los esfuerzos normales y calcular esfuerzo efectivo. Sin embargo, dado que se desconoce el valor de esta presión para el caso de estudio, no se considera finalmente en el análisis.

6.2 Geometría del modelo

La geometría del modelo de bloques está definida por la topografía de la ladera, su extensión y la disposición de estructuras reconocidas que son aplicadas en la simulación. Es necesario analizar por partes el levantamiento de información y modelamiento de estos parámetros.

6.2.1 Topografía de la ladera

El levantamiento de datos topográficos se realiza a través de un Modelo de Elevación Digital que cuenta con una resolución moderada. En un análisis de modelamiento numérico se espera contar con datos de alta resolución que representen lo mejor posible la realidad para que la simulación personifique los procesos evidenciados.

Al no contar con un perfil de elevación de la zona anterior a la remoción, se debe hacer una reconstrucción tratando de representar el momento previo con datos que si se tengan. Es complejo representar las características topográficas antes del deslizamiento sin tener un DEM antiguo, más aún cuando la geomorfología de la zona es variable y las dimensiones del suceso son tan grandes. Además, la geología no está bien definida a una escala local y parece no ser continua de norte a sur, existen intrusivos y aparecen valles erosionando lo que genera más incertidumbre y problematiza la elección de un perfil representativo. Los 6 perfiles de elevación se construyeron con el objetivo de observar la diferencia de geometría entre el lugar de la remoción y las zonas colindantes, para escoger un perfil que podría representar el momento previo. Sin embargo, la gran diferencia dificulta esta selección.

Por lo anterior se ocupa el volumen para escoger el perfil. Asumiendo un volumen de $6 \cdot 10^6 \text{m}^3$ y un ancho constante de deslizamiento de 500m se genera un

área en perfil de 12000m^2 de remoción. Si consideramos este valor y que la longitud del deslizamiento es de 1000m (Hauser, 2002), el espesor del deslizamiento sería de $14,14\text{m}$ asumiendo una continuidad de relieve en profundidad. A la escala de trabajo, esta altura es muy pequeña y el perfil de elevación actual no difiere mucho del anterior a la remoción. Se escoge el perfil 2, correspondiente al perfil que bordea el escarpe por la parte norte, para cambiar los datos topográficos del perfil 3 en las cotas del deslizamiento (tramo deslizado), ya que difiere en menor medida (el área entre ellos es menor como se observa en la Figura 10), asignándole un volumen de deslizamiento de $12 \cdot 10^6\text{m}^3$, el doble que el original. Los perfiles restantes varían aún más en topografía con respecto al perfil 3, por lo que generaría un volumen mucho mayor. Este proceso acarrea un error, ya que se asume que la superficie del perfil 3 se genera inmediatamente luego del suceso, lo cual puede ser incorrecto, pudiendo haber ocurrido posteriormente desprendimientos y otras remociones de menor magnitud o bien los efectos de la erosión y meteorización pueden cambiar el relieve. Lo anterior puede implicar una subestimación de las altitudes en el perfil de elevación final.

En definitiva, el perfil reconstruido no presenta gran exactitud, ya que se necesitan muchos supuestos que tienen un error asociado (muchas veces no cuantificable). Sin embargo, dado el enfoque de este trabajo, la geometría del perfil en detalle en este caso no es relevante al momento del análisis, por la simplificación de resolución antes mencionada y porque principalmente se quiere estudiar cómo simular y de qué manera afecta el agua en la estabilidad de laderas.

6.2.2 Estructuras del macizo rocoso

Las estructuras y su distribución definen la cantidad de bloques y forma en la que se divide el modelo y, por lo tanto, definen las superficies que se pueden separar y desprender al ejecutar una simulación.

La distribución de estructuras es local y depende de cada macizo rocoso y de la zona que se esté analizando. Para obtenerlas se debería ir a terreno y realizar un mapeo detallado o una observación de imágenes para luego hacer un análisis de las orientaciones preferentes. Como en este caso no se hizo trabajo en terreno y no hay imágenes de buena resolución, las orientaciones de las estructuras locales fueron extraídas de bibliografía. Se indica que la remoción se produjo por un plano de estratificación de caliza, por lo que se generaliza que otros planos de estratificación también podrían representar una estructura. No se encuentra información detallada de la ubicación y espaciamiento de estas, por lo que son generadas en el programa de forma paralela con espaciamiento constante tratando de ubicar una estructura en la cabecera del deslizamiento en la cota superior, como se observa en la Figura 7. Con respecto al espaciamiento, se definen los mínimos de 40m , 195m y 50m , probando distintas magnitudes hasta que el programa lo acepta y considerando que el tiempo de ejecución del programa no sea tan elevado.

No se registran estructuras regionales mayores en la zona del deslizamiento, sin embargo, dado que toda esta región está siendo afectada por el desarrollo de la faja plegada y corrida del Aconcagua, se podrían estar descartando estructuras que no han sido observadas por el bajo reconocimiento y mapeo en la zona. En el trabajo de Castro (2012), se definen una serie de fallas un poco más al sur de la zona de estudio, específicamente en la intersección con el valle del Río Colorado. La Falla

Tambillos se traza con flexión inferida por medio del Estero Parraguirre repitiendo las secuencias de la Formación Lo Valdés. Sin embargo, no se observa la continuidad de esta hacia el norte y considerando la ubicación, en nuestro perfil de estudio se observaría en las cotas más bajas, pudiendo no influir directamente en la generación del deslizamiento.

Todas estas consideraciones disminuyen la representatividad del modelo.

6.3 Selección de modelo constitutivo y obtención de parámetros

Los modelos constitutivos corresponden a ecuaciones constitutivas que dependen de cada material y que relacionan los esfuerzos con las deformaciones para finalmente determinar los criterios de falla. Se definen de acuerdo con parámetros que representan las propiedades de las rocas, los cuales son fundamentales para caracterizar y simular una respuesta realista de los procesos desarrollados. Un modelamiento numérico puede generar infinitos resultados que cumplan con las ecuaciones definidas, pero son las condiciones y los parámetros ingresados los que finalmente restringen un resultado apropiado.

Los parámetros utilizados en los modelos constitutivos de bloques fueron extraídos de bibliografía que dispone de rangos de valores para cada propiedad que, muchas veces son muy amplios. Los valores considerados pueden no ajustarse al problema y se podría generar baja representatividad de la realidad. En casos como este donde no se tiene información clara de los parámetros, es muy útil realizar análisis de sensibilidad para ir variando los valores y observar el comportamiento en las distintas simulaciones. Por ejemplo, en el caso estático con el criterio de Hoek-Brown se probó estabilizar el talud aumentando el valor del GSI que es uno de los parámetros más conocido y fácil de modificar. Se comprobó que con valores GSI de 80, 90 o superior, el modelo se estabilizaba, pero eran rangos muy altos que se cree que no coinciden con la calidad geotécnica del caso de estudio. Como la utilización y variación de los parámetros más intuitivos no logra generar un modelo válido, se opta por cambiar el modelo constitutivo a uno más simple en términos de resistencia (Mohr-Coulomb). Es interesante rescatar que no solo basta con considerar combinaciones de datos aleatorios, porque incluso con valores razonables de GSI para roca de buena calidad, el modelo no se estabiliza con Hoek-Brown.

Para análisis de macizos rocosos se suele utilizar el criterio de ruptura de Hoek-Brown por sobre el de Mohr-Coulomb, ya que representa mejor la envolvente de ruptura y las propiedades de resistencia de la roca. De acuerdo con esto, el comportamiento del talud de estudio se debería simular mejor con el primer criterio. Sin embargo, de la validación del caso de estático (sección 4.5) se observa que ambos criterios tienen un comportamiento parecido bajo las mismas condiciones aplicadas al modelo (mala calidad). Además, el criterio de Mohr-Coulomb tiende a ser más eficiente en términos de tiempo de cálculos y de memoria (Itasca, 2014).

Con respecto a las discontinuidades, se escoge el modelo de Mohr-Coulomb para modelar su resistencia, ya que es el más fácil de utilizar por los parámetros requeridos y porque es implementado en varios ejemplos estudiados en Itasca (2014). Este criterio puede ser incorrecto al simular el comportamiento real en superficies discontinuas, ya que la geometría de estas ejerce un rol importante en la resistencia al corte de las estructuras (Vejar, 2016). Según Bandis et al. (1983), bajo niveles de esfuerzo normal bajos, la rugosidad de la discontinuidad y la resistencia de

las asperezas a lo largo de esta, afectan significativamente su resistencia. En este caso el criterio de Barton-Bandis representa mejor el comportamiento de las discontinuidades con superficies discontinuas, pero se necesitan definir una serie de parámetros que no son directamente estimables. Es por ello, que en este estudio se trabaja con Mohr-Coulomb para evitar adoptar valores que involucren un alto grado de subjetividad y que son desconocidos en el área estudiada.

Para aplicar el criterio a las estructuras es necesario definir, además, los valores de rigidez normal y tangencial que también son difíciles de estimar sin realizar los ensayos correspondientes. Estos representan características locales, que están escasamente registradas por litología y en la bibliografía se indican en un amplio rango. Además, en los análisis realizados por Vejar (2016) se indica que el desplazamiento de la remoción es muy sensible a los parámetros que caracterizan las discontinuidades, principalmente a la fricción interna y a la rigidez normal. Los parámetros de aberturas de las estructuras son desconocidos y también son necesarios para implementar el criterio cuando se aplica el agua en el modelo.

Debido a todas las consideraciones anteriores, se plantea que es muy relevante para estudios de modelamiento numérico la obtención de parámetros en terreno y el posterior análisis de ensayos de laboratorio para determinar estos parámetros de forma más exacta y poder realizar un modelamiento que represente mejor la realidad. Como el objetivo principal de este estudio no es interpretar el deslizamiento sino aplicar herramientas que permitan simular la incorporación de agua en los modelos, se trata de estimar los valores de la mejor manera posible con los datos disponibles.

6.4 Influencia de la red de zonas deformables.

Cuando se modelan bloques deformables, cada uno se divide en zonas triangulares que son establecidas irregularmente definiendo un largo máximo de borde para la zona. El concepto irregular se refiere a que, si el bloque no es completamente simétrico, la división de zonas tampoco lo será y se acomodará aleatoriamente cumpliendo con la restricción del borde máximo. Cada vértice de malla (*gridpoint*) puede ser utilizado para asignar valores de condiciones de inicialización (*in situ*) o de borde y en estos puntos se calculan las ecuaciones mecánicas definidas por el programa que entregan el comportamiento de la simulación.

Al generar la malla o red de zonas deformables, se puede diferenciar el largo máximo de borde por bloque. Para que el modelo presente una buena precisión el mallado debe ser pequeño con respecto al tamaño del modelo con que se trabaja, para discretizar mejor las zonas y representar mejor la deformación de los bloques. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, al definir zonas más pequeñas, el tiempo de cálculo aumenta considerablemente ya que son más ecuaciones mecánicas y de flujo que deben ejecutar por cada ciclo.

En este trabajo, se utiliza un mallado de 10m de largo máximo para toda la extensión del modelo de modo que el tiempo de computo no sea muy elevado y que, a la vez, permitiera una buena precisión. Los tiempos de compilación van desde 2 a 8 horas, dependiendo de la escala y si es un análisis mecánico, de flujo o ambos. Si se quisiera representar con más detalle la red de zonas, se requiere, idealmente, de un computador de mayor capacidad. Los 10m seleccionados se consideran un valor alto, suponiendo que un bloque de 10m³ es grande comparado con el tamaño de una persona, es capaz de deformarse y puede ser afectado por muchas fuerzas no solo

en escasos puntos de su superficie. Sin embargo, este valor es pequeño comparado con el tamaño inicial del modelo, por lo que un valor menor, generaría tiempos mucho más elevados de cómputo. Además, se considera que un valor más grande no sería correcto de implementar por el tamaño de la remoción, estimada en 20m de altura en la parte superior y 14,14 m de altura suponiendo espesor constante. Si el largo máximo fuera mayor, la remoción se representaría solo por algunos bloques rígidos, lo cual no tendría sentido y el modelamiento sería de muy baja exactitud.

Con respecto al mallado irregular, se pueden generar zonas extrañas de tensiones que provocan diferencias de esfuerzo en los bordes, lo cual genera puntos contiguos que superan el esfuerzo de fluencia y que representan superficies de falla. Esto se observa en los modelos realizados para seleccionar el caso estático. Como la geometría y tamaño de los modelos se va modificando, la red de zonas también cambia y las superficies generadas varían. Para evitar esta situación, se podría intentar dividir los bloques de la manera más simétrica posible para generar el mallado y luego unirlos.

6.5 Influencia del tamaño del modelo

El tamaño del modelo numérico debe ser acorde al tamaño de la zona de interés, dependiendo de la magnitud de la remoción simulada, que en este estudio es del orden 10^3m , ya que el detalle de la representación de la ladera afecta notablemente en los tiempos de compilación como se mencionó anteriormente.

Si se tiene un modelo de gran tamaño ($>10^3\text{m}$) y se quiere simular zonas deformables amplias sin discontinuidades, hay que tener en consideración que una topografía de alta resolución no puede ser modelada. La restricción de baja cantidad de vértices por bloque (*corners*), impide que se genere el mallado en estas amplias zonas que representan un solo bloque. La discretización de zonas deformables es menos permitida más aun cuando el largo máximo de borde es menor (zonas muy pequeñas).

Por otro lado, un modelo de menor tamaño, por ejemplo, del orden de 10m, tampoco podrá simular una topografía de alta resolución, debido a la restricción del programa de generar vértices muy cercanos, pero se puede generar un mallado más pequeño sin presentar tiempos de cálculos excesivos.

En resumen, un modelo pequeño puede presentar una red de zonas deformables más pequeña en comparación con el modelo de gran tamaño, pero no puede simular topografías de alta resolución que una ejecución de grandes dimensiones puede y no puede hacer, dependiendo del tamaño de bloques y generación de estructuras.

Con respecto al comportamiento de estabilidad y resistencia, el tamaño influye notablemente. Se prueba reduciendo la misma geometría del modelo inicial con el criterio de Hoek-Brown en 2 órdenes de magnitud y de la misma forma se disminuye el tamaño de malla de zonas deformables. Es decir, para el modelo de menor tamaño, el largo máximo de borde de zonas es de 0,1m. Para realizar este ejercicio es necesario reducir la resolución de la topografía considerablemente. El nuevo esquema se muestra en la Figura 100.

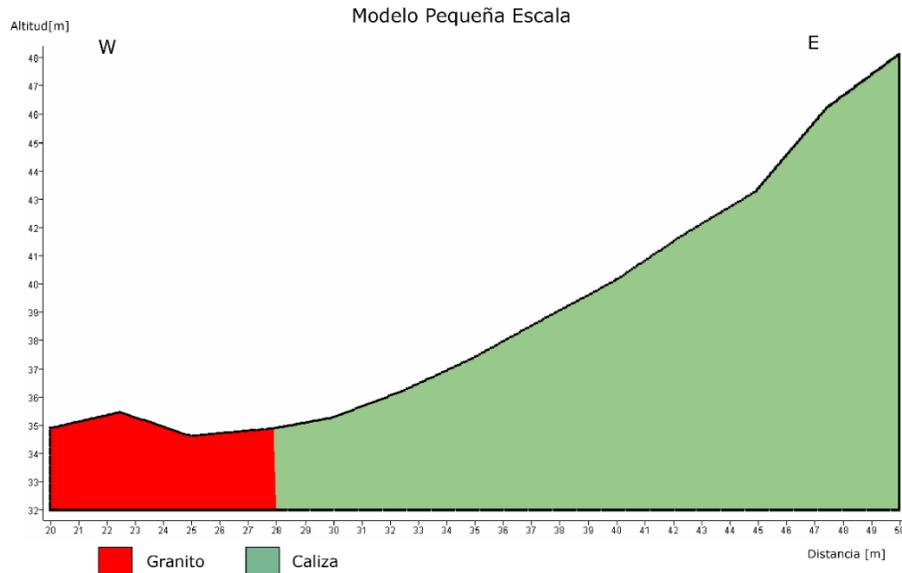


Figura 100: Modelo con tamaño reducido. Se observa la baja resolución de la topografía.

Si se analizan los desplazamientos, la energía en desequilibrio y la plasticidad, se observa que representan un estado estático. Los desplazamientos se estabilizan, las fuerzas desbalanceadas disminuyen y convergen a $1,2 \cdot 10^{-4}$, mientras que no se observan zonas que superan el esfuerzo de fluencia (figuras en Anexo F). Estos resultados difieren del modelo de mayor tamaño en el cual, bajo el criterio de Hoek-Brown, sí se produce una inestabilidad y plastificación.

La razón de esta conducta se atribuye a que la altura influye en la presión ejercida bajo los efectos de la gravedad y genera esfuerzos de corte de mayor magnitud a grandes tamaños. Como se menciona en Pozo (2014), en laderas de poca altura las discontinuidades influyen más que las propiedades de la roca intacta en la resistencia. En este caso, son comunes las roturas planas y la formación de cuñas. Por el contrario, en taludes de gran altura, se pueden producir roturas globales por corte a través de los bloques de roca intacta debido a los esfuerzos de corte actuantes de gran magnitud. En este caso, el espaciamiento y la persistencia de las discontinuidades pueden llegar a ser muy pequeños con respecto a la altura del talud; por lo tanto, el macizo rocoso se comportaría como un medio continuo.

6.6 Condiciones de borde

Las condiciones de borde son utilizadas para mantener la continuidad espacial y geológica del modelo en las superficies de los bordes con el objetivo de que la ausencia de material no genere diferencias significativas de los parámetros y comportamientos adentro y en el borde del modelo. Por lo anterior, se recomienda que la representación sea de mayor tamaño que la zona de interés o deslizamiento para que no sea afectado por esta condición.

En el modelo estático se definen solo parámetros de velocidad cero en los bordes laterales e inferior debido a que la mayoría de los ejemplos estudiados se delimitan de esta forma y porque no se tiene otros parámetros para implementar. De esta forma, el modelo no cae por efectos de gravedad y tampoco desliza hacia los lados por ausencia de material. Se considera que esta condición puede ser insuficiente

para mantener la continuidad, ya que, en los bordes, la presión de confinamiento es distribuida de distinta manera comparada con el centro, lo que puede generar una disminución de la resistencia. Este mismo efecto sucede en general en superficie, donde se pueden generar y observar diaclasas que no se proyectan a grandes profundidades. Para corregir esta variación, se puede intentar asignar esfuerzos en las distintas direcciones, dependiendo del borde, analizando los esfuerzos que se generan en esos puntos en un modelo más extenso.

Como ya se había mencionado anteriormente, al cambiar la geometría del modelo, ya sea aumentándola o disminuyéndola, el programa cambia los comportamientos de resistencia y estabilidad, a pesar de que no se modifiquen los parámetros de materiales y estructuras. La causa se puede atribuir a la diferencia del mallado, que ya fue explicada, o a que las condiciones de borde cambian. Si se extiende el modelo, las zonas de los extremos en el modelo antiguo ya no serán afectadas por la ausencia de material en la nueva configuración. Ejemplos analizados para estudiar estos efectos son ilustrados en el Anexo C.

En el caso de la incorporación del agua, es necesario definir nuevas condiciones de borde que pueden ser superficies impermeables o presiones de poro ya que predeterminadamente todas las superficies son permeables. Las condiciones de borde son fundamentales para alcanzar un nivel freático dado y poder llegar a un equilibrio en el estado estacionario de flujo. En un principio, esta condición no es reconocida en el programa por lo que no se ejecutan flujos dentro del modelo. Al probar sacando el intrusivo se concluye que probablemente la condición impuesta en el borde oeste del esquema no está siendo ejecutada porque dentro de este no se pueden generar flujos (por falta de estructuras internas), por lo tanto, actúa como una barrera impermeable donde las presiones de poro solo pueden ser nulas. En este caso, no importa qué tan extensa es la ladera porque el nivel freático va a estar posicionado en el mismo lugar bajo la superficie, por lo que las presiones de poro se mantendrán y solo se generarán flujos en la parte superficial bajo el nivel dado.

Para el caso de flujo transitorio se considera que sí son influyentes las condiciones de borde y la extensión del modelo que podría cambiar estas condiciones. Por una parte, no se conoce si hay un nivel freático ni su posición, tampoco es conocida la saturación inicial por lo que, dependiendo de estos factores, es la profundidad y el alcance que tendrá cierto flujo en el tiempo y, por ende, las presiones de poro que se podrían generar. Las superficies impermeables implementadas de cierta forma cumplen la función de frenar el flujo y comenzar a saturar las estructuras. Es importante añadir que en este modo sí es posible ejecutar los modelos con la presencia del intrusivo, pero se descarta para tener una misma geometría en ambos modos. Además, los resultados en ambos casos muestran un comportamiento similar, solo con la diferencia de que, con la presencia del intrusivo, los modelos son capaces de ejecutarse por más tiempo antes de que se produzcan los errores de superposición de contactos. Se cree que, de cierta forma, el intrusivo en una masa rígida que genera mayor resistencia y al estar posicionado en la base del talud, puede frenar los movimientos de la ladera evitando o disminuyendo los desplazamientos de los bloques.

6.7 Validación del modelo estático

Debido a que no se poseen valores directos de las propiedades de resistencia de la zona, y sabiendo que el tipo de roca utilizada (caliza) presenta baja resistencia en la bibliografía y que el tamaño de trabajo es grande, se esperaba tener que variar y evaluar el comportamiento de los parámetros para alcanzar un caso estático.

La validación del modelo estático consiste en generar un estado de equilibrio para el esquema propuesto, de tal manera que, en condiciones estáticas (solo bajo la influencia de gravedad) sea estable, pero que se desestabilice al incorporar el agua. Los parámetros son modificados aumentando la resistencia hasta que el modelo no falle, alcanzando el equilibrio límite y siempre restringiéndose a valores dentro del rango estipulado en bibliografías. Finalmente, se opta por analizar un modelo simplificado, estudiando de forma más local la ladera, centrado directamente en la zona del talud asociada al deslizamiento. De esta forma, se reducen notoriamente los tiempos de cómputo y es posible implementar las condiciones de borde en todos los modos (al extraer el sector del intrusivo).

El criterio de estabilidad utilizado como ya se ha mencionado, se basa en el análisis de la razón de las fuerzas en desequilibrio, los desplazamientos de puntos de control en superficie y el comportamiento plástico. Es necesario examinar todos los criterios juntos, poniendo especial atención a la plasticidad, ya que se pudo observar casos en que los desplazamientos o energía sí indicaban un caso estático, pero se superaba el esfuerzo de fluencia dentro del modelo, evidenciando inestabilidad. Los desplazamientos por sí solos no pueden justificar estabilidad en todo el modelo, ya que son puntos aislados de la superficie, pero sí podrían ser utilizados para argumentar que la zona de remoción es estable y poner énfasis en el análisis de esa área. Con respecto a la energía, ningún modelo alcanzó la estabilización teórica de $1 \cdot 10^{-5}$ N por lo que, siguiendo las indicaciones de Itasca (2014), se acepta un caso estático cuando la fuerza máxima desequilibrada es pequeña en comparación con las fuerzas representativas del problema, en particular cuando corresponden a un 0,01% es considerado en equilibrio. Además, hay que tener en cuenta que lo anterior solo demuestra que la fuerza se equilibra en todos los *gridpoints*, sin embargo, puede ocurrir flujo plástico constante, sin aceleración.

No existe mayor diferencia en la estabilidad entre los casos estáticos con y sin estructuras, incluso pareciera que las estructuras tienden a estabilizar la ladera viendo los casos no estables, esto se puede deber a dos sucesos que ya fueron mencionados: la escala del modelo y la red irregular de zonas deformables. Como es una escala mayor, el comportamiento de la resistencia del talud está principalmente dominado por los modelos constitutivos de bloques, más que de las estructuras. Además, cuando se generan las estructuras paralelamente, la red de zonas se forja simétricamente dentro de los bloques delimitados por estructuras, lo que puede disminuir los efectos de los esfuerzos "extraños" formados. Sumado a esto, la geometría y disposición de las estructuras puede que también este afectando la estabilización. En este caso no se observa a simple vista un posible mecanismo de ruptura asociado a las estructuras ya que no están a favor de la pendiente por lo que no se producirían deslizamientos.

Con respecto al modelo estático seleccionado, se puede apreciar en el diagrama de magnitud de vectores de desplazamiento y en los desplazamientos de puntos de

control que, a pesar de alcanzar un estado de equilibrio, se producen igualmente desplazamientos principalmente verticales en todo el modelo. Este fenómeno se atribuye al asentamiento, que es representado como el reacomodo debido a efectos de la gravedad que afecta a la ladera, observando a más altura mayor asentamiento y exhibiendo un deslizamiento máximo de 0,499m.

6.8 Limitaciones del software

Las principales limitaciones de este estudio están asociadas a la utilización y restricciones que presenta el programa UDEC y también a la falta de información geotécnica que ya fue mencionada.

El *software* no permite modelar puntos de superficie muy cercanos, del orden de 2m, por lo que no se pueden simular laderas con una alta resolución topográfica. Además, el programa restringe la cantidad de puntos que pueden representar el borde de un bloque, por lo que, sin la presencia de discontinuidades, el modelamiento de un bloque de gran escala no puede reconstruirse con alta resolución topográfica. Estas limitaciones conllevan a reducir la resolución de la ladera estudiada aún más

Por otro lado, al generar la malla o red de zonas deformables, se puede diferenciar el largo máximo de borde por bloque y una de las primeras restricciones de UDEC es que no permite asignar una gran diferencia de largos en distintos bloques dentro de la misma simulación. La relación de aspecto de radios debe ser 1:10 como máximo, por lo que no se pueden representar dos zonas muy distintas con respecto al tamaño de los bloques.

7. Conclusiones

El programa UDEC es capaz de incorporar los efectos del agua en la estabilidad de laderas rocosas fracturadas a través del modelamiento numérico de flujos de fluidos restringido a la red de estructuras o discontinuidades, considerando de esta forma que los bloques deformables son impermeables. Se utiliza una relación cúbica para correlacionar la apertura de diaclasas con la conductividad hidráulica.

La topografía de la ladera es reconstruida a partir de un modelo de elevación digital (DEM) suavizando un perfil actual considerando el volumen de material deslizado igual a $6 \cdot 10^6 \text{m}^3$, mientras que, la geometría se define por 3 set de estructuras, calizas y un intrusivo indicados por Hauser (2002). Los modelos constitutivos utilizados deben permitir la validación del modelo estático. En este caso se escoge el criterio de Mohr-Coulomb para discontinuidades y Hoek-Brown para los bloques, aunque posteriormente, se modifica al criterio de Mohr-Coulomb.

La validación del modelo estático fue compleja, ya que una primera estimación de los parámetros de entrada del modelo no representaba un estado de equilibrio bajo los efectos de la gravedad. Es necesario conocer una gran cantidad de parámetros de resistencia y tener claridad de los modelos constitutivos que se utilizarán antes de realizar un modelamiento numérico. Además, se precisa conocer las características y disposición de las estructuras que serán incorporadas al modelo.

Existen 5 modos disponibles para aplicar flujo de fluidos, en este estudio se utilizan solo dos: modo de flujo estacionario y modo de flujo transitorio incompresible. El comportamiento de generación de la remoción estudiada está mejor representado por el segundo modo, ya que un derretimiento de nieve implica una tasa de flujo que se infiltra en el tiempo. El modo estacionario no considera el flujo de fluidos en el tiempo, sino más bien, representa un momento posterior a la infiltración donde se estabiliza el nivel freático.

Las condiciones de borde estáticas impuestas de velocidad cero para ambas direcciones vertical y horizontal se consideran suficientes, pero se recomienda ingresar otras condiciones como, por ejemplo, los esfuerzos en los bordes, de manera de aumentar la representatividad de los resultados. En el caso del agua, las condiciones de presión de poros en los bordes laterales, en el modo de flujo estacionario, son fundamentales para ingresar el agua al modelo imponiendo un nivel freático. En el modo de flujo transitorio incompresible se definen solo condiciones de impermeabilidad en los bordes, pero se ingresa una tasa de flujo en el tiempo por la superficie de las estructuras igual a $5,09 \cdot 10^{-7} \text{m}^3/\text{s}$.

Con respecto a la estabilidad de la ladera con la incorporación de agua, en el modo estacionario no se generan rupturas de roca intacta ni se producen aperturas y desplazamientos de cizalle que puedan movilizar bloques. En el modo de flujo transitorio incompresible, la estabilidad va cambiando de acuerdo con el tiempo y saturación de agua de cada modelo. Para bajas saturaciones, solo se observan en la superficie aperturas y desplazamientos de estructuras, pero no rupturas de roca intacta. En cambio, cuando la saturación es alta se produce un fenómeno de alta acumulación de agua en las partes inferiores del modelo donde las presiones de poro son muy altas y dado que, el volumen de flujo que ingresa es igual al cambio de volumen de los dominios, las estructuras se separan drásticamente produciendo una

contracción de los bloques en las direcciones perpendiculares a las discontinuidades. En este caso sí se observan rupturas por roca intacta, pero se considera un resultado no adecuado, ya que las aberturas generadas en profundidad no son razonables (hasta 44 cm).

Con respecto a los modelos donde se generan movimientos de bloques, estos se pueden interpretar en su mayoría en la parte más superficial del talud sobre la corona del deslizamiento. Además, dada la disposición y condición de las estructuras, el movimiento evidenciado no genera un mecanismo de ruptura capaz de producir un deslizamiento, por lo tanto, ningún modelo lo refleja.

8. Recomendaciones

Para mejorar el modelo numérico desarrollado se recomienda en primer lugar ir a terreno y tomar los datos necesarios para realizar una simulación representativa. Es necesario realizar también, varios ensayos de resistencia para obtener todos los parámetros requeridos. Además, se deben obtener los valores asociados al flujo y propiedades del fluido. La segunda recomendación es tratar de ejecutar el modelo incorporando además presiones de poro en los bloques, lo cual podría disminuir la resistencia de la roca intacta y mostrar mayor inestabilidad. Para ello es necesario investigar u obtener ese valor de presión. También se sugiere intentar estabilizar el modelo considerando puentes de roca en las discontinuidades. Por último, se recomienda estudiar y probar el modo de flujo transitorio compresible, para entender mejor las diferencias entre los modos.

Para terminar, es preciso señalar que el programa contempla restricciones principalmente en la generación de superficies de alta resolución y en la definición de zonas deformables muy distintas.

9. Bibliografía

Araneda, M., Avendaño, M., & Merlo, C. (2000). Modelo gravimétrico de la Cuenca de Santiago, etapa III final. In Congreso Geológico Chileno (No. 9, pp. 404-408).

Aravena Faray, N. (2017). Análisis 3D del deslizamiento de roca de Punta Cola generado por el terremoto de Aysén del año 2007. Memoria para optar al Título de Geóloga. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E. (2010). The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2).

Bandis, S. C., Lumsden, A. C., & Barton, N. R. (1983, December). Fundamentals of rock joint deformation. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 20, No. 6, pp. 249-268). Pergamon.

Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering geology*, 7(4), 287-332.

Benko, B., & Stead, D. (1999). Analysis of two landslide case studies using numerical modelling. In *Proc., 13th Annual Vancouver Geotechnical Society Symp., Vancouver* (pp. 19-29).

Board, M., Chacon, E., Varona, P., & Lorig, L. (1996). Comparative analysis of toppling behaviour at Chuquicamata open-pit mine, Chile. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A. Mining Industry*, 105.

Carrasco, J., Osorio, R., & Casassa, G. (2008). Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54(186), 538-550.

Cartes, M. (2008). Investigación de Nieves y Escorrentía de Deshielo en la Cuenca Alta del Río Aconcagua. Aplicación de Modelos de Simulación Nival y de Pronóstico de Volúmenes de Deshielo. DGA (Ed.).

Casassa, G., & Marangunic, C. (1993). The 1987 Río Colorado rockslide and debris flow, central Andes, Chile. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 30(3), 321-330.

Castro Rivas, J. A. (2012). Estilo estructural en los depósitos mesozoicos y cenozoicos en el valle del Río Colorado-Maipo, región Metropolitana, Chile (~ 33° 30'S). Memoria de título, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gans, P., Kay, S. M., ... & Zurita, E. (2002a). Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33–36 SL). *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 117-139.

Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, S., Flynn, J. J., Iturra, N., ... & Wyss, A. R. (2005). The Abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion and relation to shallow seismic activity and Andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 43-77.

Charrier, R., Chávez, A., Elgueta, S., Hérail, G., Flynn, J. J., Croft, D. A., ... & García, M. (2002). Rapid tectonic and paleogeographic evolution: the Chucal Anticline, Altiplano of Arica, northern Chile. In *International Symposium of Andean Geodynamics* (No. 5, pp. 137-140).

Charrier, R., Farías, M., & MaksaeV, V. (2009). Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1), 05-35.

Charrier, R., Linares, E., Niemeyer, H., & Skarmeta, J. (1979). K-Ar ages of basalt flows of the Meseta Buenos Aires in southern Chile and their relation to the southeast Pacific triple junction. *Geology*, 7(9), 436-439.

Charrier, R., & Muñoz, N. (1994). Jurassic Cretaceous Palaeogeographic evolution of the Chilean Andes at 23–24 S latitude and 34–35 S latitude: A comparative analysis. In *Tectonics of the southern Central Andes* (pp. 233-242). Springer, Berlin, Heidelberg.

Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In *The geology of Chile* (pp. 21-114).

Cobbold, P. R., & Rossello, E. A. (2003). Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology*, 20(5), 429-443.

Comte, M. (2017). Modelación hidrológica de la cuenca del Río Mapocho en los Almendros usando el modelo Cold Regions Hydrological Model. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Costa, M., Coggan, J. S., & Eyre, J. M. (1999). Numerical modelling of slope behaviour of Delabole slate quarry (Cornwall, UK). *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 13(1), 11-18.

Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.

Davidson, J., & Vicente, J. C. (1973). Características paleogeográficas y estructurales del área fronteriza de las nacientes del Teno (Chile) y Santa Elena (Argentina) (Cordillera Principal, 35° a 35° 15' latitud sur). In *Congreso Geológico Argentino* (No. 5, pp. 11-55).

Escudero Véliz, I. (2017). Modelamiento dinámico mediante elementos discretos del deslizamiento de roca de Punta Cola generado por el terremoto del fiordo Aysén del 2007. Memoria de Título, Universidad de Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146808>

Farias Thiers, M. (2007). Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno. Tesis de Doctorado. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 236 p.

Falvey, M., & Garreaud, R. (2007). Wintertime precipitation episodes in central Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2), 171-193.

- Fock, A. (2005). Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33 y los 34 S. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Fuentes, F. (2004). Petrología y metamorfismo de muy bajo grado de unidades volcánicas oligoceno-miocenas en la ladera occidental de los Andes de Chile central (33°S). Tesis de Doctorado, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 398 p.
- García Hurtado, M. A. (2016). Análisis dinámico de un deslizamiento traslacional de roca provocado por acción sísmica mediante el uso de elementos discretos. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Geología. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- Giambiagi, L. B., Tunik, M. A., & Ghiglione, M. (2001). Cenozoic tectonic evolution of the Alto Tunuyán foreland basin above the transition zone between the flat and normal subduction segment (33 30'–34 S), western Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(7), 707-724.
- Giambiagi, L. B., Alvarez, P. P., Godoy, E., & Ramos, V. A. (2003a). The control of pre-existing extensional structures on the evolution of the southern sector of the Aconcagua fold and thrust belt, southern Andes. *Tectonophysics*, 369(1-2), 1-19.
- Godoy, E., Yáñez, G., & Vera, E. (1999). Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Chilean Central Andes: first seismic and gravity evidences. *Tectonophysics*, 306(2), 217-236.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Editorial Prentice Hall. 715 p.
- González-Ferran, O. (1987). Volcanic events, Tupungatito Volcano, central Chile: SEAN Bulletin (Vol. 12 No. 12, pp. 2-3).
- González-Ferran, O. (1988). Debris flow, Estero del Parraguirre, central Chile: SEAN Bulletin (Vol. 13, No. 6, pp.9-10).
- González, O. L. (1963). Observaciones geológicas en el valle del río Volcán. *Revista Minerale*s, Santiago, Vol. 17, N° 81, p. 20-61.
- Hallam, A., Biró-Bagóczy, L., & Pérez, E. (1986). Facies analysis of the Lo Valdés Formation (Tithonian–Hauterivian) of the high Cordillera of central Chile, and the palaeogeographic evolution of the Andean Basin. *Geological Magazine*, 123(4), 425-435.
- Hauser, A. (1985). Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. *Revista Geológica de Chile* 24, 75–92.
- Hauser, A. (1993). Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.
- Hauser, A. (2002). Rock avalanche and resulting debris flow in Estero Parraguirre and Rio Colorado, Región Metropolitana, Chile. *Catastrophic landslides: effects, occurrence and mechanisms. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 15, p.135-148.

- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 106(ASCE 15715).
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267-273.
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). Support of underground excavations in hard rock., 1995. AA Balkema, Rotterdam.
- Hutchison, B., Dugan, K., & Coulthard, M. (2000). Analysis of flexural toppling at Australian bulk minerals Savage River mine. In *ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- ISRM. (1981). Suggested Methods for the Rock Characterization, Testing and Monitoring. *ISRM Commission on Testing Methods*. Pergamon Press. Oxford.
- Itasca. (2014). *Universal Distinct Element Code, Version 6.0 User's Manual*. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota.
- Itasca. (2018). UDEC, 2D discrete element modeling (DEM) in jointed and blocky material. Itasca Consulting Group Inc. Recuperado de <https://www.itascacg.com/software/udec>
- Kay, S. M., Godoy, E., & Kurtz, A. (2005). Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Geological Society of America Bulletin*, 117(1-2), 67-88.
- Kay, S. M., Ramos, V. A., Mpodozis, C., & Sruoga, P. (1989). Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwana margin: Analogy to the Middle Proterozoic in North America?. *Geology*, 17(4), 324-328.
- Klohn Giehm, C. (1960). *Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincias de Santiago, O'Higgins, Colchagua y Curicó*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín 8, pp.1-95.
- Lama, R. D., & Vutukuri, V. S. (1978). *Handbook on mechanical properties of rocks. Volúmenes 2, 3 and 4*. Trans. Tech., Berlin.
- Lara, M., & Sepúlveda, S. (2008). *Remociones en masa*. Apuntes del curso.
- Loring, L. and Varona, P. (2005). Numerical analysis. In: D. Wyllie and C. Mah, ed., *Rock Slope Engineering: civil and mining*, 4th ed. Abingdon, pp.218-244.
- Mardones Leyton, V. A. (2016). Análisis estructural de los depósitos mesozoicos y cenozoicos en la cordillera principal en el Valle del río Volcán, Región Metropolitana, Chile (33° 44'-33° 56'S). *Memoria de Título*, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Martinez, R., & Osorio, R. (1963). Consideraciones preliminares sobre la presencia de carófitas fósiles en la Formación Colimapu.

- McQuarrie, N. (2002). Initial plate geometry, shortening variations, and evolution of the Bolivian orocline. *Geology*, 30(10), 867-870.
- Mpodozis, C., & Kay, S. M. (1990). Provincias magmáticas ácidas y evolución tectónica de Gondwana: Andes chilenos (28-31 S). *Andean Geology*, 17(2), 153-180.
- Mpodozis, C., & Ramos, V. (1989). The Andes of Chile and Argentina. In: Mpodozis, C., Ramos, V. A., Ericksen, G. E., Canas Pinochet, M. T., & Reinemund, J. A., *Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, 11, 59-90.
- Muñoz, M., De Andrade, V., Vidal, O., Lewin, E., Pascarelli, S., & Susini, J. (2006). Redox and speciation micromapping using dispersive X-ray absorption spectroscopy: Application to iron in chlorite mineral of a metamorphic rock thin section. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(11).
- Muñoz-Saez, C., Pinto, L., Charrier, R., & Nalpas, T. (2014). Influence of depositional load on the development of a shortcut fault system during the inversion of an extensional basin: The Eocene-Oligocene Abanico Basin case, central Chile Andes (33°-35° S). *Andean geology*, 41(1), 1-28.
- Muñoz Schick, M., Moreira-Muñoz, A., & Villagrán, C. (2000). Caracterización florística y pisos de vegetación en los Andes de Santiago, Chile Central.
- Nichol, S. L., Hungr, O., & Evans, S. G. (2002). Large-scale brittle and ductile toppling of rock slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(4), 773-788.
- Núñez Recabal, E. E. (2018). Ambiente de sedimentación y estratigrafía secuencial de las formaciones baños Morales, lo Valdés y los estratos Cerro Rubillas, en la Ladera Norte del Valle del Río Volcán (33° 49' S), Chile Central (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Químicas Departamento de Ciencias de la Tierra).
- Oliveros, V., Féraud, G., Aguirre, L., Fornari, M., & Morata, D. (2006). The Early Andean Magmatic Province (EAMP): ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating on Mesozoic volcanic and plutonic rocks from the Coastal Cordillera, northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 157(4), 311-330.
- Pells, P. J. (1993). Uniaxial strength testing. In *Rock testing and site characterization* (pp. 67-85). Pergamon.
- Pozo García, R. R. (2014). Análisis numérico del mecanismo de falla en macizos rocosos fracturados considerando el efecto escala.
- Ramos, V. A. (1994). Terranes of southern Gondwanaland and their control in the Andean structure (30–33 S latitude). In: Reutter, K.J, Scheuber, E., and Wigger, P.J., eds., *Tectonics of the Southern Central Andes: Structure and evolution of an active continental margin* (pp. 249-261). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ramos, V. A., & Folguera, A. (2005). Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation. *Geological Society, London, Special Publications*, 252(1), 15-35.

Rauld, R. A. (2002). Análisis morfoestructural del frente cordillerano de Santiago Oriente, entre el río Mapocho y la Quebrada Macul. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago, p.57.

Rauld, R., Vargas, G., Armijo, R., Ormeño, A., Valderas, C., & Campos, J. (2006). Cuantificación de escarpes de falla y deformación reciente en el frente cordillerano de Santiago. In Congreso Geológico Chileno (No. 11, pp. 447-450).

Read, J., & Stacey, P. (2009). Guidelines for open pit slope design.

Rocscience (2019). Software products. Toronto: Rocscience Inc. Recuperado de: <https://www.rocscience.com/software>

Saavedra, G. (2018). Análisis de deslizamientos de laderas en roca en el cajón del Maipo a través de modelamiento 3D. Memoria para optar al Título de Geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Sellés, D., & Gana, P. (2001). Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal, Regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica 74: 30 p., escala 1: 100.000. Santiago.

Sepúlveda, S. A., Fuentes, J. P., Oppikofer, T., Hermanns, R. L., & Moreiras, S. M. (2012). Analysis of a large-scale, stepped planar failure in the Central Andes uplands, Chile, using roughness profiles from terrestrial laser scanning. *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*. Taylor & Francis Group, London, 1243, 1247.

Stead, D., & Eberhardt, E. (1997). Developments in the analysis of footwall slopes in surface coal mining. *Engineering Geology*, 46(1), 41-61.

Stead, D., Eberhardt, E., & Coggan, J. S. (2006). Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. *Engineering geology*, 83(1-3), 217-235.

Sugimoto, S., Jiang, Y., Omine, K., Ishida, J., & Higashi, Y. (2016). Numerical studies on slope stability in torrential rainfall by using two-phase flow analysis. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(27), 990-995.

Tassara, A., & Yáñez, G. (2003). Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47 S). *Revista geológica de Chile*, 30(2), 159-186.

Thiele, R. (1980). Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, 29, 21.

Ugarte, G. (1988). Conclusiones Adicionales Sobre las Causas que Provocaron el Desastre de Alfalfa. Reporte a la Cámara Chilena de la Construcción, 4 p. Santiago, Chile.

USGS. (2000). Landslide hazards. U.S. Geological Survey, USGS Fact Sheet Fs-071-00.

Vilas, J. F., & Valencio, D. A. (1978). Palaeomagnetism and K—Ar age of the Upper Ordovician Alcaparrosa Formation, Argentina. *Geophysical Journal International*, 55(1), 143-154.

Véjar Ferrada, T. (2016). Modelamiento geológico-geotécnico 3D de laderas afectadas por deslizamientos de roca mediante el método de elementos distintos. Memoria de Título, Universidad de Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144094>

Vutukuri, V. S., Lama, R. D., & Saliya, S. S. (1974). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*. Vol. 1. Trans. Tech., Berlin.

Wall, R., Sellés, D., & Gana, P. (1999). Area Tilttil-Santiago, Región Metropolitana. Servicio nacional de geología y minería. Mapas geológicos N° 11, escala 1:100.000, 1 anexo.

Welkner, D., Eberhardt, E., & Hermanns, R. L. (2010). Hazard investigation of the Portillo Rock Avalanche site, central Andes, Chile, using an integrated field mapping and numerical modelling approach. *Engineering Geology*, 114(3-4), 278-297.

Wieczorek, G. F. (1996). *Landslides: investigation and mitigation*. Chapter 4- Landslide triggering mechanisms. Transportation Research Board Special Report, (247).

Anexo A

Topografía utilizada en la ladera de estudio.

Tabla 15: Detalle de puntos en ambas coordenadas para construir la ladera de estudio.

X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]
0,00	4037,51	1235,54	3634,57	2471,08	3477,56	3693,51	3850,71	4917,20	4815,45
12,48	4034,64	1248,02	3632,06	2483,56	3469,77	3705,99	3858,28	4929,68	4814,61
24,96	4032,10	1260,50	3628,56	2496,04	3463,25	3718,46	3865,31	4942,17	4813,34
37,44	4029,34	1272,98	3625,08	2508,52	3462,66	3730,94	3872,14	4954,65	4811,52
49,92	4024,59	1285,46	3621,38	2521,00	3460,36	3743,42	3877,41	4967,13	4810,26
62,40	4017,18	1297,94	3617,01	2533,48	3459,01	3755,90	3881,48	4979,61	4809,41
74,88	4009,34	1310,42	3612,32	2545,96	3457,29	3768,38	3886,30	4992,09	4808,95
87,36	4001,49	1322,90	3607,65	2558,44	3456,17	3780,85	3891,32	5004,57	4808,02
99,84	3993,52	1335,38	3603,67	2570,92	3455,00	3793,33	3896,35	5017,05	4805,85
112,32	3986,64	1347,86	3600,37	2583,40	3454,36	3805,81	3902,32	5029,53	4799,11
124,80	3980,32	1360,34	3597,57	2595,88	3454,91	3818,29	3908,34	5042,01	4787,55
137,28	3974,22	1372,82	3595,08	2608,36	3455,99	3830,77	3915,40	5054,49	4776,05
149,76	3968,01	1385,30	3592,91	2620,19	3456,36	3843,25	3923,44	5066,97	4766,57
162,24	3962,56	1397,78	3590,11	2632,66	3457,79	3855,72	3931,44	5079,45	4759,66
174,72	3957,99	1410,26	3586,80	2645,14	3461,31	3868,20	3936,44	5091,93	4756,27
187,20	3954,53	1422,74	3583,18	2657,62	3464,49	3880,68	3942,44	5104,41	4755,81
199,68	3951,14	1435,22	3578,38	2670,09	3467,50	3893,16	3949,37	5116,89	4751,76
212,16	3948,18	1447,70	3573,21	2682,57	3469,78	3905,64	3956,29	5129,37	4742,72
224,64	3945,33	1460,19	3568,39	2695,05	3472,00	3918,11	3963,29	5141,85	4732,17
237,12	3942,11	1472,67	3564,38	2707,52	3474,31	3930,59	3970,28	5154,33	4722,10
249,60	3938,99	1485,15	3561,69	2720,00	3476,29	3943,07	3978,21	5166,81	4712,50
262,08	3936,40	1497,63	3559,70	2732,48	3478,54	3955,55	3987,32	5179,29	4702,44
274,56	3933,78	1510,11	3557,70	2744,96	3481,04	3968,03	3997,44	5191,77	4691,93
287,04	3929,85	1522,59	3555,71	2757,43	3483,68	3980,50	4005,75	5204,25	4681,95
299,53	3923,99	1535,07	3553,71	2769,91	3486,39	3992,98	4012,23	5216,73	4672,48
312,01	3917,16	1547,55	3551,72	2782,39	3489,28	4005,46	4021,44	5229,21	4664,01
324,49	3910,18	1560,03	3549,57	2794,86	3493,06	4017,94	4028,43	5241,69	4656,01
336,97	3903,58	1572,51	3547,56	2807,34	3496,76	4030,42	4035,47	5254,17	4648,01
349,45	3897,19	1584,99	3545,74	2819,82	3500,21	4042,89	4041,40	5266,65	4639,00
361,93	3890,43	1597,47	3544,21	2832,30	3503,71	4055,37	4053,31	5279,13	4626,52
374,41	3882,46	1609,95	3543,22	2844,77	3506,86	4067,85	4062,07	5291,61	4615,03
386,89	3872,65	1622,43	3541,90	2857,25	3509,84	4080,33	4073,08	5304,09	4604,03
399,37	3862,45	1634,91	3541,00	2869,73	3512,69	4092,81	4088,12	5316,57	4594,52
411,85	3854,34	1647,39	3540,54	2882,20	3515,10	4105,28	4096,04	5329,05	4587,50
424,33	3848,33	1659,87	3539,68	2894,68	3517,08	4117,76	4103,91	5341,53	4581,97
436,81	3843,19	1672,35	3538,70	2907,16	3519,48	4130,24	4112,82	5354,01	4578,45
449,29	3838,21	1684,83	3537,54	2919,63	3522,15	4142,72	4123,10	5366,49	4576,42

461,77	3832,96	1697,31	3536,54	2932,11	3524,26	4155,20	4133,56	5378,97	4575,91
474,25	3827,89	1709,79	3535,68	2944,59	3526,24	4167,67	4142,98	5391,45	4573,91
486,73	3823,03	1722,27	3534,84	2957,07	3527,81	4180,15	4151,89	5403,93	4571,43
499,21	3818,16	1734,75	3533,71	2969,54	3528,38	4192,63	4156,48	5416,41	4568,43
511,69	3813,54	1747,23	3532,55	2982,02	3527,96	4205,11	4160,05	5428,89	4563,45
524,17	3808,49	1759,71	3531,55	2994,50	3527,67	4217,59	4166,19	5441,37	4558,97
536,65	3802,37	1772,19	3530,23	3006,97	3528,62	4230,07	4173,65	5453,85	4554,95
549,13	3795,21	1784,67	3528,71	3019,45	3530,48	4242,54	4180,50	5466,33	4550,95
561,61	3787,12	1797,15	3526,67	3031,93	3533,79	4255,02	4187,39	5478,81	4547,47
574,09	3778,07	1809,63	3524,00	3044,41	3537,74	4267,50	4195,94	5491,29	4544,90
586,57	3770,67	1822,11	3521,09	3056,88	3542,91	4279,98	4203,43	5503,77	4543,41
599,05	3765,81	1834,59	3517,57	3069,36	3549,81	4292,46	4210,75	5516,26	4542,39
611,53	3762,96	1847,07	3513,99	3081,84	3557,14	4304,93	4216,66	5528,74	4541,82
624,01	3762,18	1859,55	3510,00	3094,31	3565,04	4317,41	4222,62	5541,22	4541,79
636,49	3761,91	1872,03	3506,44	3106,79	3572,60	4329,89	4230,76	5553,70	4541,24
648,97	3759,66	1884,51	3503,77	3119,27	3579,60	4342,37	4239,18	5566,18	4540,25
661,45	3754,10	1896,99	3501,63	3131,75	3586,60	4354,85	4247,63	5578,66	4538,27
673,93	3747,36	1909,47	3500,07	3144,22	3593,97	4367,32	4255,23	5591,14	4535,72
686,41	3740,83	1921,95	3499,08	3156,95	3595,63	4379,80	4262,15	5603,62	4532,31
698,89	3734,31	1934,43	3497,66	3169,43	3597,65	4392,28	4269,29	5616,10	4528,87
711,37	3728,09	1946,91	3495,77	3181,91	3599,70	4404,76	4276,49	5628,58	4525,84
723,85	3721,50	1959,39	3494,24	3194,39	3602,45	4417,24	4284,60	5641,06	4522,84
736,33	3714,80	1971,87	3492,78	3206,86	3606,48	4429,71	4291,22	5653,54	4520,38
748,81	3708,58	1984,35	3491,35	3219,34	3611,16	4442,19	4300,73	5666,02	4518,91
761,29	3702,86	1996,83	3490,25	3231,82	3616,18	4454,67	4307,14	5678,50	4518,44
773,77	3699,08	2009,31	3488,39	3244,30	3622,17	4467,15	4312,94	5690,98	4518,97
786,25	3696,85	2021,79	3485,94	3256,78	3628,14	4479,63	4320,26	5703,46	4519,95
798,73	3693,98	2034,28	3483,63	3269,25	3633,50	4492,10	4329,95	5715,94	4521,89
811,21	3690,20	2046,76	3481,59	3281,73	3638,54	4504,58	4333,48	5728,42	4524,27
823,69	3685,92	2059,24	3481,00	3294,21	3644,95	4517,06	4338,75	5740,90	4526,29
836,17	3680,02	2071,72	3481,82	3306,69	3651,81	4529,54	4348,51	5753,38	4528,66
848,65	3673,88	2084,20	3484,13	3319,17	3659,74	4542,02	4361,16	5765,86	4530,67
861,13	3669,79	2096,68	3487,56	3331,64	3670,34	4554,49	4372,08	5778,34	4532,67
873,62	3667,63	2109,16	3491,39	3344,12	3679,89	4566,97	4379,88	5790,82	4534,66
886,10	3666,69	2121,64	3494,71	3356,60	3686,91	4579,45	4387,22	5803,30	4536,65
898,58	3667,33	2134,12	3497,80	3369,08	3692,47	4591,93	4412,57	5815,78	4541,80
911,06	3668,56	2146,60	3500,53	3381,56	3698,02	4604,41	4429,90	5828,26	4549,03
923,54	3669,29	2159,08	3504,10	3394,03	3704,52	4616,89	4443,99	5840,74	4556,39
936,02	3669,83	2171,56	3508,02	3406,51	3709,54	4629,36	4468,45	5853,22	4564,67
948,50	3670,37	2184,04	3513,89	3418,99	3714,09	4641,84	4485,35	5865,70	4572,67
960,98	3670,62	2196,52	3521,00	3431,47	3718,65	4654,32	4511,82	5878,18	4579,95
973,46	3670,88	2209,00	3528,00	3443,95	3722,71	4666,80	4527,09	5890,66	4586,26
985,94	3671,39	2221,48	3534,61	3456,42	3725,31	4679,28	4534,38	5903,14	4592,85

998,42	3671,89	2233,96	3540,93	3468,90	3728,81	4691,75	4549,88	5915,62	4600,39
1010,90	3671,86	2246,44	3547,44	3481,38	3733,85	4705,04	4569,26	5928,10	4608,01
1023,38	3671,66	2258,92	3552,67	3493,86	3739,89	4717,52	4591,83	5940,58	4617,15
1035,86	3671,13	2271,40	3555,85	3506,34	3745,94	4730,00	4610,17	5953,06	4624,34
1048,34	3670,68	2283,88	3556,68	3518,82	3751,38	4742,48	4624,98	5965,54	4629,83
1060,82	3670,15	2296,36	3555,35	3531,29	3757,41	4754,96	4639,39	5978,02	4633,67
1073,30	3668,86	2308,84	3552,57	3543,77	3762,82	4767,44	4656,38	5990,50	4638,55
1085,78	3666,76	2321,32	3548,64	3556,25	3769,19	4779,92	4673,71	6002,98	4643,23
1098,26	3664,28	2333,80	3544,56	3568,73	3774,87	4792,40	4690,67	6015,46	4649,41
1110,74	3661,48	2346,28	3540,15	3581,21	3780,89	4804,88	4707,33	6027,94	4658,75
1123,22	3658,41	2358,76	3535,08	3593,68	3787,58	4817,36	4722,69	6040,42	4668,70
1135,70	3655,42	2371,24	3529,68	3606,16	3795,28	4829,84	4737,85	6052,90	4678,09
1148,18	3652,20	2383,72	3523,62	3618,64	3802,34	4842,32	4752,41	6065,38	4687,41
1160,66	3648,70	2396,20	3516,97	3631,12	3809,24	4854,80	4766,78	6077,86	4696,13
1173,14	3645,43	2408,68	3509,46	3643,60	3816,78	4867,28	4780,89	6090,35	4703,60
1185,62	3642,96	2421,16	3502,90	3656,07	3825,00	4879,76	4793,64	6102,83	4710,34
1198,10	3640,75	2433,64	3497,38	3668,55	3833,95	4892,24	4805,28	6115,31	4716,41
1210,58	3638,56	2446,12	3492,76	3681,03	3842,69	4904,72	4813,40	6127,79	4721,79
1223,06	3636,56	2458,60	3484,12						

Tabla 16: Detalle de puntos simplificados en ambas coordenadas para construir la ladera de estudio.

X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]
0,00	4037,51	2121,64	3494,71	4242,54	4180,50
124,80	3980,32	2246,44	3547,44	4367,32	4255,23
249,60	3938,99	2371,24	3529,68	4492,10	4329,95
374,41	3882,46	2496,04	3463,25	4616,89	4443,99
499,21	3818,16	2620,19	3456,36	4742,48	4624,98
624,01	3762,18	2744,96	3481,04	4867,28	4780,89
748,81	3708,58	2869,73	3512,69	4992,09	4808,95
873,62	3667,63	2994,50	3527,67	5116,89	4751,76
998,42	3671,89	3119,27	3579,60	5241,69	4656,01
1123,22	3658,41	3244,30	3622,17	5366,49	4576,42
1248,02	3632,06	3369,08	3692,47	5491,29	4544,90
1372,82	3595,08	3493,86	3739,89	5616,10	4528,87
1497,63	3559,70	3618,64	3802,34	5740,90	4526,29
1622,43	3541,90	3743,42	3877,41	5865,70	4572,67
1747,23	3532,55	3868,20	3936,44	5990,50	4638,55
1872,03	3506,44	3992,98	4012,23	6115,31	4716,41
1996,83	3490,25	4117,76	4103,91		

Anexo B

Tablas de estimación de parámetros para modelos constitutivos

Tabla 17: Valores de rigidez normal de discontinuidades. Extraído de Read (2009).

Table 5.17: Reported values for normal stiffness for some rocks

Rock	Discontinuity	Load cycle	k_{ni} (GPa/m)	k_N (GPa/m)	Comments	Reference
SANDSTONE	Fresh to slightly weathered, good matching of rock walls	1	4–23	1.7	$\sigma_n = 1$ kPa	Bandis et al. (1983)
		2	11–35			
		3	18–62			
	Moderately weathered, good matching of rock walls	1	4–26			
		2	9–27			
		3	15–45			
	Weathered, good matching of rock walls	1	2–5			
		2	9–14			
		3	11–20			
	Shear zone with clay gouge					
Bedding planes, good matching (JRC = 10–16)			13–24	Direct shear tests with σ_n ranging from 0.4–0.9 MPa	Rode et al. (1990)	
Bedding planes, good matching (JRC = 10–16)			7–12			
Fresh fractures, good matching (JRC = 12–17)			17–25			
Fresh fractures, poor matching (JRC = 12–17)			8–12			
LIMESTONE	Fresh to slightly weathered, good matching	1	8–31	0.5–1.0	$\sigma_n = 1$ kPa	Bandis et al. (1983)
		2	54–134			
		3	72–160			
	Moderately weathered, good matching	1	5–70			
		2	26–91			
		3	53–168			
	Weathered, good matching	1	4–13			
		2	40–50			
		3	42–65			
	Joints in weathered limestone					
Joints in fresh limestone			15–30	$\sigma_n = 10–20$ MPa	Ludvig (1980)	
Clean			10–25			
With clay gouge						
DOLERITE	Fresh, good matching	1	21–27	121	$\sigma_n = 1$ kPa	Bandis et al. (1983)
		2	59–75			
		3	103–119			
	Weathered, good matching	1	8–13			
		2	24–92			
		3	37–130			
GRANITE	Clean joint (JRC = 1.9)	1		74	Estimated from ref. Biaxial tests	Makurat et al. (1990)
	Clean joint (JRC = 3.8)	1				
GRANITE	Clean joint			352–635	Mes. Sist. Pac-ex. σ_n : 25–30 MPa	Martín et al. (1990)
				50–110	σ_n : 8.6–9.3 MPa	
	Shear zone			2–224	Mes. Sist. Pac-ex. σ_n : 0.5–1.5 MPa	
				7–266	Mes. Sist. Pac-ex. σ_n : 18–20 MPa	

k_n = Normal stiffness

σ_n = Normal stress

k_{ni} = Initial normal stiffness

σ_{ni} = Initial normal stress

Pac-ex: Measured by the system Pac-ex, a special instrumentation system developed in the Underground Research Laboratory by Atomic Energy of Canada Ltd.

Source: Flores & Karzulovic (2003)

Tabla 18: Valores de rigidez tangencial de discontinuidades. Extraído de Read (2009).

Table 5.19: Reported values for shear stiffness of some defects

Rock	Structure type	k_{st} (GPa/m)	$k_{s,yield}$ (GPa/m)	$k_{s,peak}$ (GPa/m)	Comments	Reference
AMPHIBOLITE	Schistosity plane			0.59	DST, $\sigma_{st} = 0.12$ MPa	Kulhawy (1975)
SANDSTONE	Sandstone-basalt contact			0.11	DST, $\sigma_{st} = 0.13$ MPa	
	Sandstone-chalk contact		0.3–2.1	0.1–0.2	DST, $\sigma_{st} = 0.1–1$ MPa	
	Artificial fracture			29.8	DST, $\sigma_{st} = 0.26$ MPa	
	Artificial rough fracture			1.3	DST, $\sigma_{st} = 2.4$ MPa	
	Artificial clean fracture			5–38		Maki (1985)
	Fresh fracture, good matching	2.2–38		0.6–4.5	$\sigma_{st} = 0.2–2.4$ MPa	Bandis et al. (1983)
	Slightly weathered fracture, good matching	9–42		1.2–4.7	$\sigma_{st} = 0.2–2.1$ MPa	
	Moderately weathered fracture, good matching	1.2–6		0.5–1.7	$\sigma_{st} = 0.2–2.0$ MPa	
LIMESTONE	Weathered fracture, good matching	2.1–7		0.6–1.4	$\sigma_{st} = 0.5–2.0$ MPa	
	Clean smooth fractures		0.4–2.4	0.2–1.3	DST, $\sigma_{st} = 0.9–2.4$ MPa	Kulhawy (1975)
	Artificial fracture			8.7	DST, $\sigma_{st} = 10.4$ MPa	
	Clean artificial fracture			3–17		Maki (1985)
	Fresh to slightly weathered, good matching	8–51		1.7–7	$\sigma_{st} = 0.2–1.8$ MPa	Bandis et al. (1983)
	Moderately weathered, good matching	4–17		1.1–3.1	$\sigma_{st} = 0.2–1.9$ MPa	
	Weathered, good matching	1–11		0.7–1.9	$\sigma_{st} = 0.2–1.5$ MPa	
	Joint with large JCS		6.1	1.7–4.6	DST, $\sigma_{st} = 0.5$ MPa	Kulhawy (1975)
	Rough bedding plane		0.2–13.8	1.2–2.6	DST, $\sigma_{st} = 1.5–4$ MPa	
	Rough bedding plane		0.3–14.9	0.2–7.4	DST, $\sigma_{st} = 0.3–3.4$ MPa	
	Moderately rough bedding plane		0.8–4.1	0.2–1.4	DST, $\sigma_{st} = 0.1–3.6$ MPa	
	Mylonitised bedding plane		1.0–8.0	0.3–5.7	DST, $\sigma_{st} = 0.2–2.4$ MPa	
	Chalk vein (0.2–20 mm)			2.3–23.6	DST, $\sigma_{st} = 0.5–1.5$ MPa	
	Chalk vein (15–30 mm)		1.2–3.3	0.4–4.7	DST, $\sigma_{st} = 0.5–3$ MPa	
	Chalk vein (0.2–2 mm), saturated		1.47	0.1–31.6	DST, $\sigma_{st} = 0.5–1.5$ MPa	
	Chalk vein (1–3 mm), saturated		2.2–3.7	0.5–3.7	DST, $\sigma_{st} = 0.45–0.6$ MPa	
	Chalk vein (1–50 mm), saturated		2.2–3.3	0.9–5.7	DST, $\sigma_{st} = 0.25–0.8$ MPa	
	CHALK	Shale layer		1.5–13.9	0.3–8.3	DST, $\sigma_{st} = 1.2–2.8$ MPa
Shale layer (2–5 mm), wet				0.01–0.02	DST, $\sigma_{st} = 0.025$ MPa	
Fractured shale layer (2–5 mm)				0.01–0.02	DST, $\sigma_{st} = 0.02$ MPa	
Saturated joint			0.1–2.7	0.02–1.9	DST, $\sigma_{st} = 0.5–2.9$ MPa	
Sand filled fractures (1–2 mm)				2.34	DST, $\sigma_{st} = 0.98$ MPa	
QUARTZITE	Clean fracture			5–9	$\sigma_{st} = 10–15$ MPa	Ludvig (1980)
	Fracture with clay gouge			2–4		

DST Direct shear tests

TT Triaxial tests

IST In situ tests

Source: Modified from Flores & Karzulovic (2003)

Tabla 19: Valores de ángulo de fricción para varias rocas. Extraído de Barton (1973).

Basic or residual friction angle for various rocks, obtained from sand-blasted, rough-sawn and residual surfaces

Rock	Moisture	σ_n (kg/cm ²)	$\Phi_b^\circ = \Phi_r^\circ$	Reference*
Amphibolite	dry	1-42	32	a
Basalt	dry	1-85	35-38	b
	wet	1-79	31-36	b
Conglomerate	dry	3-34	35	c
Chalk	wet	0-4	30	d
Dolomite	dry	1-72	31-37	b
	wet	1-72	27-35	b
Gneiss (schistose)	dry	1-81	26-29	b
	wet	1-79	23-26	b
Granite (f.g.)	dry	1-75	31-35	b
	wet	1-74	29-31	b
Granite (c.g.)	dry	1-73	31-35	b
	wet	1-75	31-33	b
Limestone	dry	0-5	33-39	e
	wet	0-5	33-36	e
	dry	1-71	37-40	b
	wet	1-71	35-38	b
	dry	1-83	37-39	b
	wet	1-83	35	b
Porphyry	dry	0-10	31	f
	dry	41-133	31	f
Sandstone	dry	0-5	26-35	e
	wet	0-5	25-33	e
	wet	0-3	29	g
	dry	3-30	31-33	c
	dry	1-70	32-34	b
	wet	1-73	31-34	b
Shale	wet	0-3	27	g

Tabla 20: Parámetros resistentes de discontinuidades con rellenos. Extraído de González de Vallejo (2002).

CUADRO 3.18

Parámetros resistentes de discontinuidades con rellenos

Roca	Descripción	Resistencia de pico		Resistencia residual	
		Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)
Basalto	Brecha arcillosa con fragmentos rocosos.	2,4	42		
Caliza	Relleno arcilloso de 6 mm.			0	13
	Id. de 1 a 2 cm.	1	13-14		
	Id. < 1 mm.	0,5-2	17-21		
	Marga de 2 cm.	0	25	0	15-24
Diorita	Relleno de arcilla.	0	26,5		
Dolomía	Relleno arcilloso de ≈ 15 cm de espesor.	0,41	14,5	0,22	17
Esquistos y cuarcitas	Relleno arcilloso 10-15 cm de espesor.	0,3-0,8	32		
	Relleno arcilloso fino en planos de estratificación.	6,1-7,4	41		
	Relleno arcilloso espeso en planos de estratificación.	3,8	31		
Granito	Fallas con relleno arcilloso.	0-1,0	24-25		
	Fallas con relleno arenoso.	0,5	40		
	Zona de cizalla, granito roto, roca desintegrada y rellenos arcillosos.	2,42	42		
Grauvaca	Relleno arcilloso de 1-2 mm en planos de estratificación.			0	21
Lutita	Relleno de arcilla.	0,6	32		
	Arcilla en planos de estratificación.			0	19,5
Pizarra	Alteradas y laminadas	0,5	33		

Datos de varios autores y de ensayos realizados bajo condiciones diferentes (Hoek y Bray, 1981).

Tabla 21: Resistencia a la compresión uniaxial. Extraído de Pells (1993).

Table 7 Uniaxial Compressive Strength for Different Rock Types (Summarized From Lama and Vutukuri [3])

Material	Number of different materials	Unconfined compressive strength	
		Mean (MPa)	Range (MPa)
Andesite	10	140	77-304
Basalt	34	156	42-355
Chert	4	244	202-360
Conglomerate	12	106	18-226
Diabase	15	238	115-320
Diorite	14	192	64-333
Dolerite	3	294	211-410
Dolomite	16	123	33-420
Gabbro	6	218	126-311
Gneiss	39	154	26-340
Granite	76	183	58-300
Greywacke	12	81	30-221
Limestone	149	105	12-294
Phyllite	9	97	7-314
Quartzite	47	232	77-629
Salt	19	46	21-157
Sandstone	116	98	10-318
Schist	21	96	24-245
Shale	53	106	4-504
Tuff	19	57	4-290

Tabla 22: Valores de constante m_i para distintos tipos de roca. Extraído de Hoek & Brown (1997).

Tabla 2 : VALORES DE LA CONSTANTE m_i DE LA ROCA INTACTA PARA DISTINTOS TIPOS DE ROCA
(LOS VALORES ENTRE PARÉNTESIS CORRESPONDEN A ESTIMACIONES)

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

Tabla 23: Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para distintos tipos de rocas. Extraído de González de Vallejo (2002).

CUADRO 3.15

Constantes elásticas de las rocas

Roca Intacta	Módulo de elasticidad estático, E kg/cm ² ($\times 10^5$)	Módulo de elasticidad dinámico, E_d kg/cm ² ($\times 10^5$)	Coefficiente de Poisson, ν
Andesita	3,0-4,0		0,23-0,32
Anfibolita	1,3-9,2	4,6-10,5	
Anhidrita	0,15-7,6		0,1-0,4
Arenisca	0,3-6,1	0,5-5,6	(0,24-0,31)
Basalto	3,2-10	4,1-8,7	0,19-0,38
Caliza	1,5-9,0 (2,9-6,0)	0,8-9,9	0,12-0,33 (0,25-0,30)
Cuarcita	2,2-10 (4,2-8,5)		0,08-0,24 (0,11-0,15)
Diabasa	6,9-9,6	6,0-9,8	0,28
Diorita	0,2-1,7	2,5-4,4	
Dolomía	0,4-5,1	2,2-8,6	0,29-0,34
Gabro	1-6,5		0,12-0,20
Gneiss	1,7-8,1 (5,3-5,5)	2,5-10,5	0,08-0,40 (0,20-0,30)
Esquisto	0,6-3,9 (2,0)		0,01-0,31 (0,12)
Granito	1,7-7,7	1,0-8,4	0,1-0,4 (0,18-0,24)
Grauvaca	4,7-6,3	2,3-10,7	
Limolita	5,3-7,5	0,7-6,5	0,25
Lutita	0,3-2,2	1,0-7,0	0,25-0,29
Marga	0,4-3,4	1,0-4,9	
Mármol	2,8-7,2		0,1-0,4 (0,23)
Micaesquisto	0,1-2,0		
Pizarra	0,5-3,0		
Sal	0,5-2,0		0,22
Toba	0,3-7,6		0,24-0,29
Yeso	1,5-3,6		

Valores máximos y mínimos. Valores medios entre paréntesis.
 Datos seleccionados a partir de Rahn (1986), Johnson y De Graff (1988), Goodman (1989), Walther (1999), Duncan (1999).

Tabla 24: Valores de c y ϕ para roca sana. Extraído de González de Vallejo (2002).

CUADRO 3.13

Valores típicos de c y ϕ para roca sana

Roca	Cohesión c (kp/cm ²)	Ángulo de fricción básico ϕ (grados)
Andesita	280	45
Arenisca	80-350	30-50
Basalto	200-600	48-55
Caliza	50-400	35-50
Caliza margosa	10-60	30
Cuarcita	250-700	40-55
Diabasa	900-1.200	40-50
Dionita	150	50-55
Dolomía	220-600	25-35
Esquisto	250	25-30*
	20-150*	20-30*
Gabro	300	35
Gneiss	150-400	30-40
Granito	150-500	45-58
Grauvaca	60-100	45-50
Mármol	150-350	35-45
Lutita	30-350	40-60
		15-25*
Pizarra	100-500	40-55
	< 100*	15-30*
Toba	7	—
Yeso	—	30

(*) En superficies de laminación o esquistosidad.
 Datos seleccionados a partir de Walthan (1999), Rahn (1986), Goodman (1989), Farmer (1968), Jiménez Salas y Justo Alpé-
 nés (1975).

Tabla 25: Valores de resistencia de la matriz rocosa sana. Extraído de González de Vallejo (2002).

CUADRO 3.6

Valores de resistencia de la matriz rocosa sana

Roca sana	Resistencia a compresión simple (kp/cm ²)		Resistencia a la tracción (kp/cm ²)
	Valores medios	Rango de valores	
Andesita	2.100-3.200	1.000-5.000	70
Anfibolita	2.800	2.100-5.300	230
Anhidrita	900	800-1.300	60-120
Arenisca	550-1.400	300-2.350	50-200
Basalto	800-2.000	600-3.500	50-250
Caliza	600-1.400	500-2.000	40-300
Cuarcita	2.000-3.200	1.000-5.000	100-300
Diabasa	2.400-3.500	1.300-3.650	550
Diorita	1.800-2.450	1.200-3.350	80-300
Dolerita	2.000-3.000	1.000-3.500	150-350
Dolomía	600-2.000	500-3.500	50-250
Esquisto	300-600	200-1.600	20-55
Gabro	2.100-2.800	1.800-3.000	140-300
Gneiss	600-2.000	500-2.500	50-200
Granito	700-2.000	500-3.000	70-250
Grauvaca	1.000-1.500	800-2.200	55-150
Limolita		350-2.500	27
Lutita	200-400	100-900	15-100
			5-10*
Marga	300-700	200-900	
Mármol	1.200-2.000	600-2.500	65-200
Pizarra	400-1.500	300-2.000	70-200
Sal	120	50-300	
Toba		100-460	10-40
Yeso	250	100-400	10-25

(*) A favor de superficies de laminación.
 Datos seleccionados a partir de Rahn (1986), Walthan (1999), Ober y Duvall (1967), Farmer (1968).

Anexo C

Efectos producidos en el modelo cambiando la geometría y mallado

Se realizaron diferentes simulaciones de la geometría de la ladera y la disposición de las estructuras en estas, con el fin de observar distintos comportamientos con respecto a la plasticidad (superficies que superan el esfuerzo de fluencia, y por tanto superan el límite plástico), el desplazamiento y la energía desequilibrada (*unbalanced energy*).

Modelo 1

Con respecto al caso base aplicando el criterio de Hoek-Brown, la geometría de la ladera se extiende hacia el Este (derecha mirando la pantalla) hasta los 8600m. La base se mantiene a los 3200 m de altura y las estructuras se generan en toda la extensión, exceptuando al intrusivo.

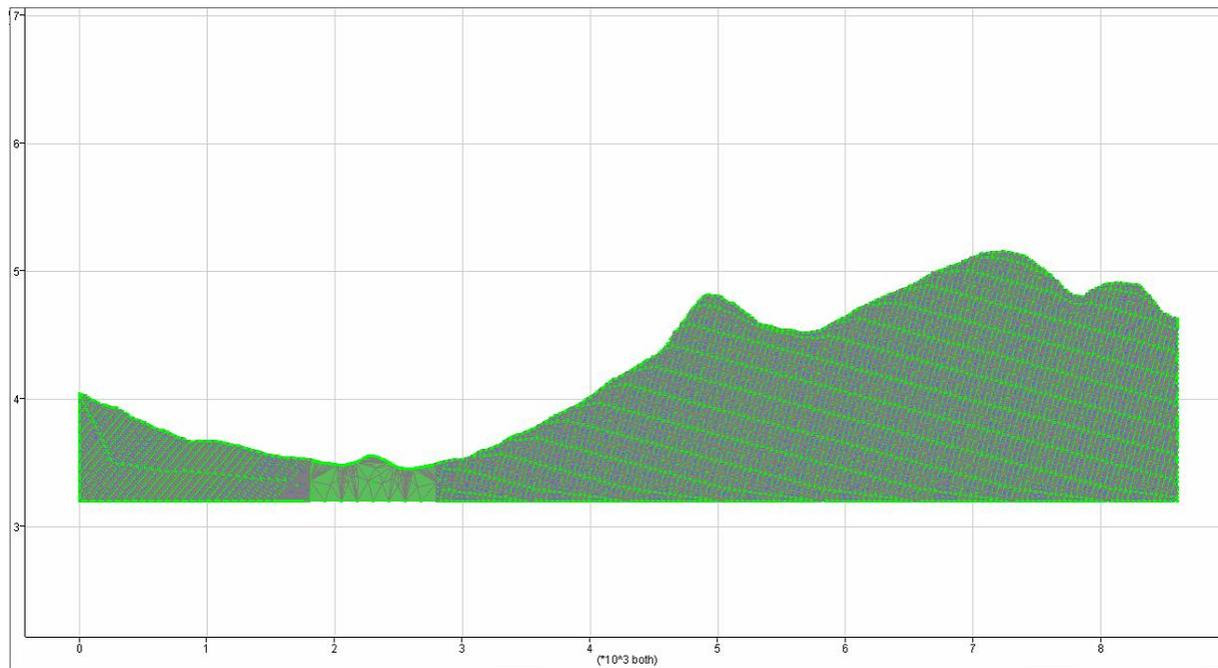


Figura 101: Geometría de la ladera para modelo 1. Se muestran las divisiones de zonas deformables.

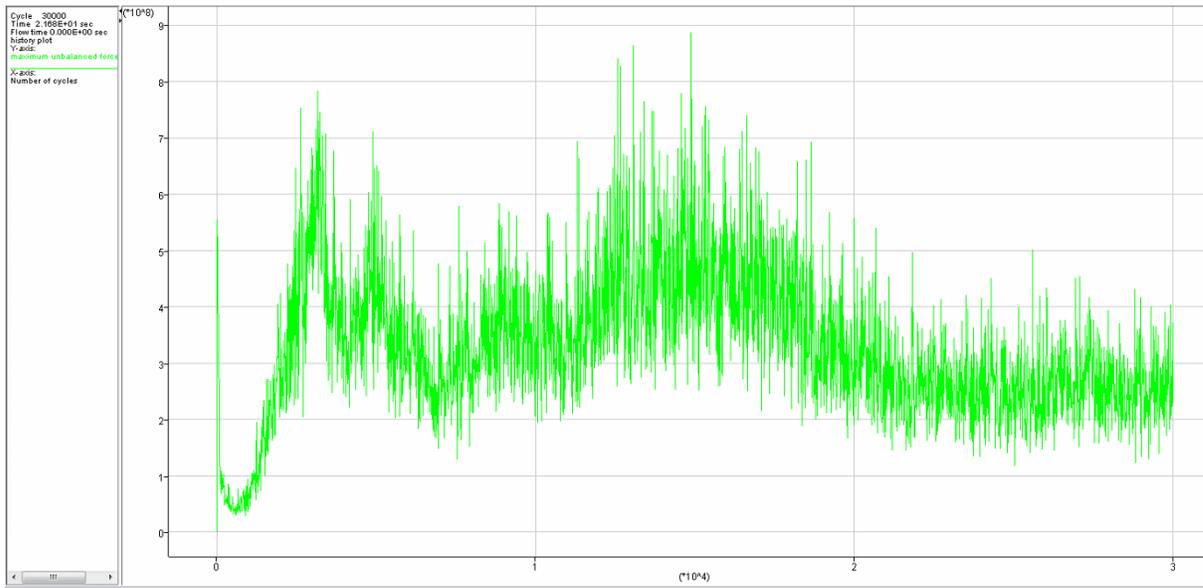


Figura 102: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 1.

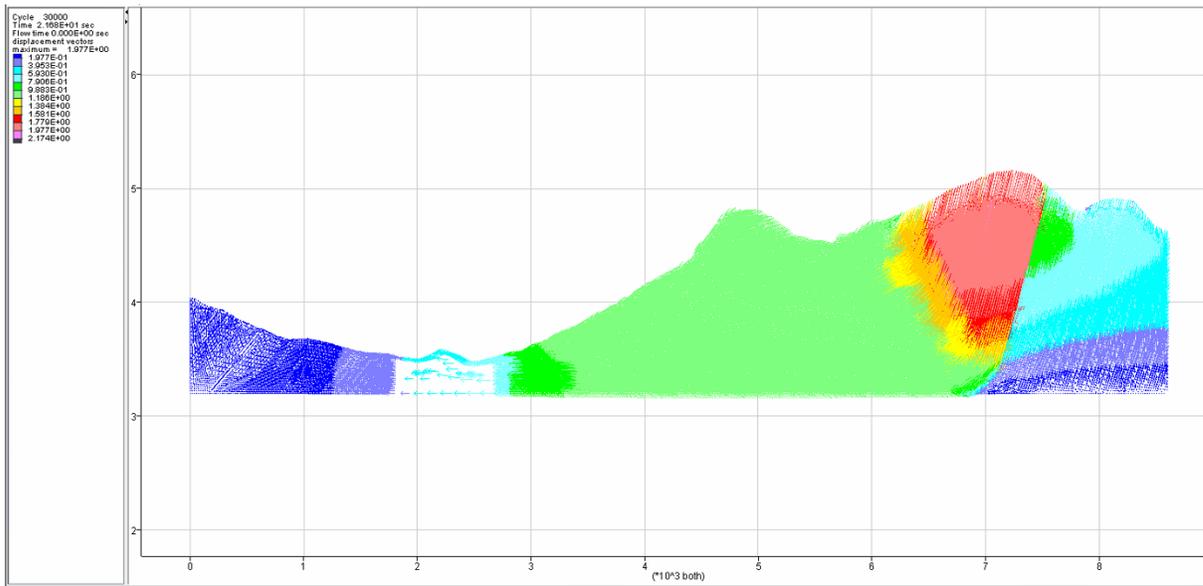


Figura 103: Vectores de desplazamiento para modelo 1.

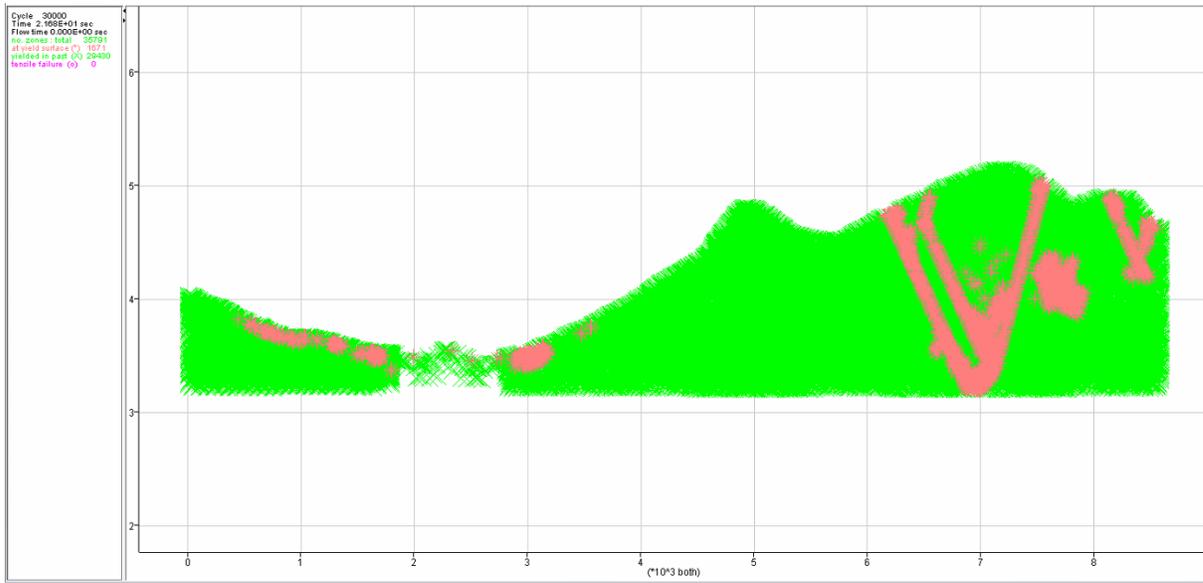


Figura 104: Comportamiento plástico del modelo 1.

Modelo 2

Corresponde al mismo modelo 1 con los sets de estructuras más espaciados.

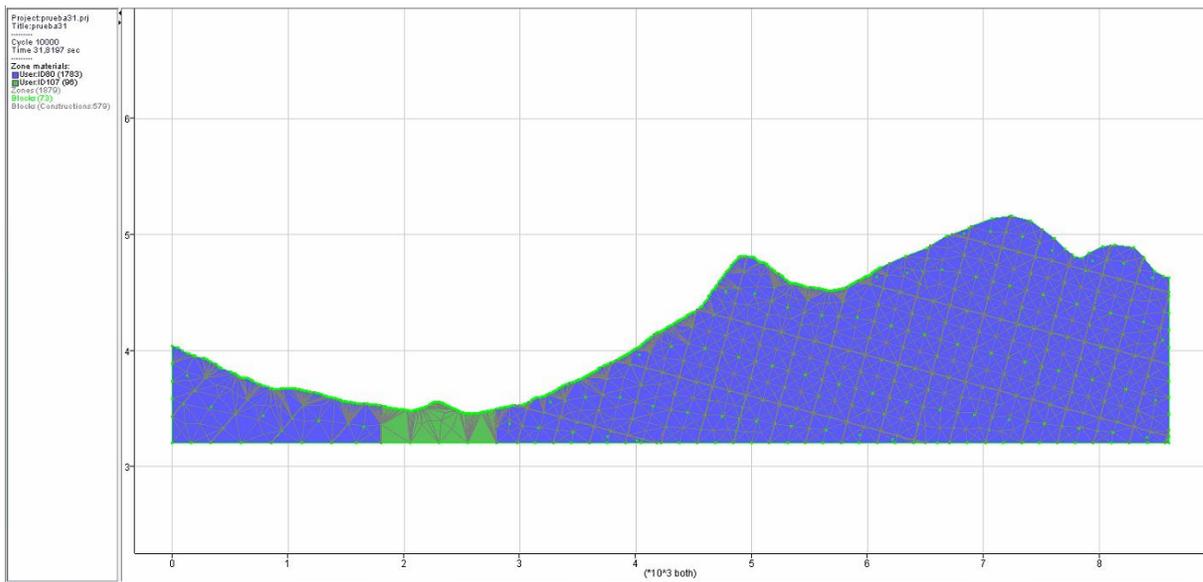


Figura 105: Geometría de la ladera para modelo 2. Se muestran las divisiones de zonas deformables.

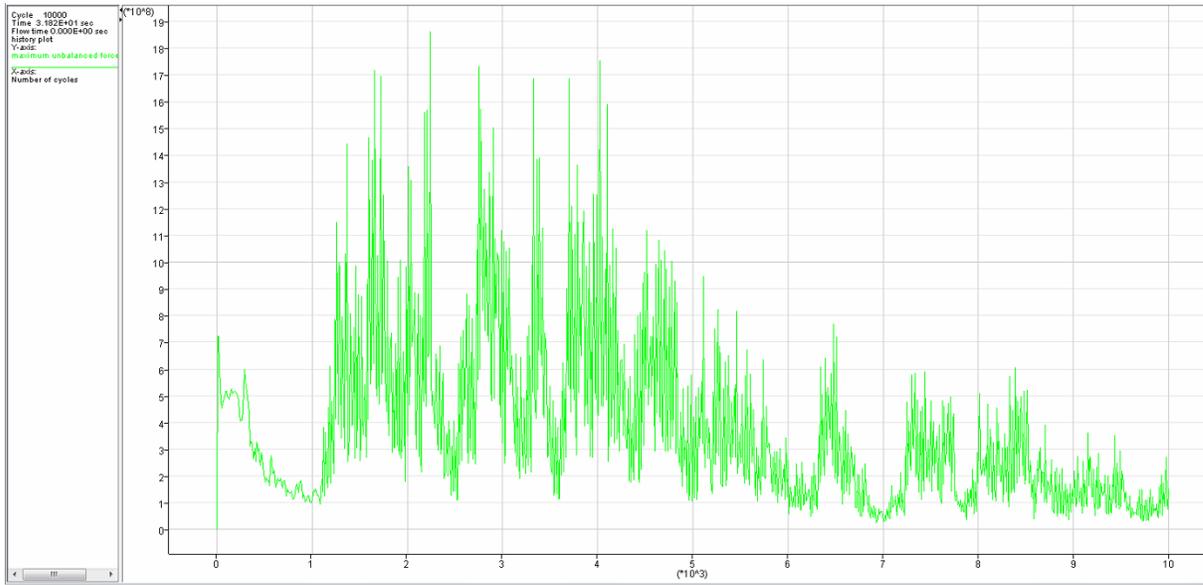


Figura 106: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 2.

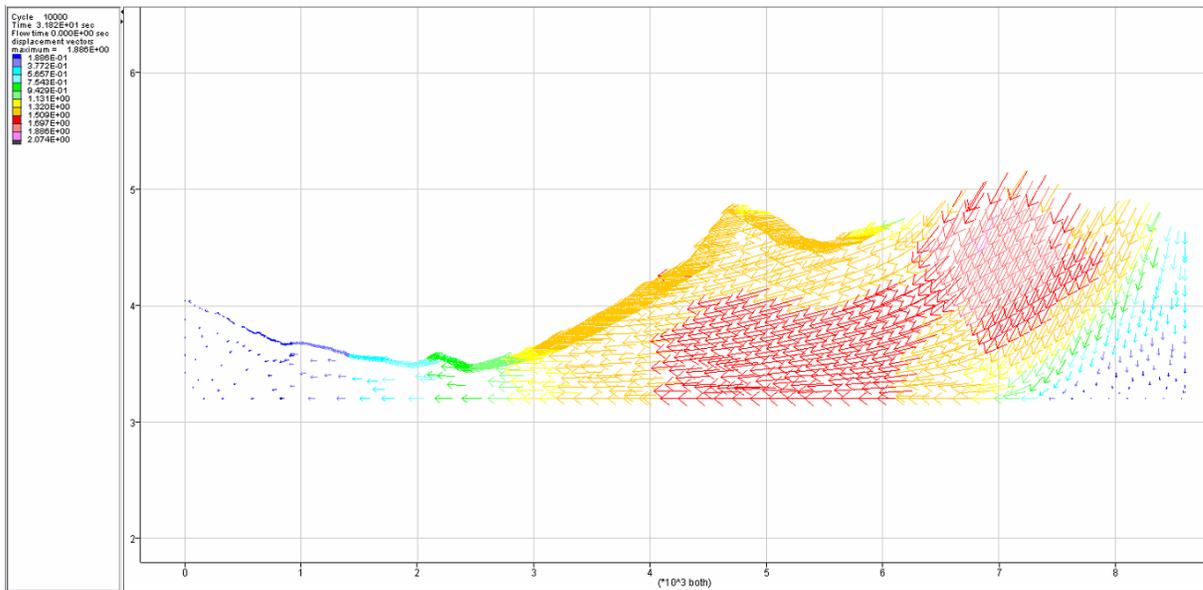


Figura 107: Vectores de desplazamiento para modelo 2.

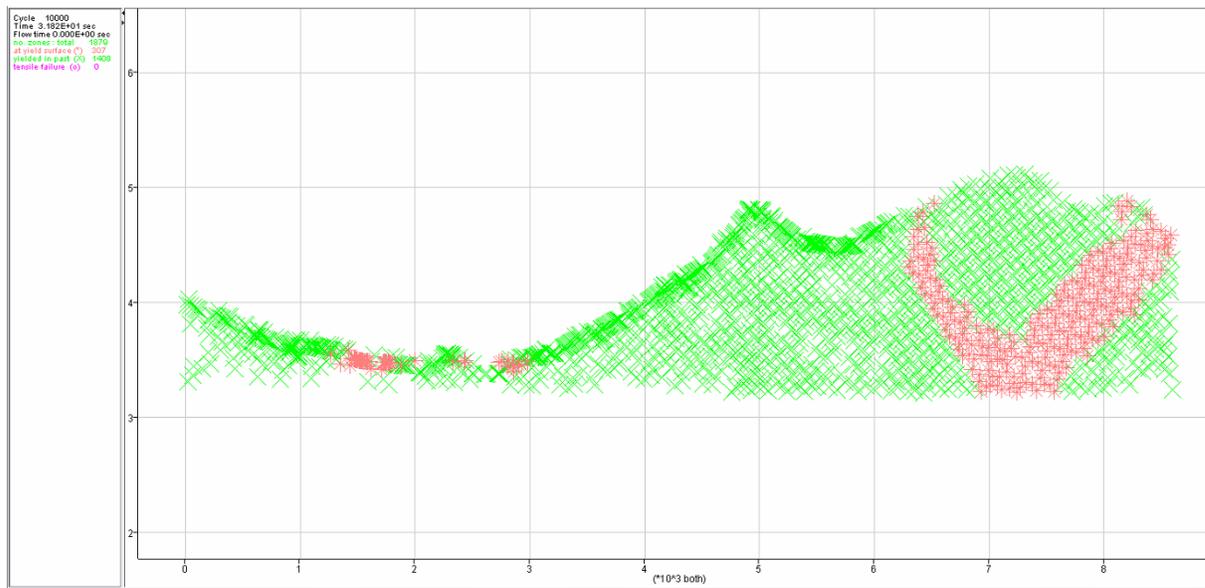


Figura 108: Comportamiento plástico del modelo 2.

Modelo 3

Basado en el modelo 2 con más espaciamento de las estructuras y la geometría de la ladera se extiende hacia el Este (derecha) hasta los 11400m.

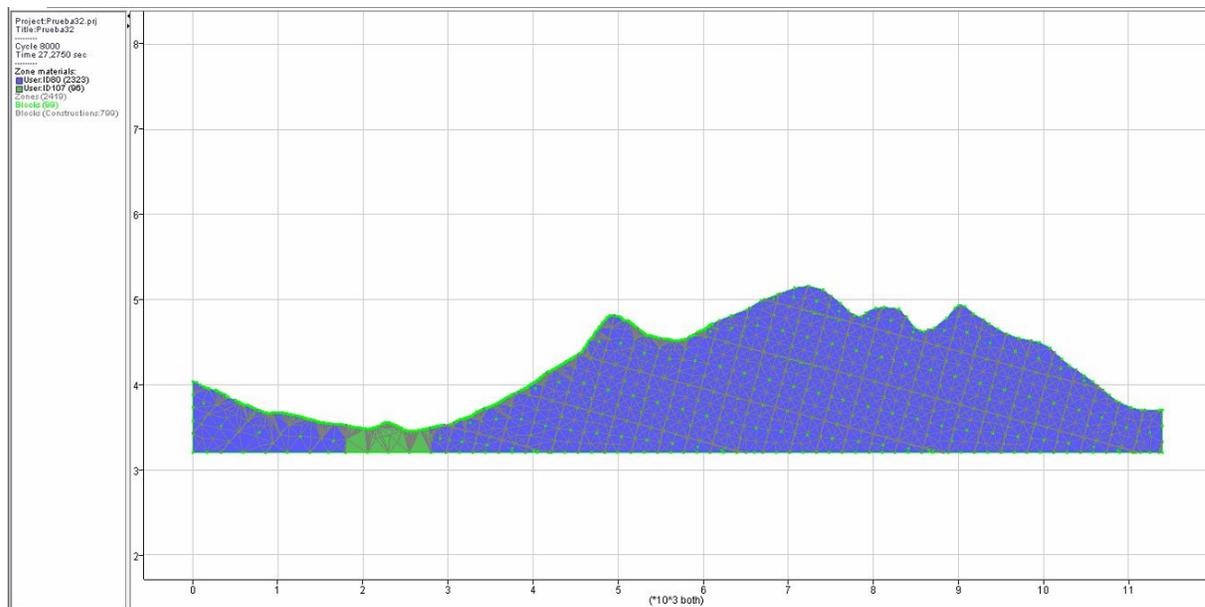


Figura 109: Geometría de la ladera para modelo 3. Se muestran las divisiones de zonas deformables.

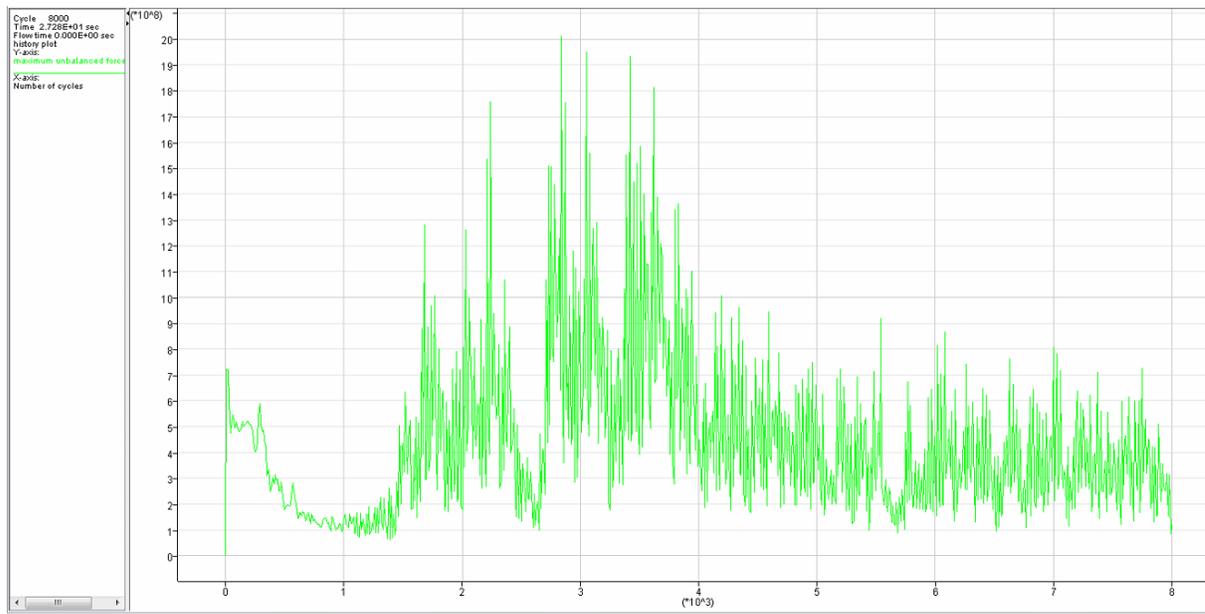


Figura 110: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 3.

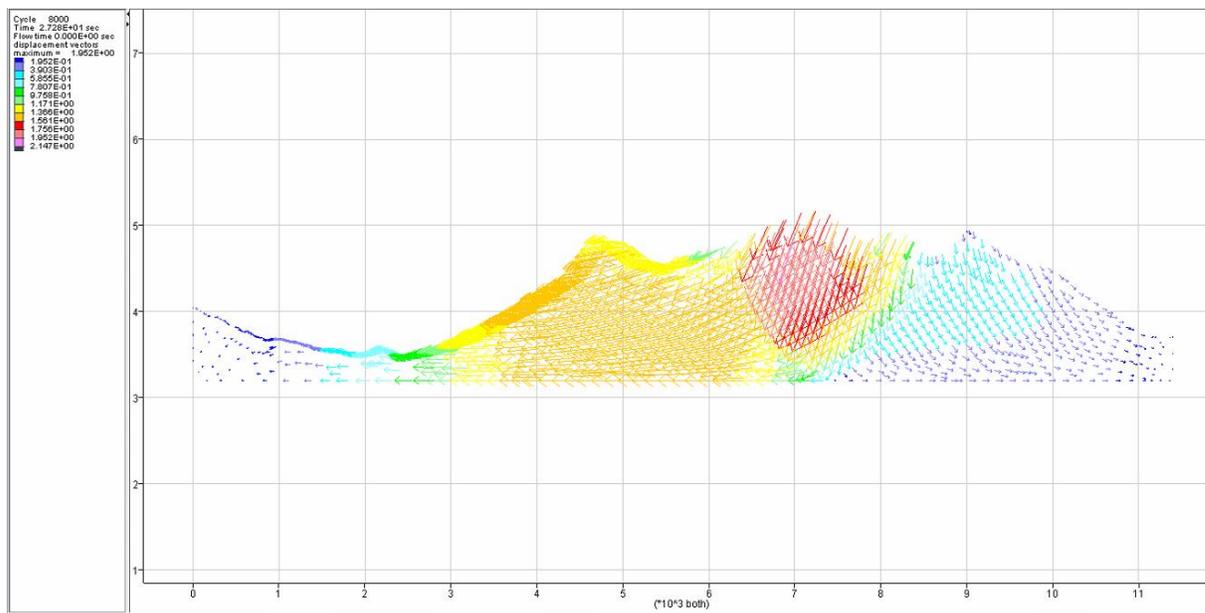


Figura 111: Vectores de desplazamiento para modelo 3.

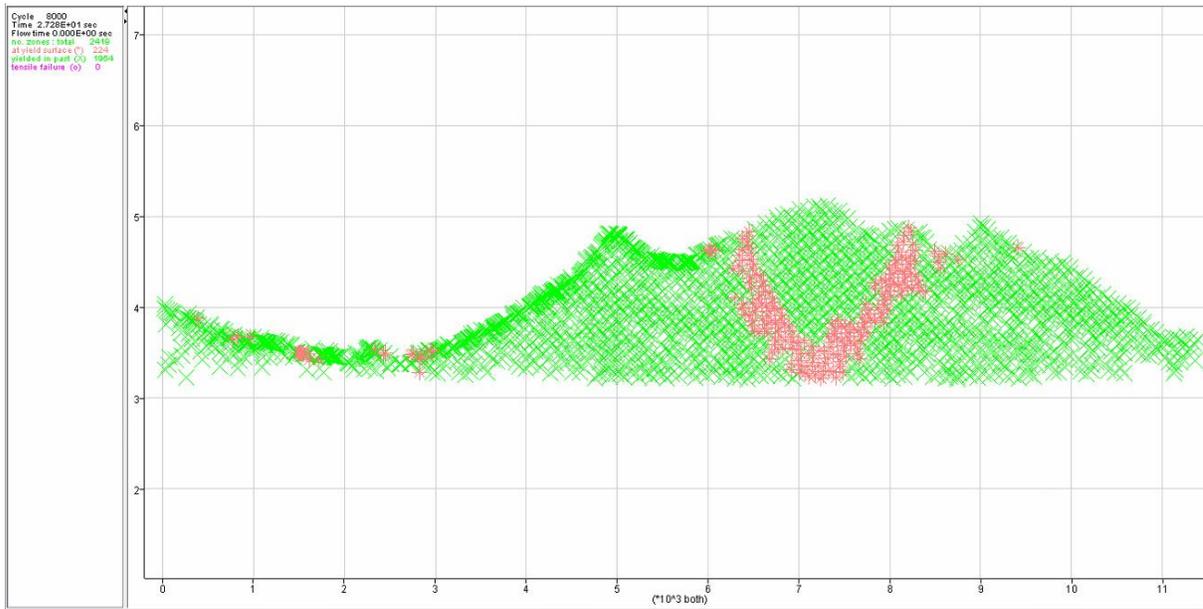


Figura 112: Comportamiento plástico del modelo 3.

Modelo 4

En este caso se mantiene el ancho del perfil del modelo 3, pero la base se corta a los 2200 m de altura (tiene más profundidad). Las estructuras no están dispuestas hasta la base del perfil, se cortan a los 2700 m de altura para el lado Este.

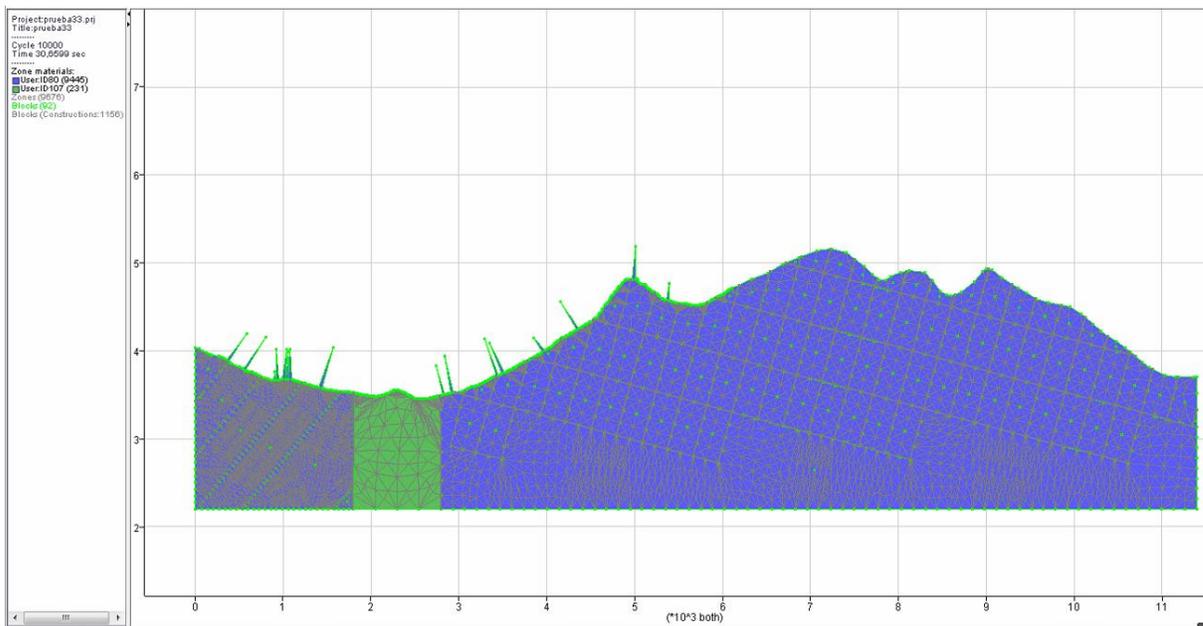


Figura 113: Geometría de la ladera para modelo 4. Se muestran las divisiones de zonas deformables.

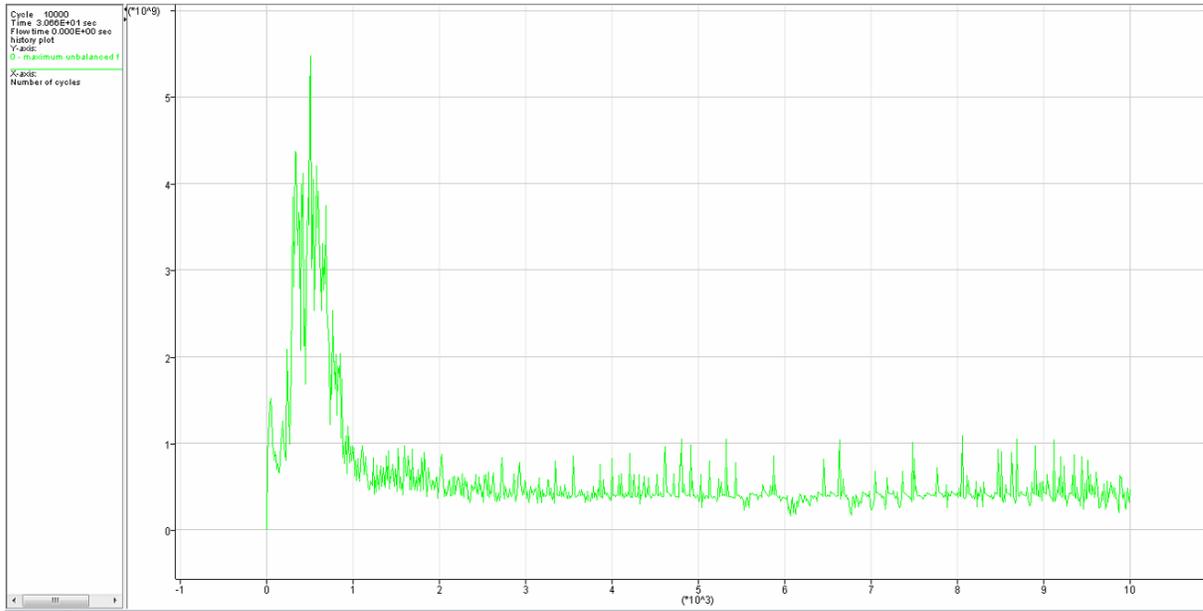


Figura 114: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 4.

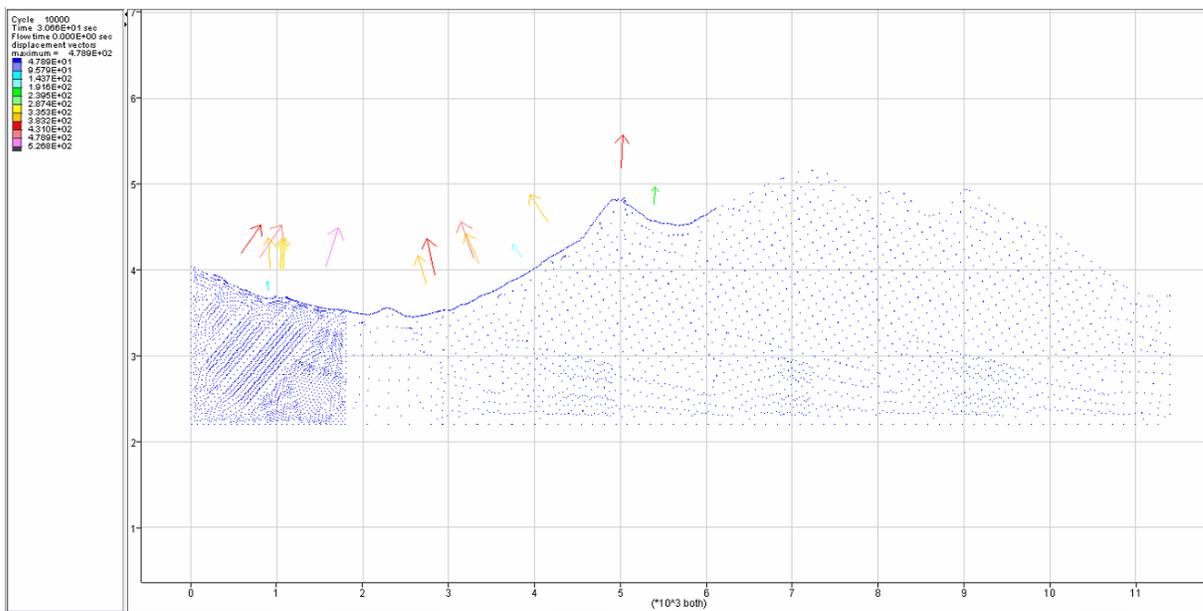


Figura 115: Vectores de desplazamiento para modelo 4.

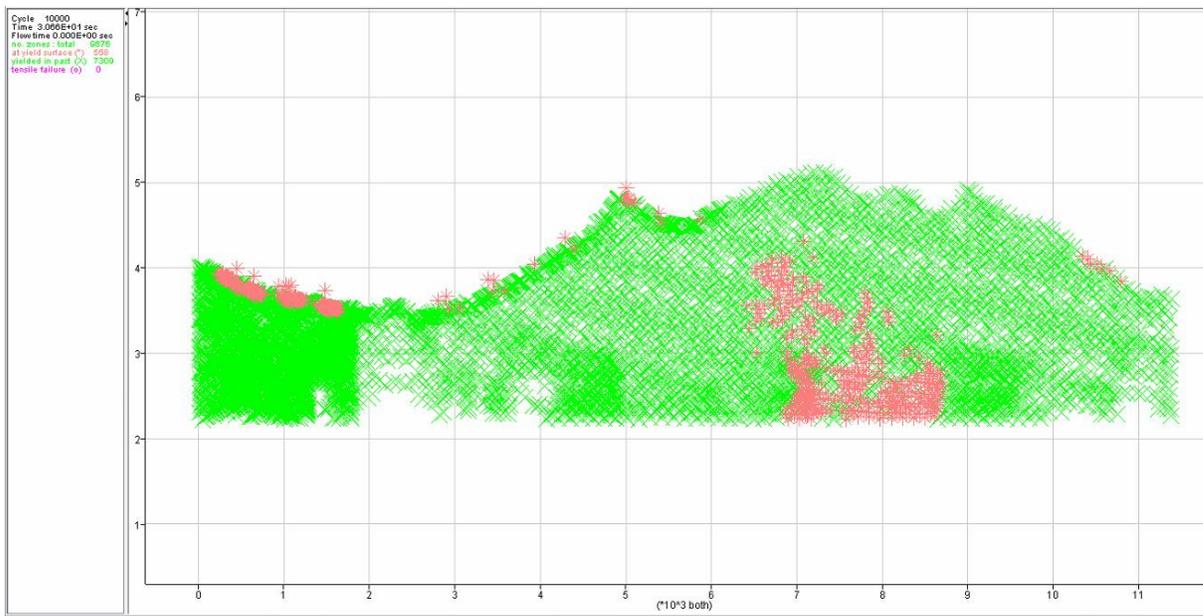


Figura 116: Comportamiento plástico del modelo 4.

Modelo 5

Se mantiene la geometría de la ladera del modelo 4 y las estructuras se disponen en toda la extensión, menos en el intrusivo.

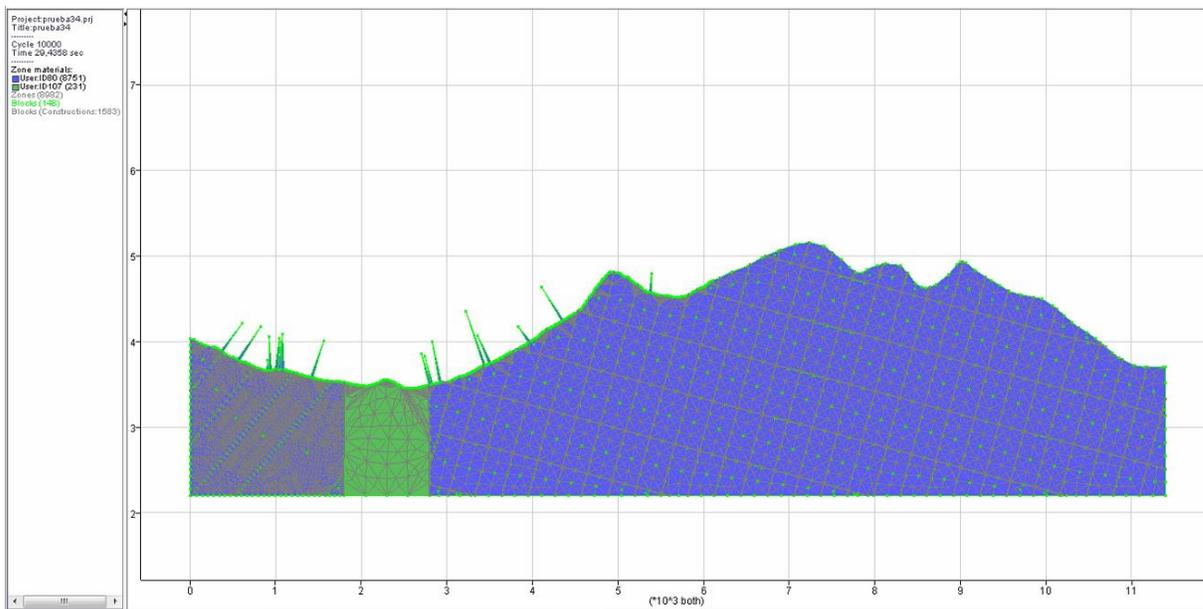


Figura 117: Geometría de la ladera para modelo 5. Se muestran las divisiones de zonas deformables.

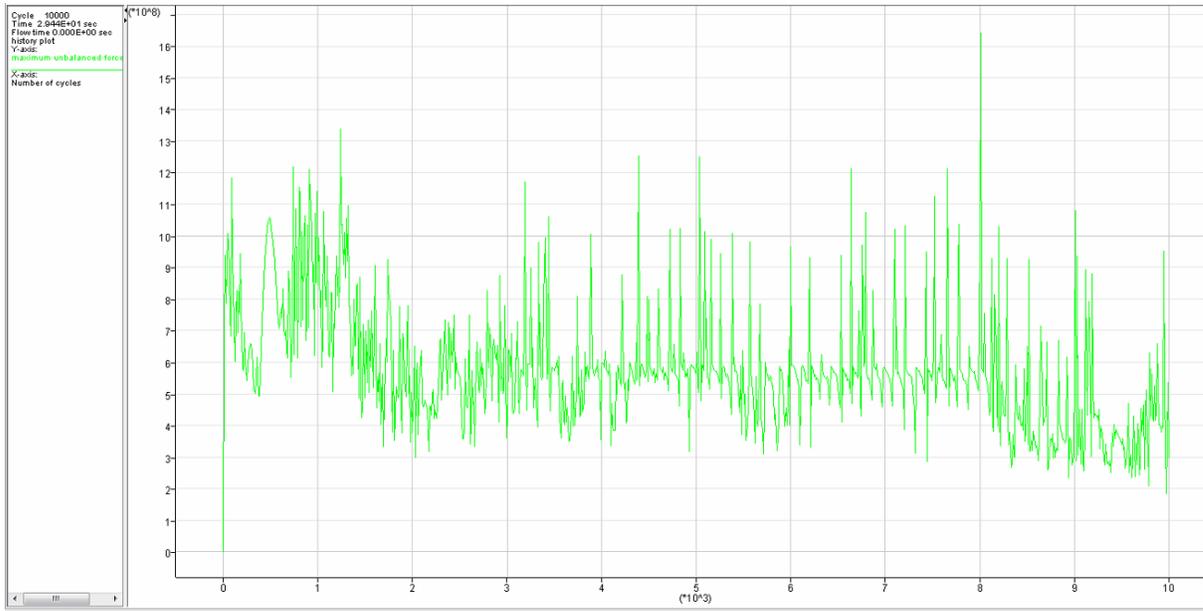


Figura 118: Desequilibrio de energía en el tiempo para modelo 5.

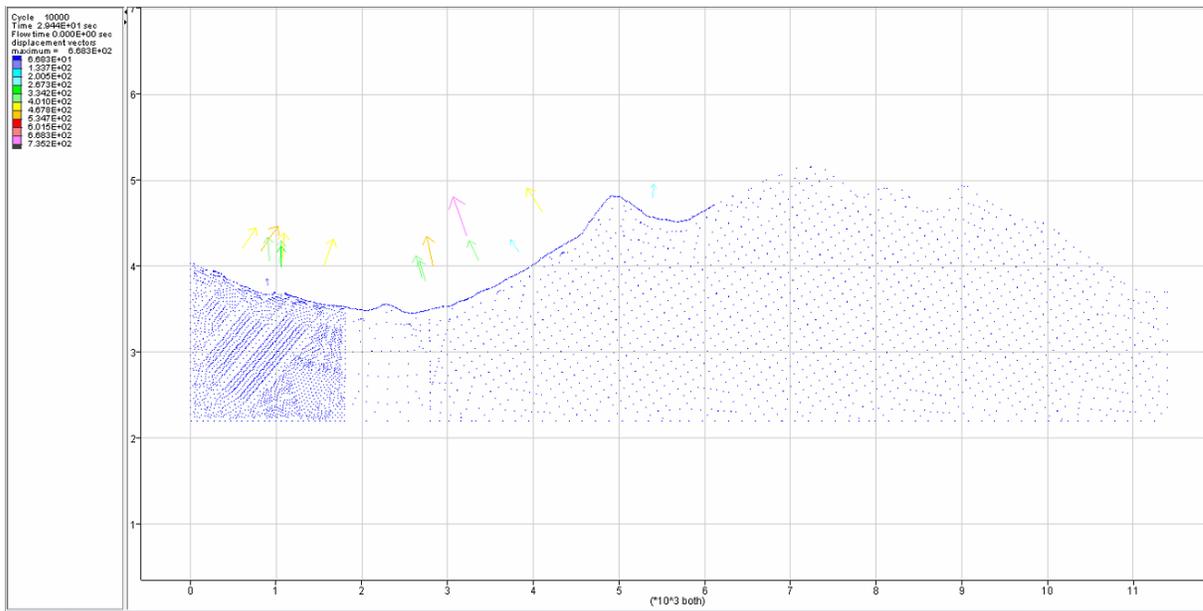


Figura 119: Vectores de desplazamiento para modelo 5.

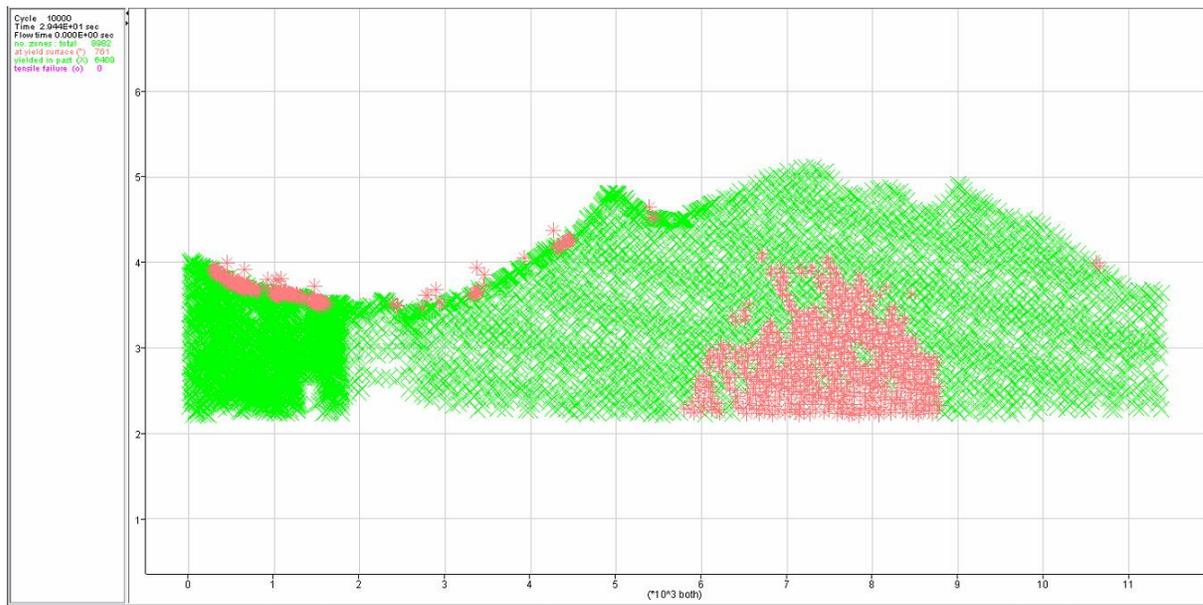


Figura 120: Comportamiento plástico del modelo 5.

Anexo D

Detalle de la validación del modelo estático

En primer lugar, se analiza la geometría del modelo y se extraen las estructuras. Para esto es necesario simplificar la topografía debido a que el programa no permite bloques con bordes discretizados en muchos puntos. Se prueba eliminando uno de cada dos puntos de la topografía, luego tres y cinco, hasta percatarse de que, dejando un punto de cada diez puntos, UDEC admite ejecutar la geometría. Las Figuras 121, 122 y 123 muestran los nuevos desplazamientos de los puntos de control, la energía en desequilibrio y el comportamiento plástico del modelo base sin estructuras.

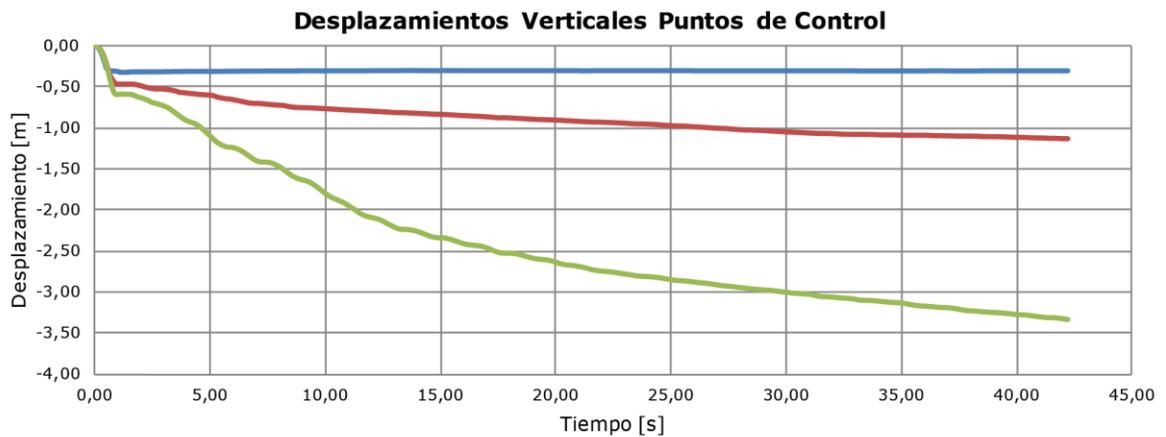
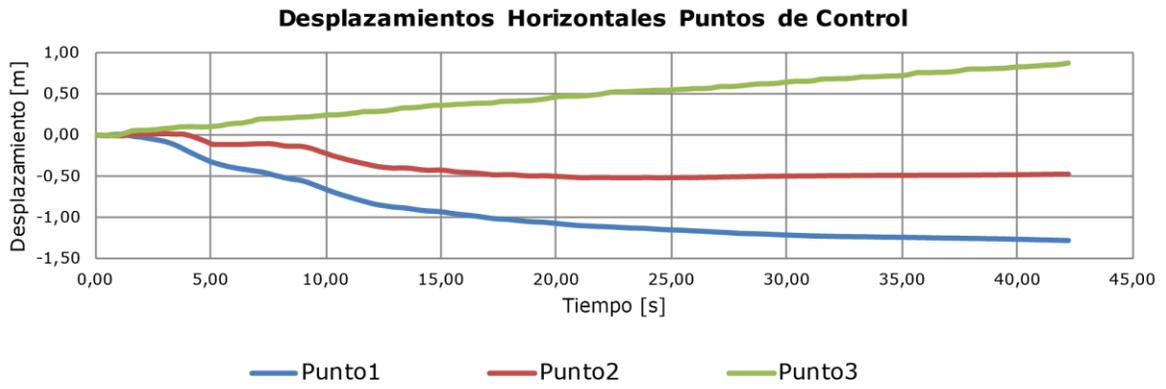


Figura 121: Desplazamientos horizontales y verticales para el modelo base sin estructuras.

Los desplazamientos horizontales en este caso presentan un comportamiento estable para los puntos de control 1 y 2, alcanzando valores de 1,25m y 0,5m respectivamente, moviéndose hacia la izquierda del modelo (desplazamiento negativo en el eje cartesiano). La misma conducta se observa para el desplazamiento vertical del punto 1 que se estabiliza a los 0,3 m antes de que transcurra 1 segundo de caída. Para el punto 3 no se produce estabilización, ya que ambos deslizamientos, horizontal (positivo) y vertical (negativo), aumentan en todo el transcurso de la ejecución alcanzando los 0,9m y 3,3m respectivamente. El deslizamiento vertical del punto 2 aumenta muy lentamente tendiendo a estabilizarse a los -1,1m.

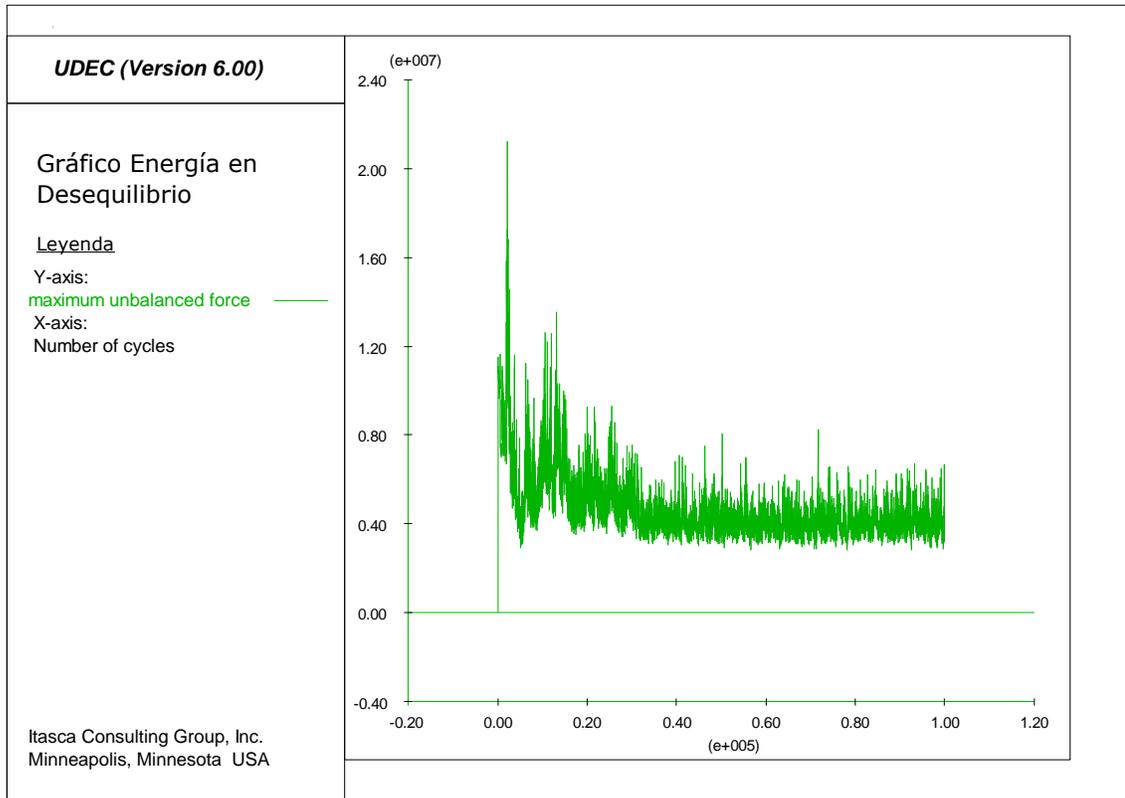


Figura 122: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo base sin estructuras.

La Figura 122 presenta una baja disminución de la energía en desequilibrio, pero inestable con oscilaciones que decaen al orden de $3,9 \cdot 10^6$ N luego de los 100000 ciclos de computo, por lo que, nuevamente el modelo es clasificado como inestable. Además, en la Figura 123 se puede observar que igualmente se genera a la derecha del modelo una zona irregular que supera el límite elástico, lo que ratifica la categorización anterior.

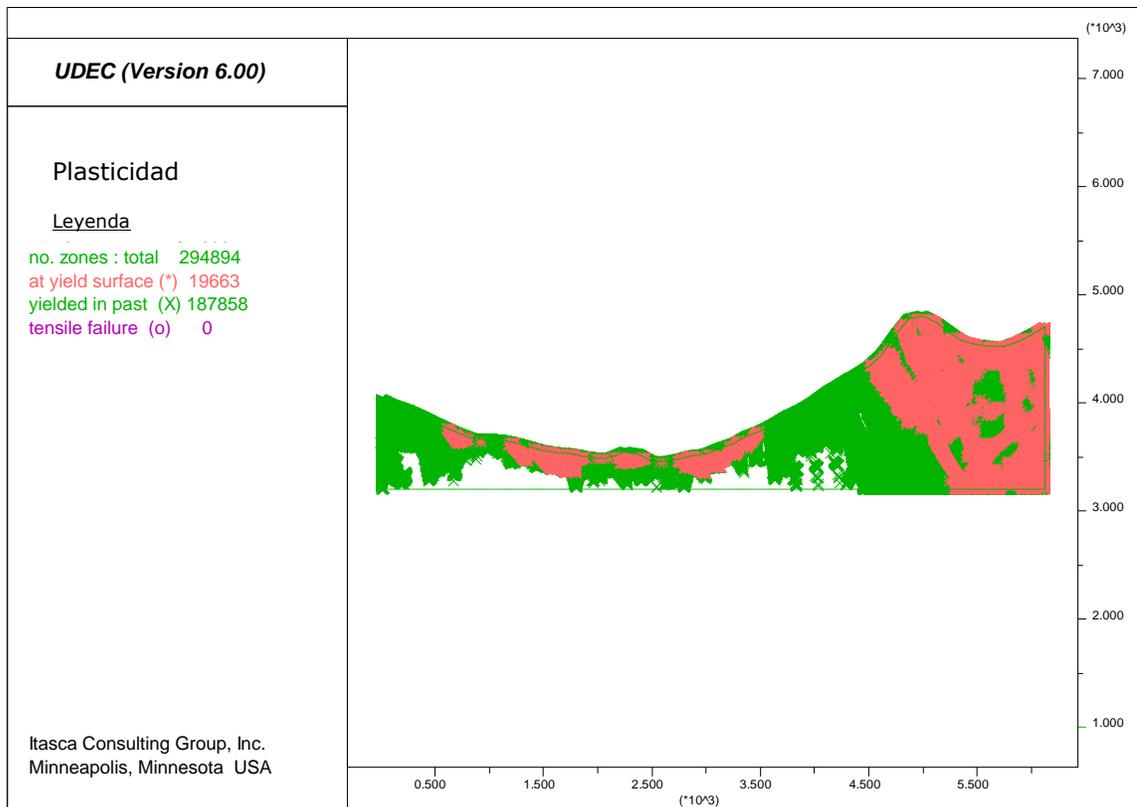


Figura 123: Comportamiento plástico del modelo base sin estructuras. Zonas rosadas sobrepasan el esfuerzo de fluencia.

Con los resultados presentados se descarta que la geometría de bloques, proporcionada por la disposición de las estructuras, es la causante de la inestabilidad del modelo, por lo que se realiza un análisis del tamaño de la ladera modelada. La geometría base es disminuida, cortando el esquema a los 2000m y 5000m en la horizontal para eliminar los bloques laterales. Los puntos de control no sufren mayor modificación excepto por el punto 3 que se sitúa fuera del nuevo modelo por lo que es modificado y ubicado en hacia la base del talud.

Las Figuras 124, 125 y 126 exponen los resultados de desplazamientos de puntos de control, energía en desequilibrio y comportamiento plástico respectivamente, luego de la ejecución del modelo simplificado.

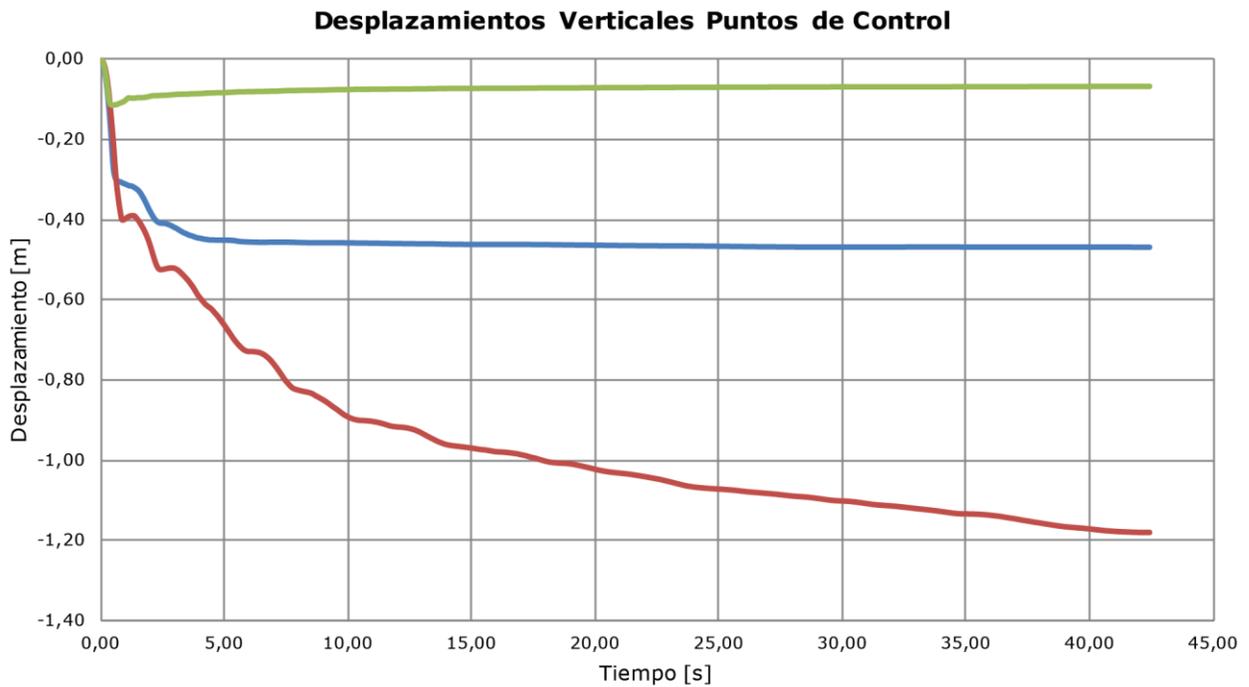
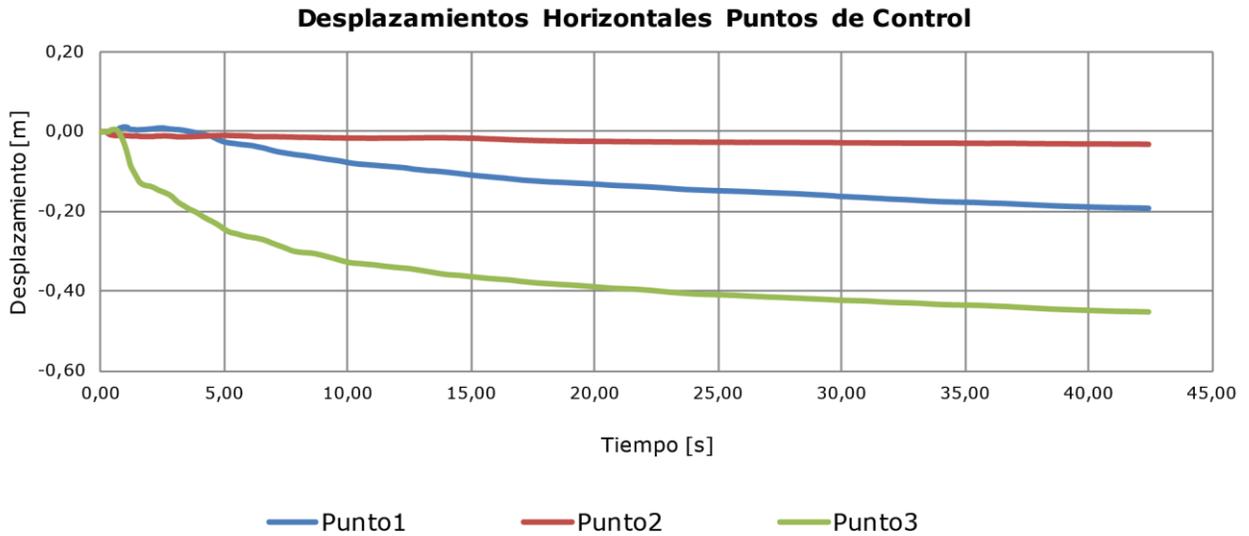


Figura 124: Desplazamientos horizontales y verticales para el modelo simplificado.

Se observa en la Figura 124 que los desplazamientos horizontales son menores en magnitud que los desplazamientos verticales. El punto 2 alcanza a moverse 1,2m aproximadamente en dirección vertical negativa, siendo el mayor desplazamiento producido, pero en la horizontal se estabiliza rápidamente antes de transcurrir 1 segundo. Los puntos 1 y 3b manifiestan los mismos comportamientos, pero con distintas magnitudes. En dirección vertical se estabilizan luego de los 5 segundos y en la horizontal aumentan negativamente (se mueven hacia el oeste) levemente sin observar una estabilización evidente.

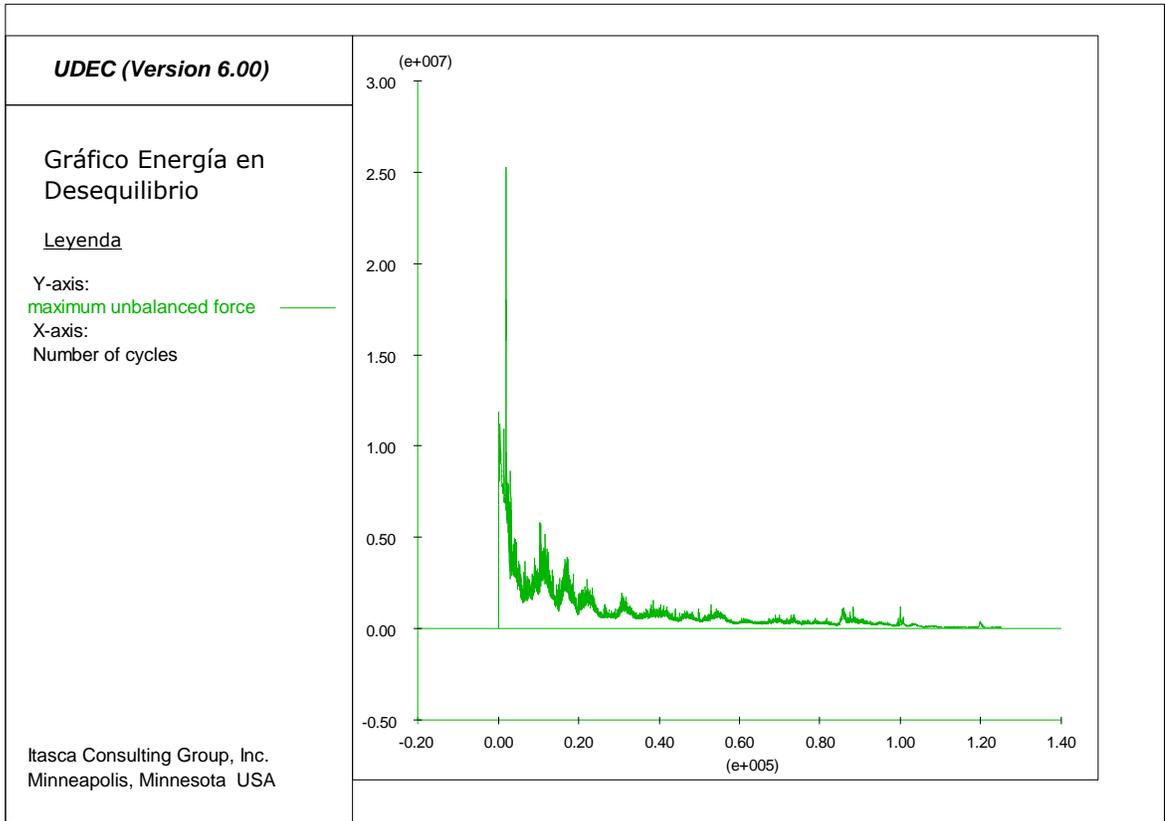


Figura 125: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo simplificado.

En el gráfico de la Figura 125 se identifica un descenso de la energía en desequilibrio mayor comparado con los casos anteriores y con menos oscilaciones, llegando a un valor mínimo del orden de $8,7 \cdot 10^4 \text{N}$, lo cual no representa acabadamente el equilibrio. El comportamiento plástico de la Figura 126 respalda esta observación debido a que se vuelven a identificar las superficies que superan el esfuerzo de fluencia principalmente en la zona lateral derecha del modelo, lo cual implica que el modelo está fallando y no se obtiene un caso estático.

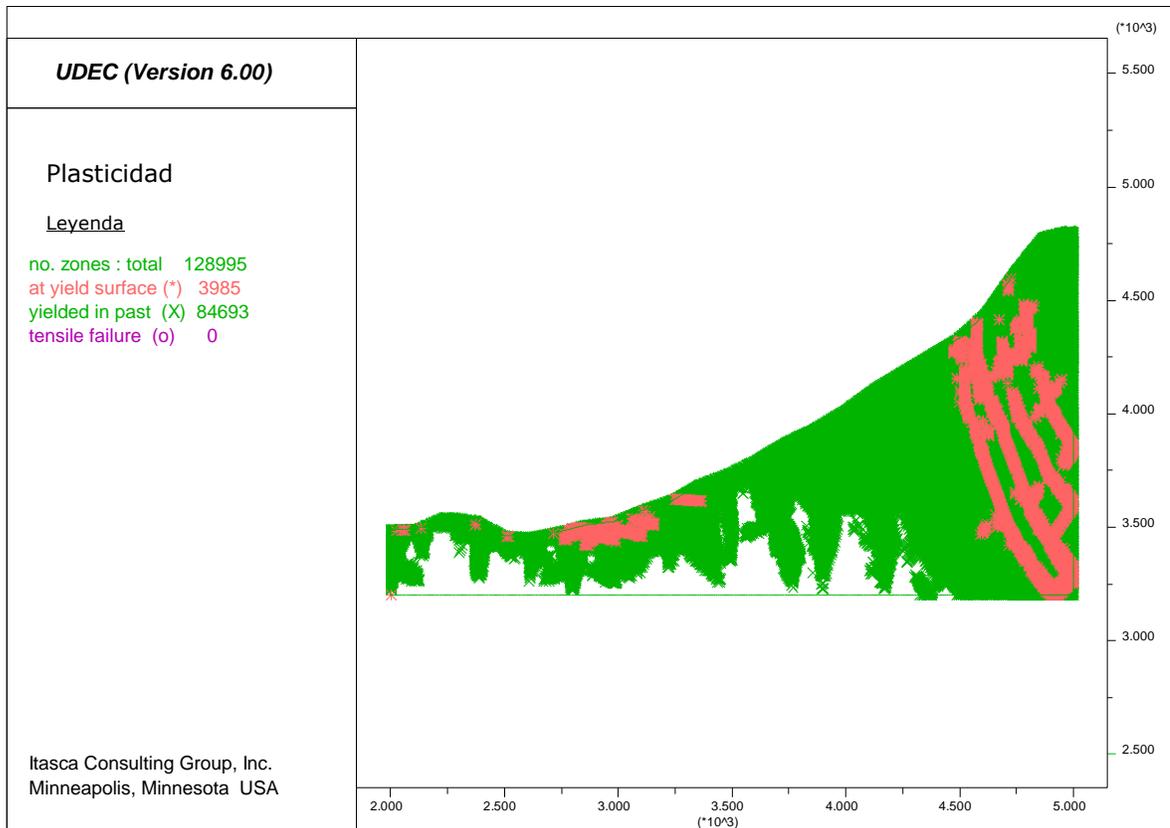


Figura 126: Comportamiento plástico del modelo simplificado. Zonas rosadas sobrepasan el esfuerzo de fluencia.

Como al cambiar la geometría del esquema se sigue teniendo un modelo inestable, se procede a analizar los modelos constitutivos de bloques. El criterio de ruptura utilizado en todos los modelos anteriores fue Hoek-Brown, el cual depende de una variedad de parámetros que fueron descritos en las secciones anteriores. Dado que no se tiene conocimiento de los valores locales de estos parámetros, los cuales fueron asignados por analogías y bibliografía, es complicado intentar cambiarlos para mejorar la estabilidad de los modelos. Además, es difícil asignar y comparar la magnitud de la estabilidad con varios parámetros que pueden ser modificados. Por lo anterior, se transforman los valores al criterio de Mohr-Coulomb (a través del programa Roclab) que es más utilizado y estudiado en problemas simples. Con los datos entregados se obtiene una cohesión de 3,9MPa y un ángulo de fricción de 25,8° que se relaciona con un macizo rocoso de regular a mala calidad geotécnica según la clasificación propuesta por Hoek, & Brown (1997). En el caso del intrusivo de granito, se obtiene una cohesión de 14,3MPa y un ángulo de fricción de 40,9°.

Los resultados de deslizamientos en los puntos de control se muestran en la Figura 127, mientras que las fuerzas desbalanceadas y la plasticidad se indican en las Figuras 128 y 129 respectivamente.

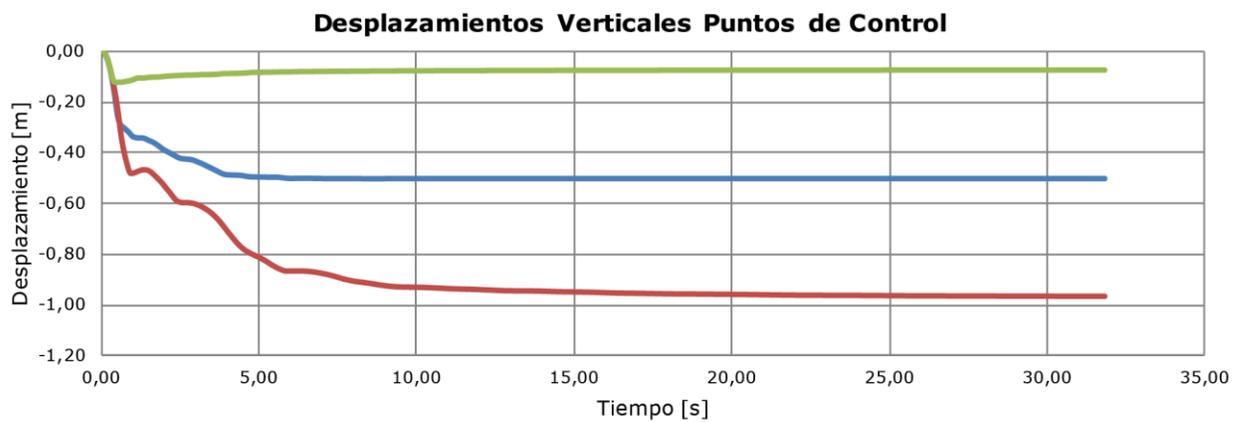
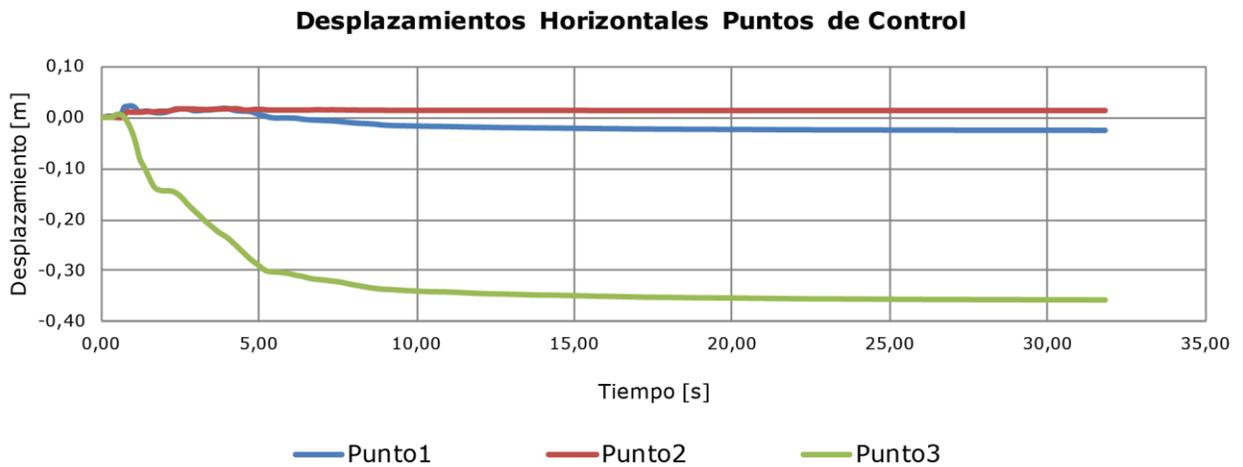


Figura 127: Desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de control para el modelo simplificado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.

Se puede notar de la Figura 127, que los desplazamientos verticales alcanzan mayor magnitud, con un máximo cercano a 1m para el punto 2. Se aprecia que todos los valores en todos los puntos convergen a distintas magnitudes y a distintos tiempos, por lo que se consideran estables. En la horizontal lo puntos 1 y 2 se desplazan muy poco a diferencia del punto 3b que alcanza a moverse 0,35m hacia el oeste.

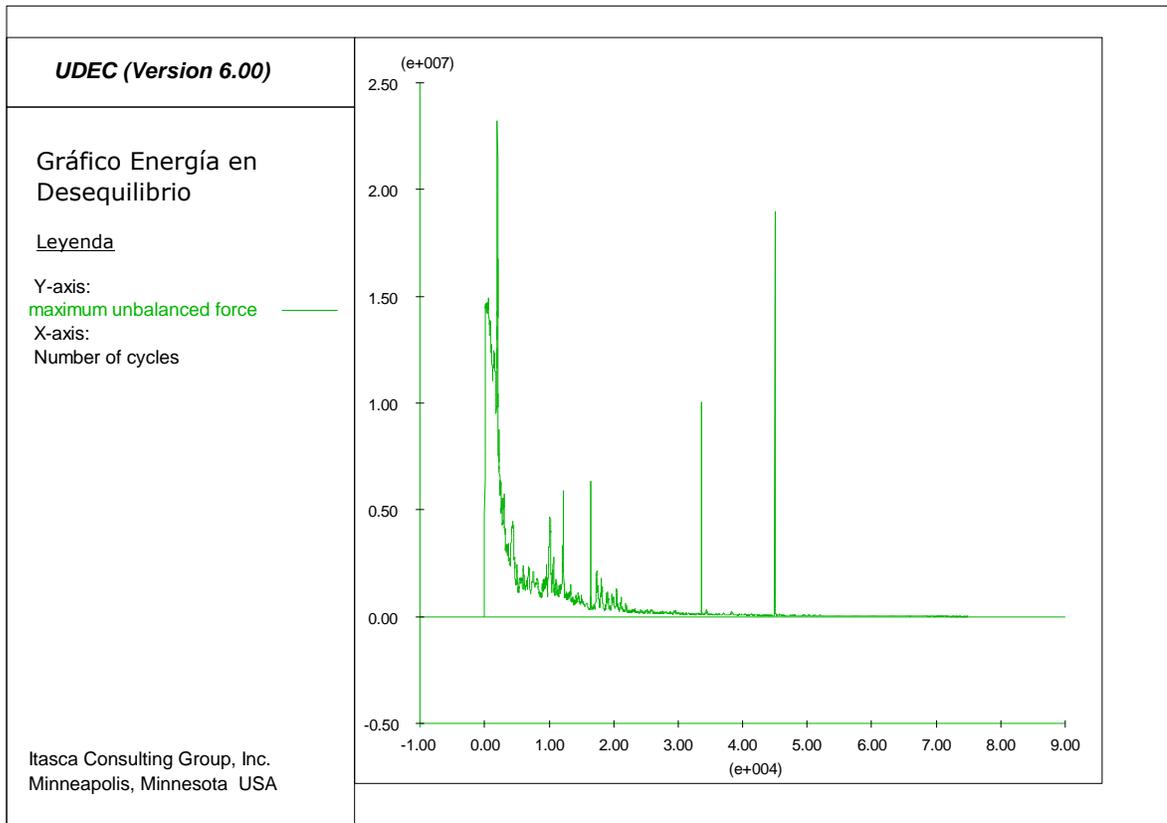


Figura 128: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo simplificado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.

La energía en desequilibrio por ciclo graficada en la Figura 128 indica un descenso irregular donde se pueden identificar varios puntos aislados donde sube la razón drásticamente comparada con los ciclos colindantes. Finalmente, la energía converge a una magnitud del orden de $1 \cdot 10^4 N$, muy similar al valor indicado en el caso anterior con el modelo de Hoek-Brown. Al observar la Figura 129 se identifican nuevamente estas zonas que superan el esfuerzo de fluencia y con una distribución muy similar al modelo anterior (hacia lado derecho del esquema), pero diferenciándose en la cantidad. En el modelo anterior se observan más zonas plastificadas. Por lo anterior, y a pesar de que los puntos de control se estabilizan, este caso no es considerado como estático, aunque es el modelo más estable ejecutado.

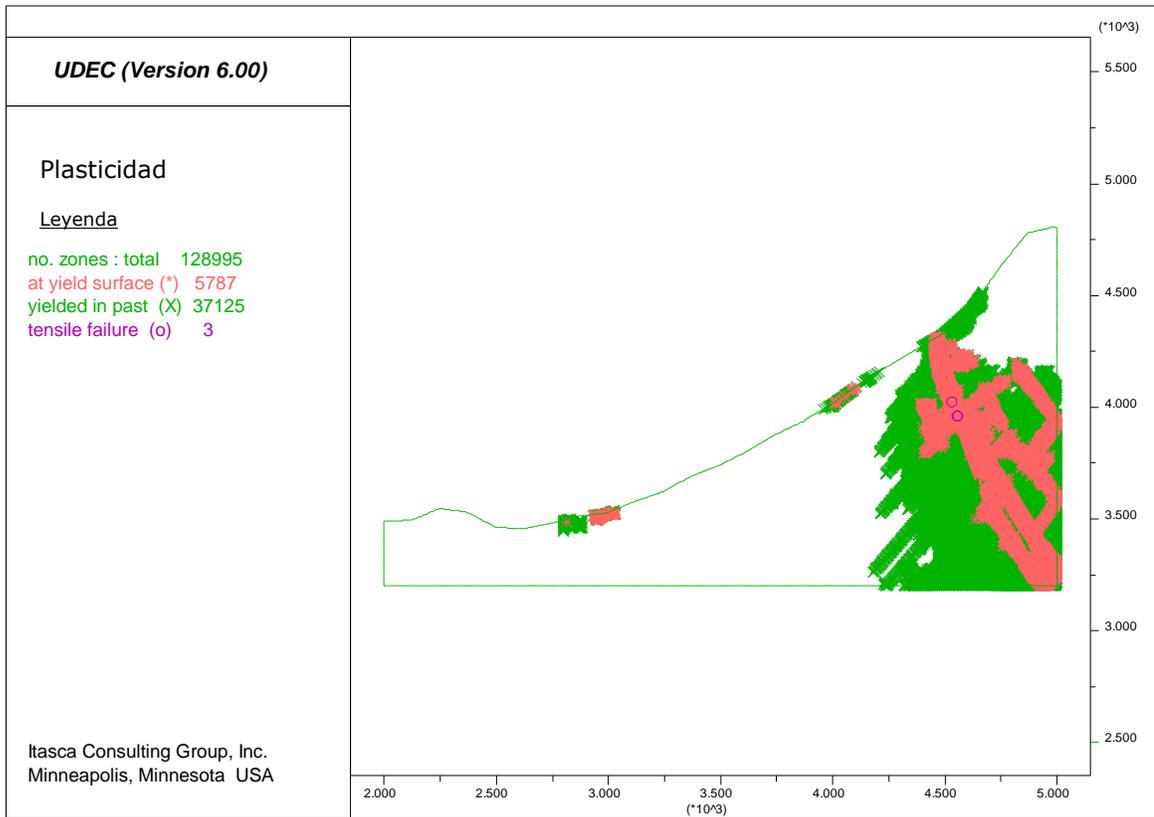


Figura 129: Comportamiento plástico del modelo simplificado aplicando el criterio de Mohr-Coulomb para bloques. Zonas rosadas sobrepasan el esfuerzo de fluencia.

Para continuar, es necesario aumentar los parámetros de resistencia de Mohr-Coulomb tratando de llegar a la estabilidad. Se escoge un valor de cohesión de 8MPa con un ángulo de fricción de 30°.

Los resultados de desplazamientos, energía y plasticidad se muestran en las Figuras 130, 131 y 132.

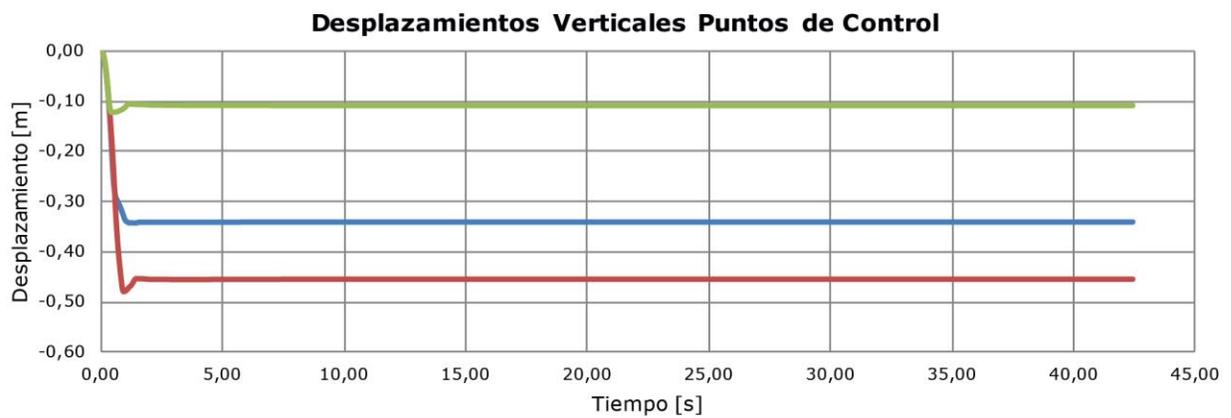
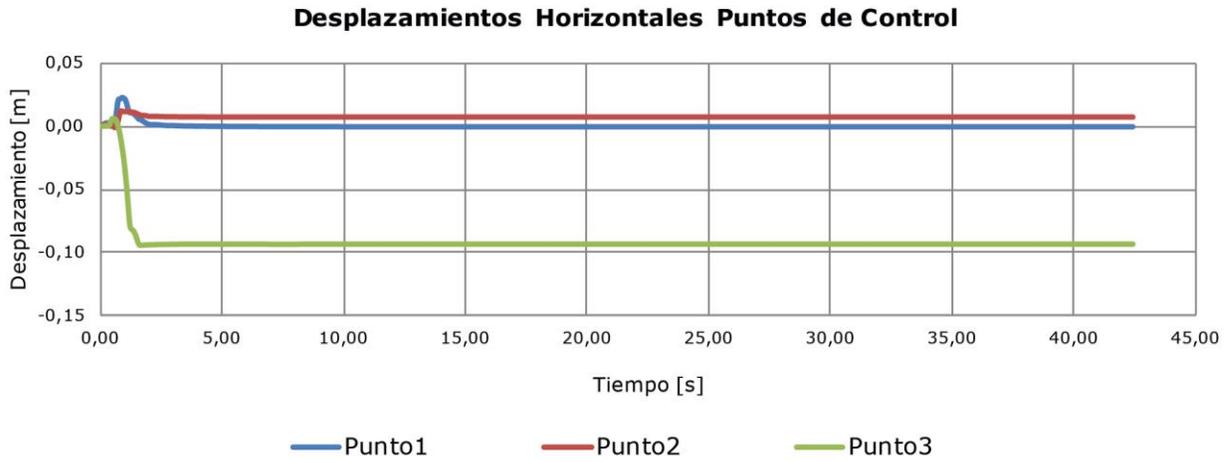


Figura 130: Desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de control para el modelo simplificado y estabilizado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.

Se considera que el movimiento de los puntos de control se estabiliza ya que convergen y alcanzan un único valor en todas las componentes al inicio de la simulación. El deslizamiento máximo se produce en la vertical en el punto 2 con 0,45m, seguido del 1 y del 3b, todos negativos. En la horizontal los puntos 1 y 2 se movilizan muy poco y el punto 3b no sobrepasa los 0,1m.

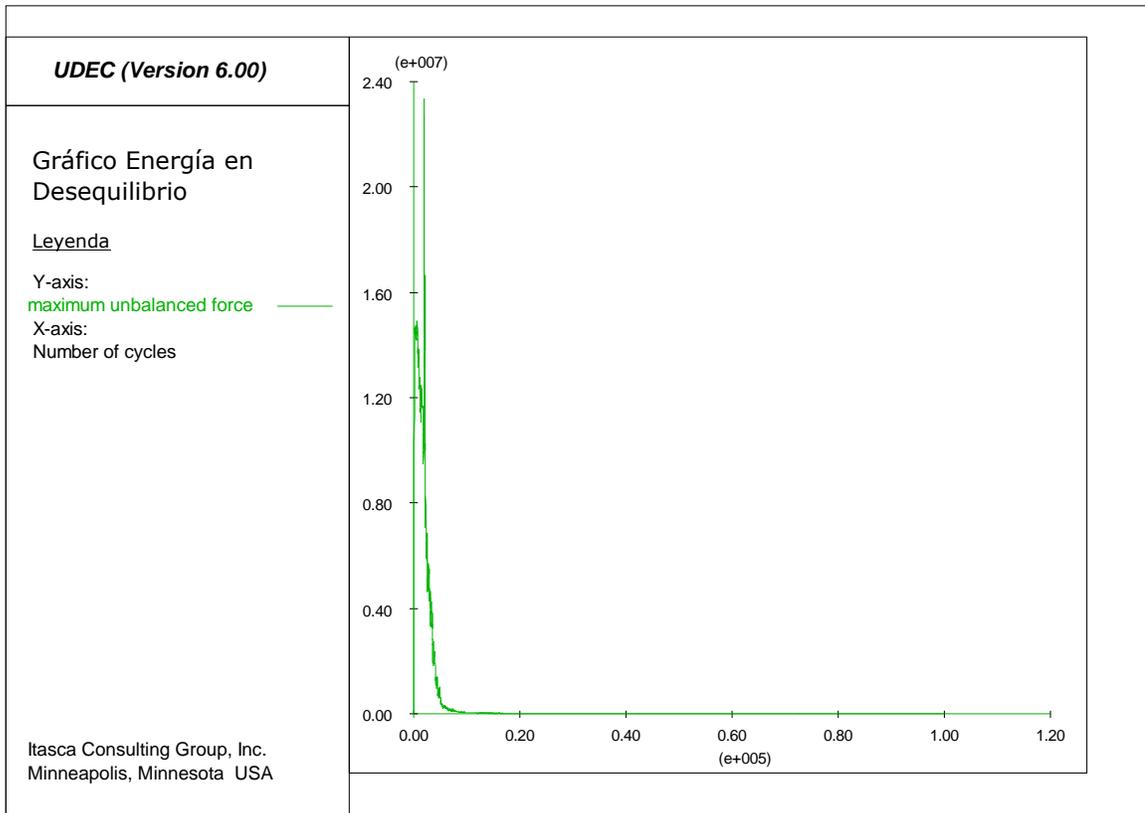


Figura 131: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo simplificado y estabilizado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.

La energía en desequilibrio desciende rápidamente sin presentar mayores oscilaciones o *peaks* aislados y converge a un valor de 2,5N a los 100000 ciclos, mucho más bajo que los valores anteriormente registrados. El comportamiento plástico no indica zonas activas que superen el esfuerzo de fluencia, solo se generan zonas antiguas de plastificación en el extremo inferior derecho del modelo. Se considera que esta configuración representa el estado estático buscado al encontrarse en equilibrio los tres criterios analizados.

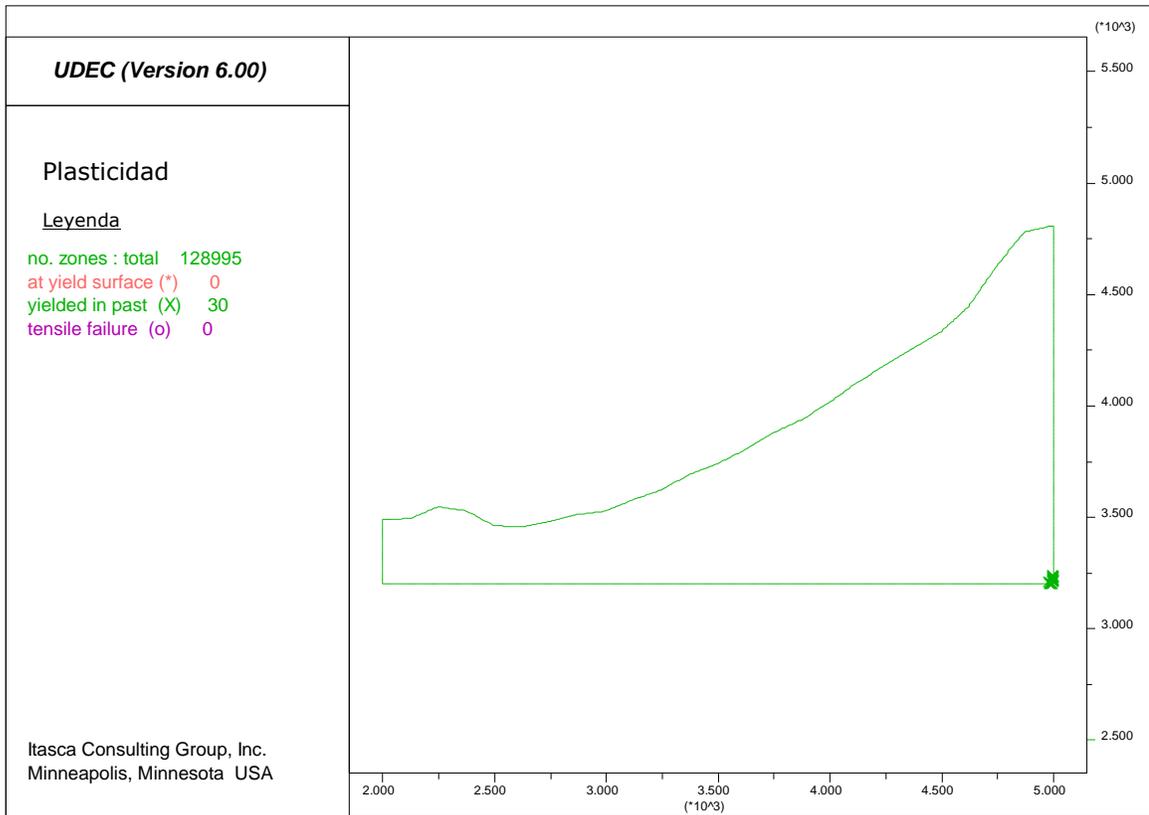


Figura 132: Comportamiento plástico del modelo simplificado y estabilizado aplicando el criterio de Mohr-Coulomb para bloques. No se observan zonas rosadas que sobrepasen el esfuerzo de fluencia.

Anexo E

Validación modelo estático seleccionado

Las fuerzas en desequilibrio se muestran en la Figura 134, mientras que los desplazamientos de puntos de control y el comportamiento plástico se exponen en las Figuras 133 y 135. Se observa que el modelo cumple con las condiciones para representar un caso estático ya que los puntos de control se estabilizan, las fuerzas desbalanceadas decaen a un valor muy bajo de $2 \cdot 10^3 \text{N}$ y no se observan zonas que superen el esfuerzo de fluencia en el comportamiento plástico.

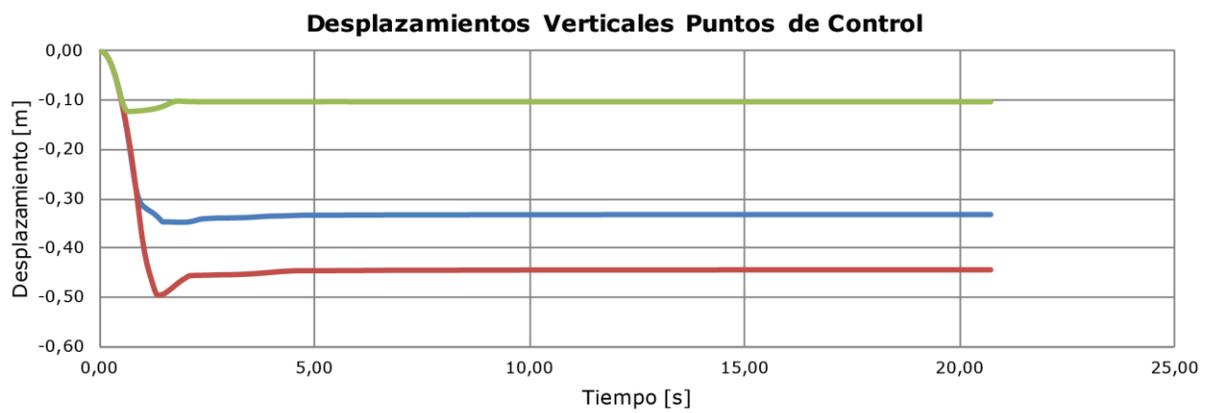
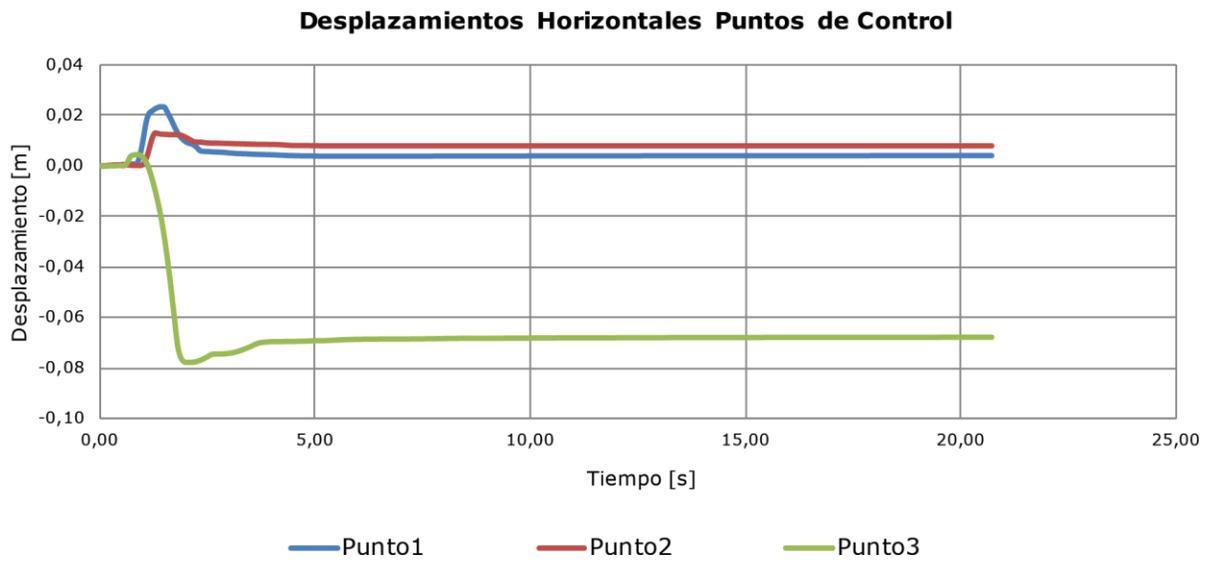


Figura 133: Desplazamientos verticales y horizontales de los puntos de control para el modelo estático final seleccionado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.

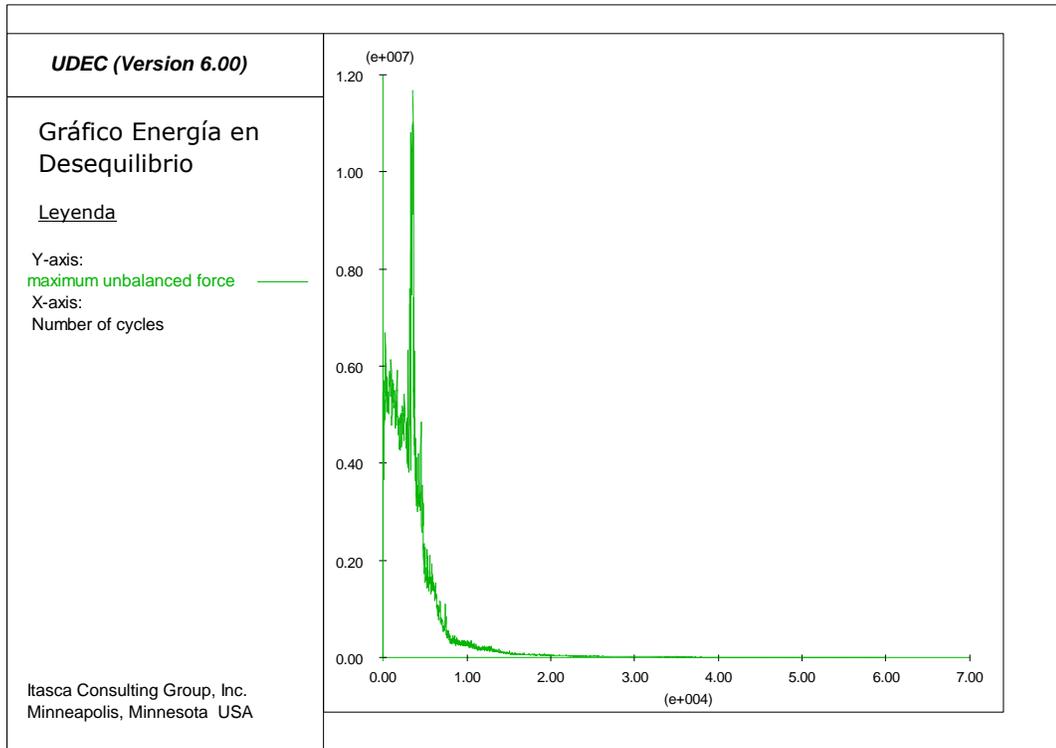


Figura 134: Gráfico de energía en desequilibrio por ciclo para el modelo estático final seleccionado aplicando el criterio de Mohr Coulomb para bloques.

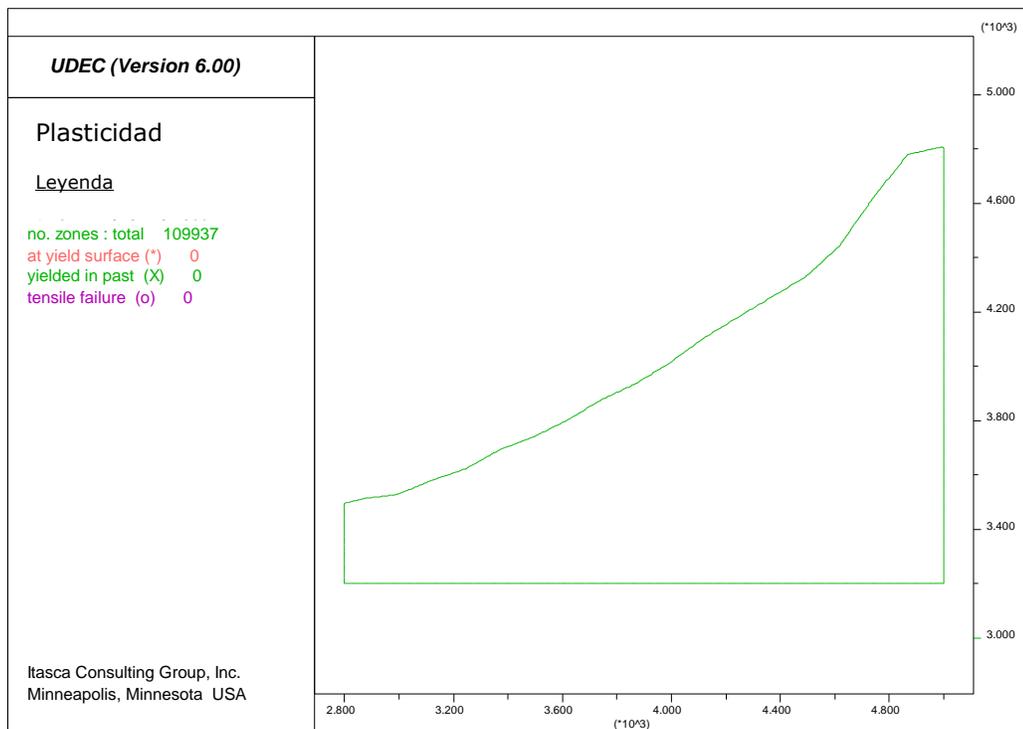


Figura 135: Comportamiento plástico del modelo estático final seleccionado aplicando el criterio de Mohr-Coulomb para bloques. No se observan zonas rosadas que sobrepasen el esfuerzo de fluencia.

Anexo F

Resultados modelo pequeña escala

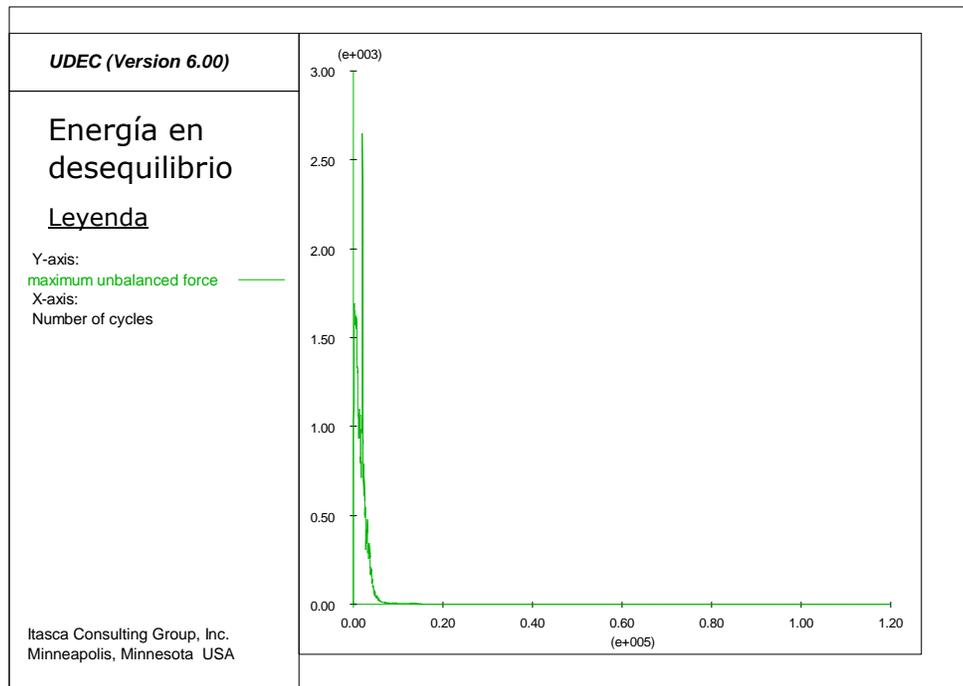


Figura 136: Energía en desequilibrio para el modelo de pequeña escala.

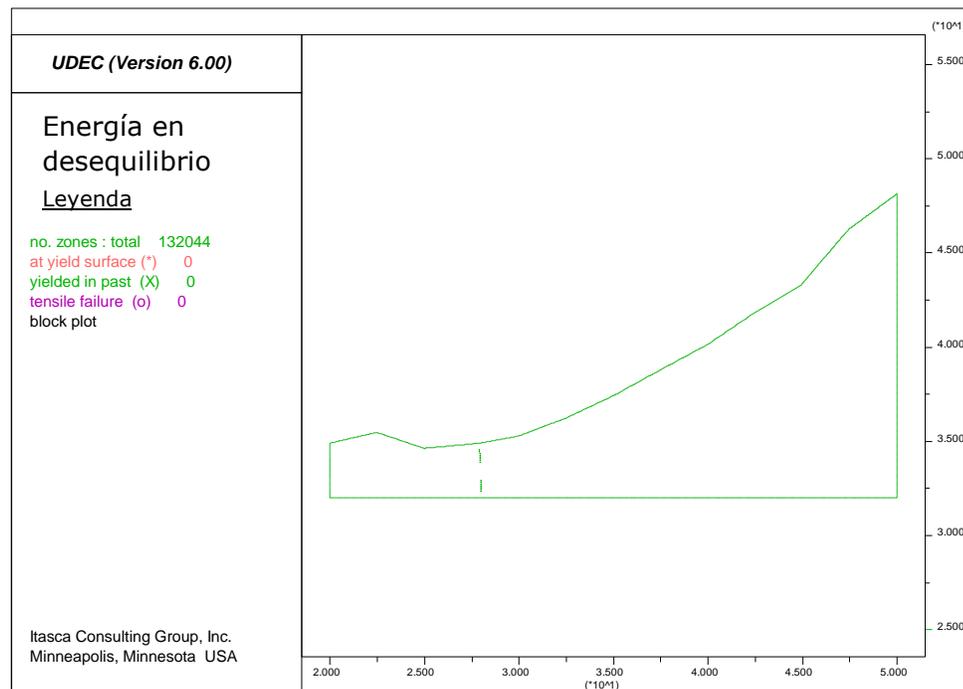


Figura 137: Comportamiento plástico para el modelo de pequeña escala.

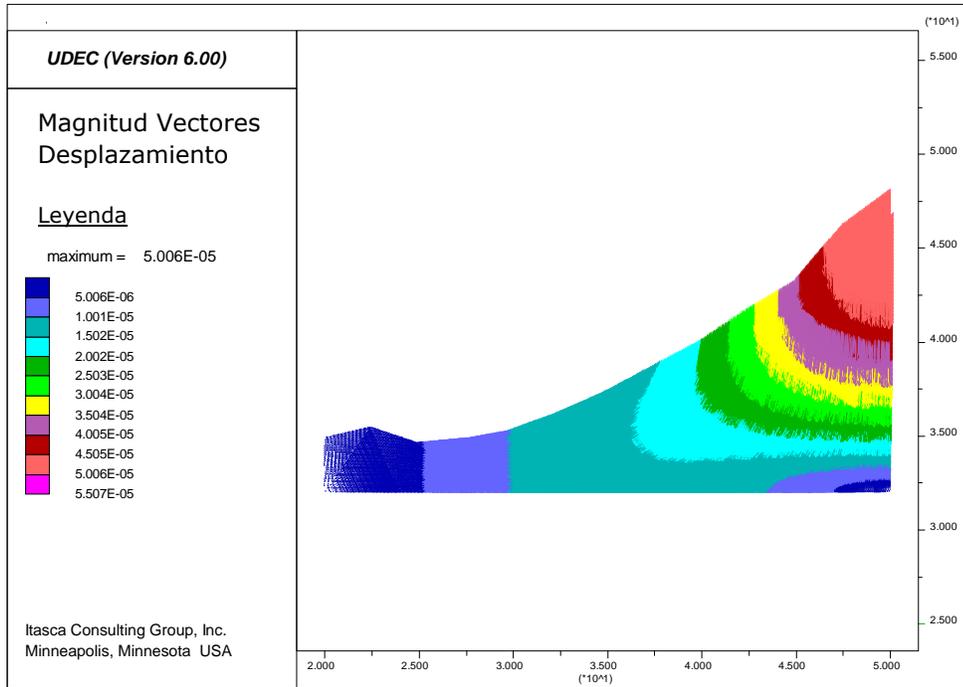


Figura 138: Vectores de desplazamiento para el modelo de pequeña escala.

Anexo G

Resultados modelo de flujo transitorio con saturación cero al inicio de simulación

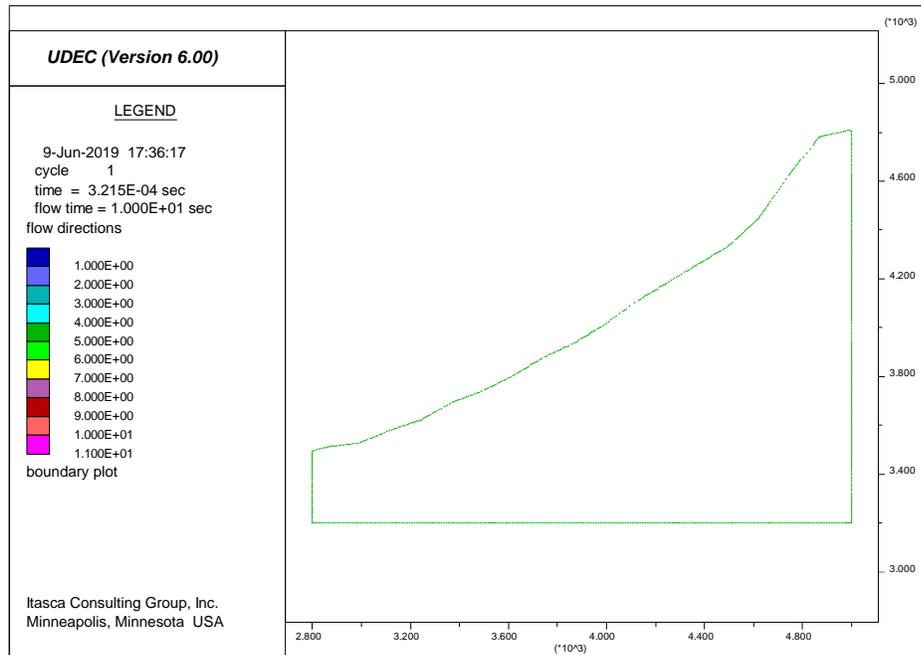


Figura 139: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación cero al inicio de la simulación.

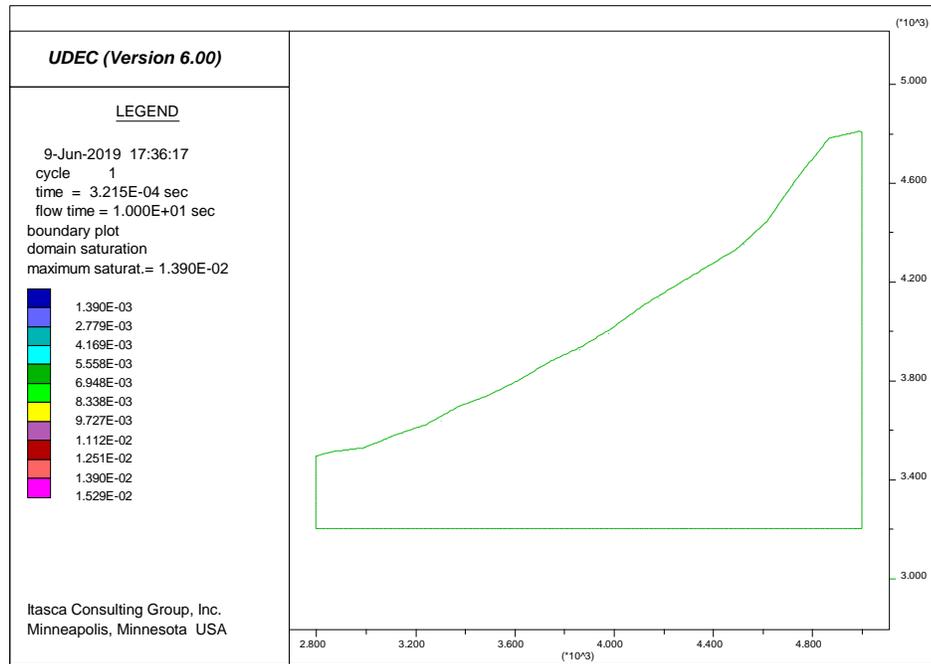


Figura 140: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación cero al inicio de la simulación.

Anexo H

Resultados modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas

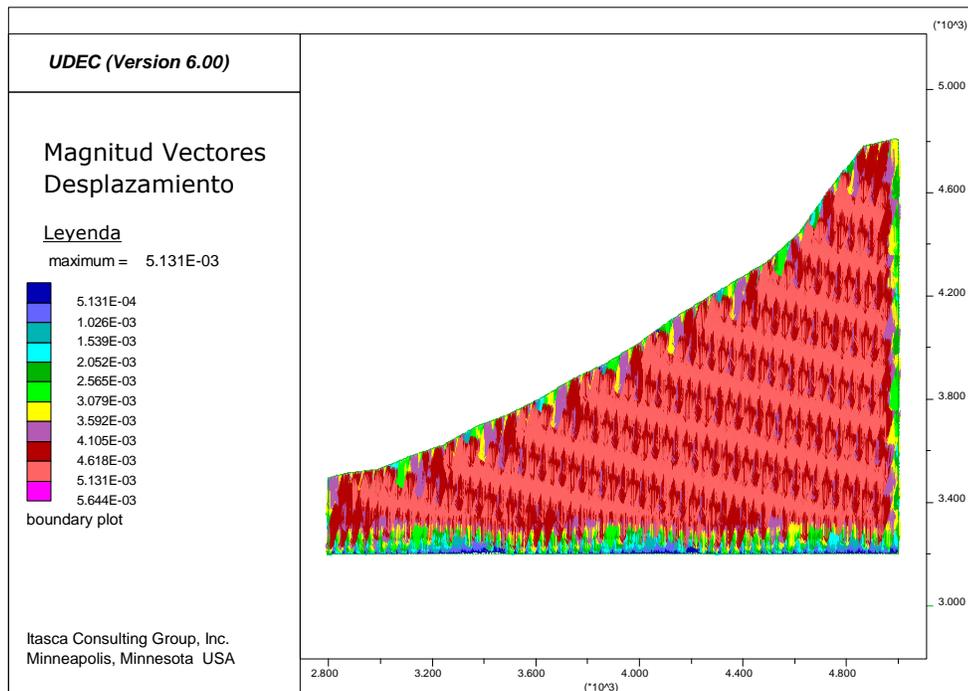


Figura 141: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

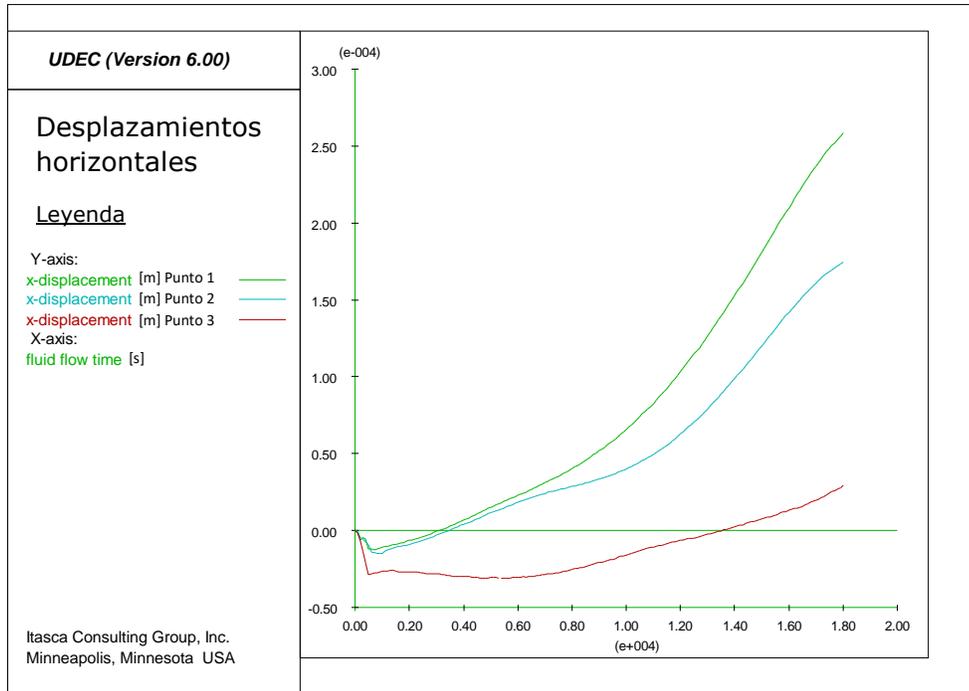


Figura 142: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

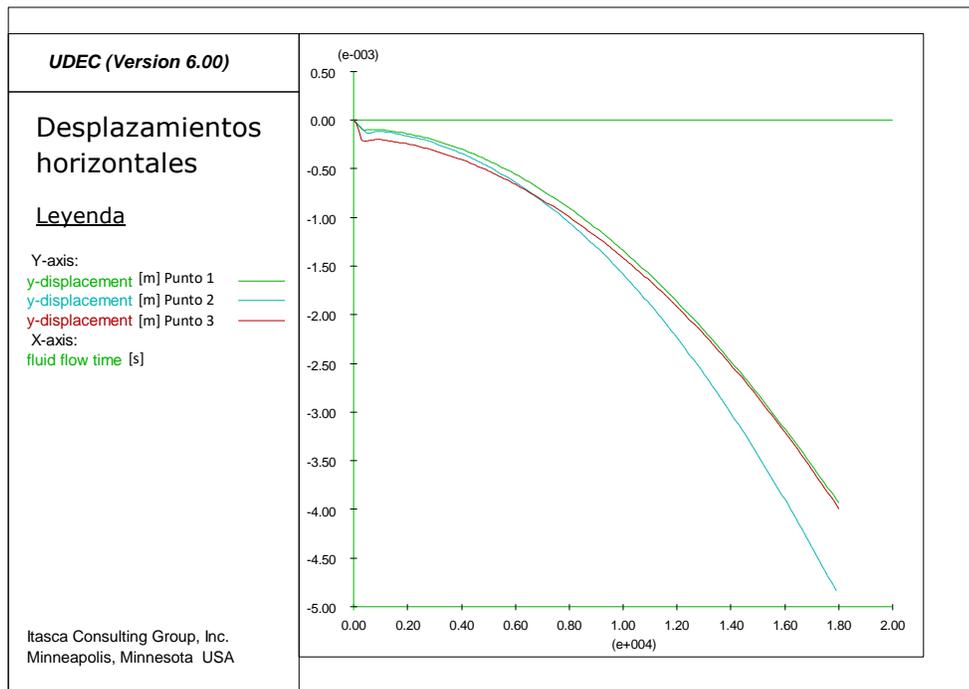


Figura 143: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

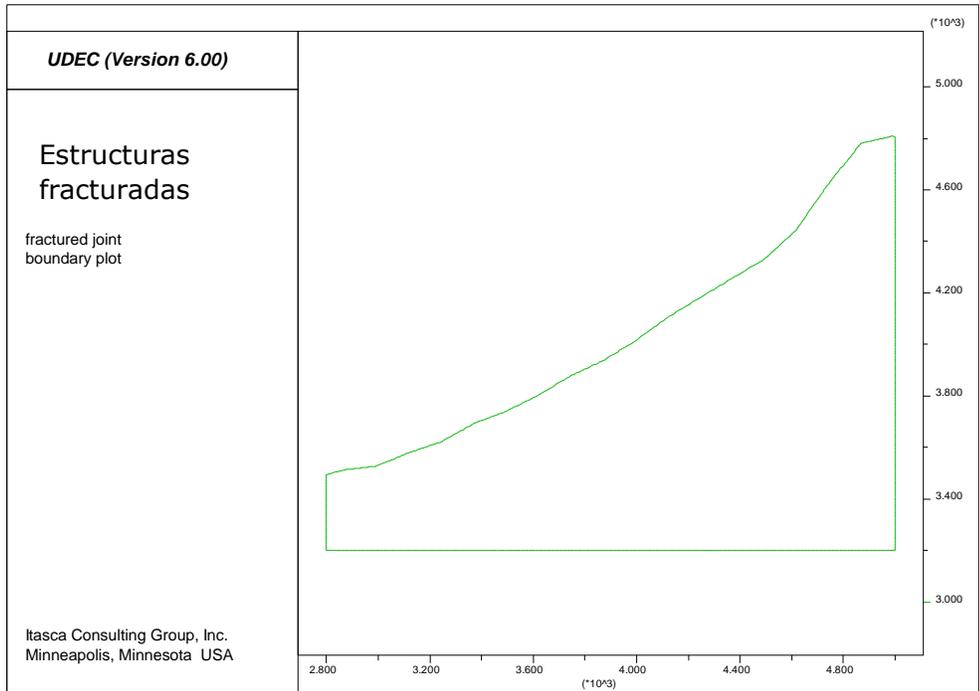


Figura 144: Diagrama de estructuras fracturadas para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

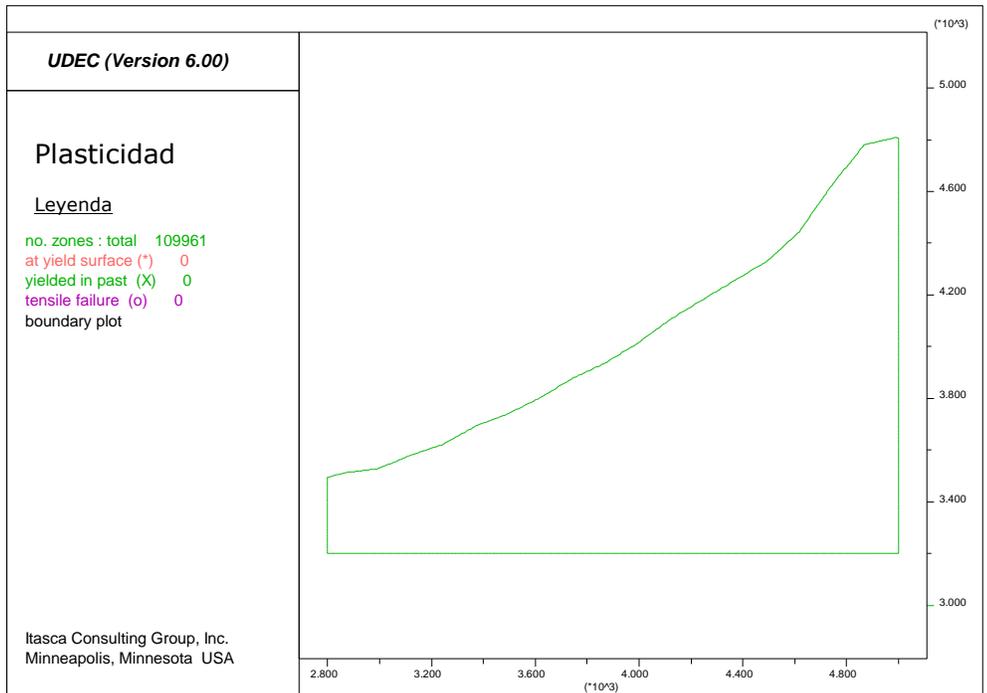


Figura 145: Comportamiento plástico para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

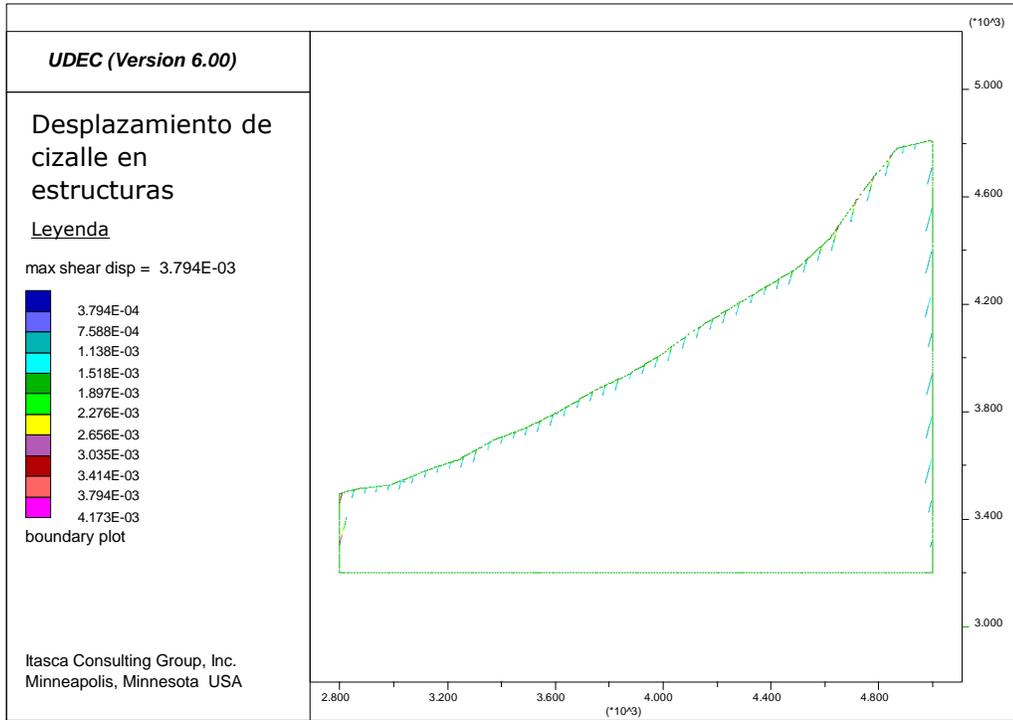


Figura 146: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

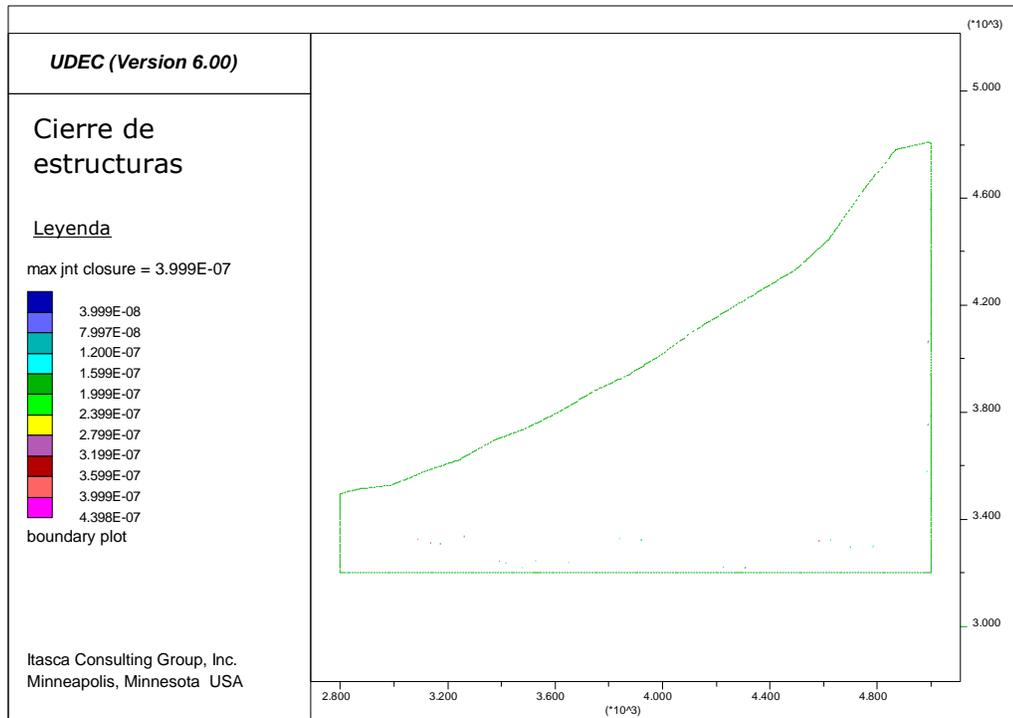


Figura 147: Cierre de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

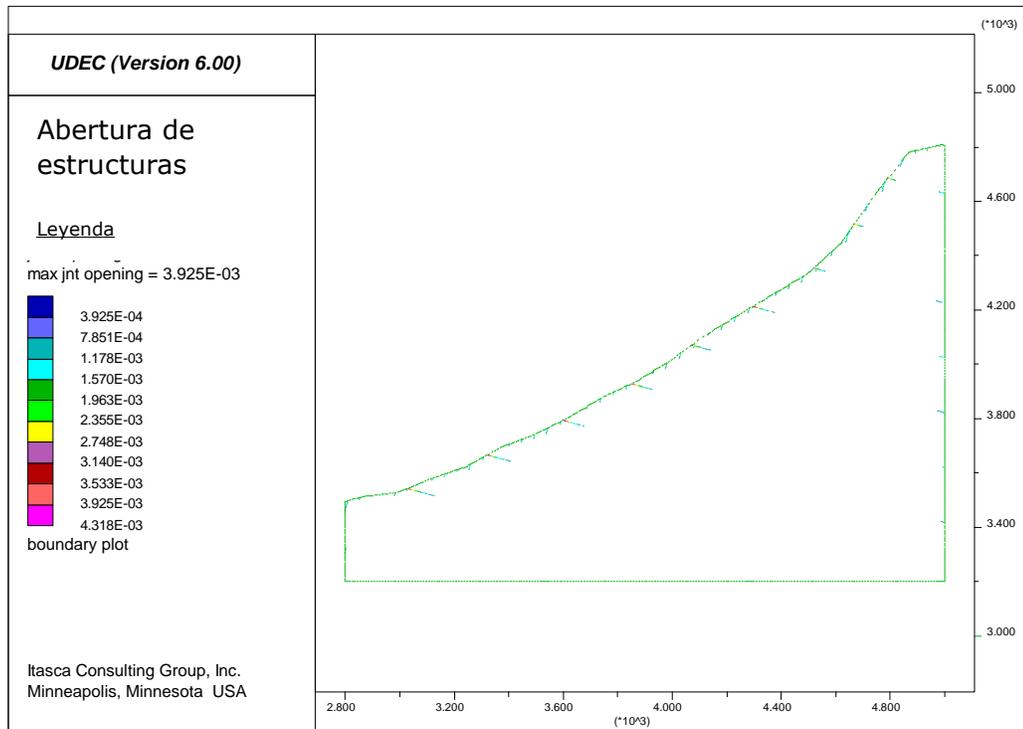


Figura 148: Abertura de estructuras en metros para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

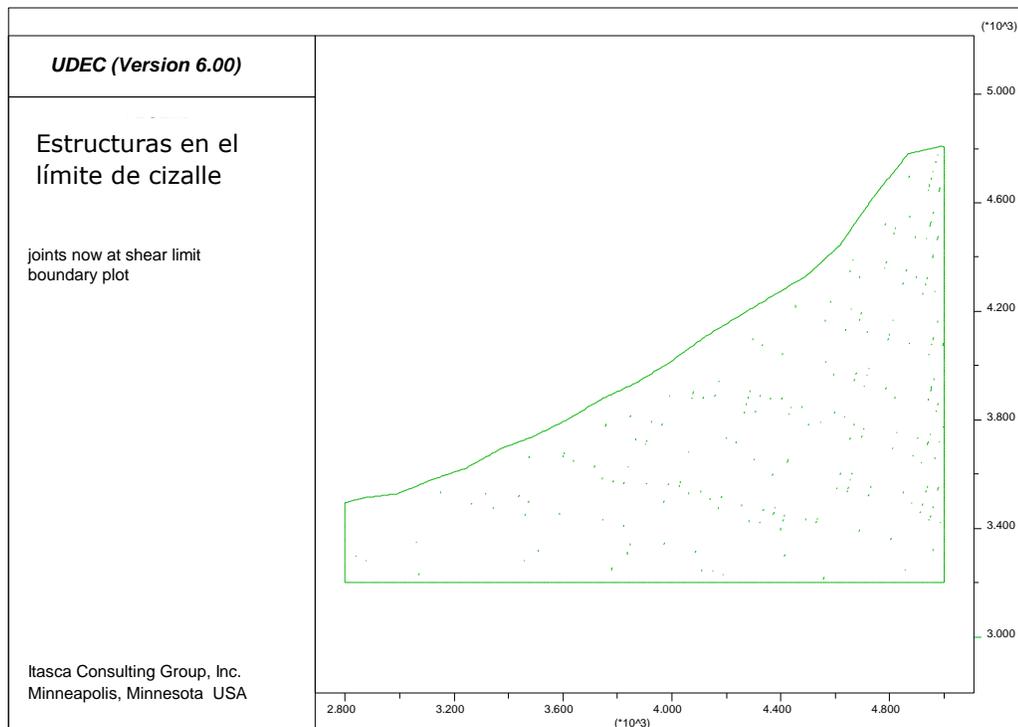


Figura 149: Estructuras en el límite de cizalle para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

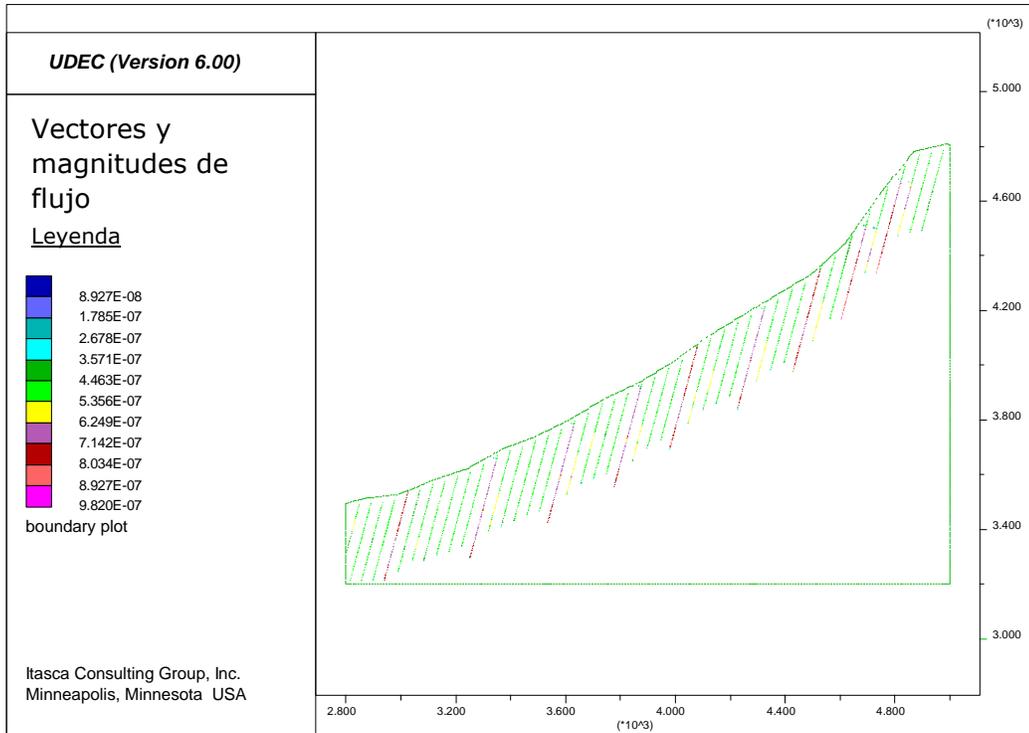


Figura 150: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

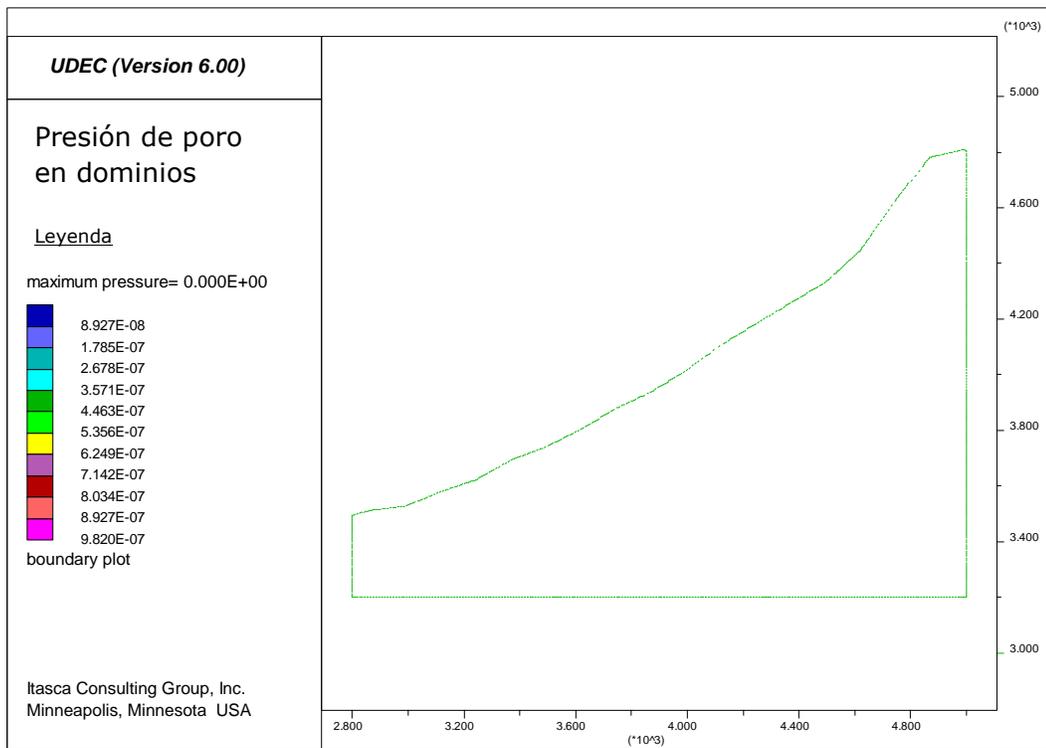


Figura 151: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

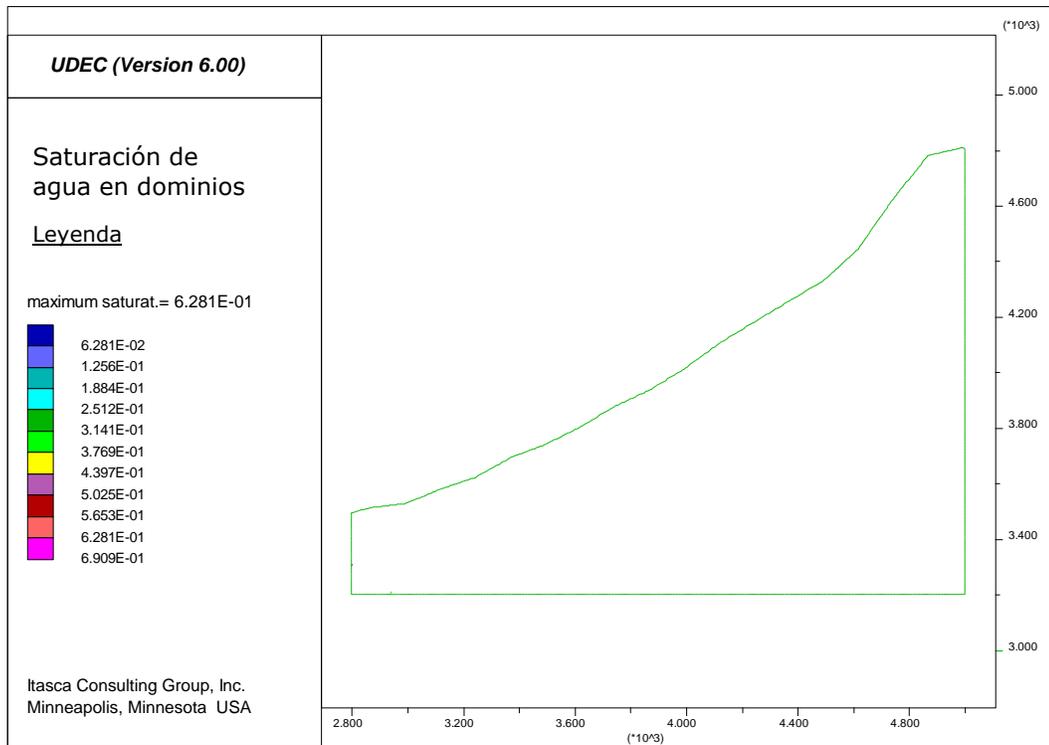


Figura 152: Saturación de agua en dominios para el modelo de flujo transitorio con saturación cero ejecutado por 5 horas.

Anexo I

Efectos producidos al variar los comandos *dtflow* (*fluid timestep*) y *step(cycle)*

Modelo 1

Dtflow= 1 [s]

Step= 1200

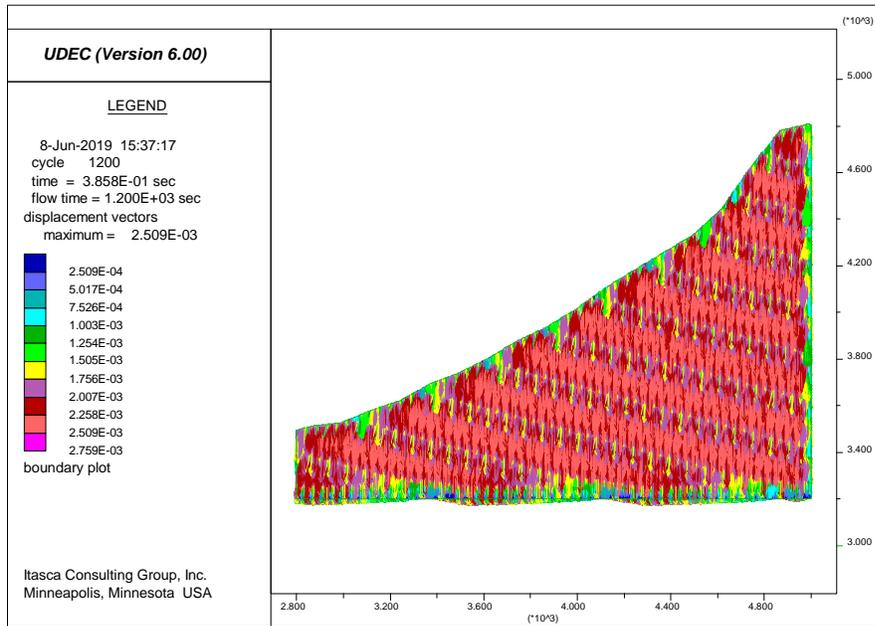


Figura 153: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo 1 de flujo transitorio.

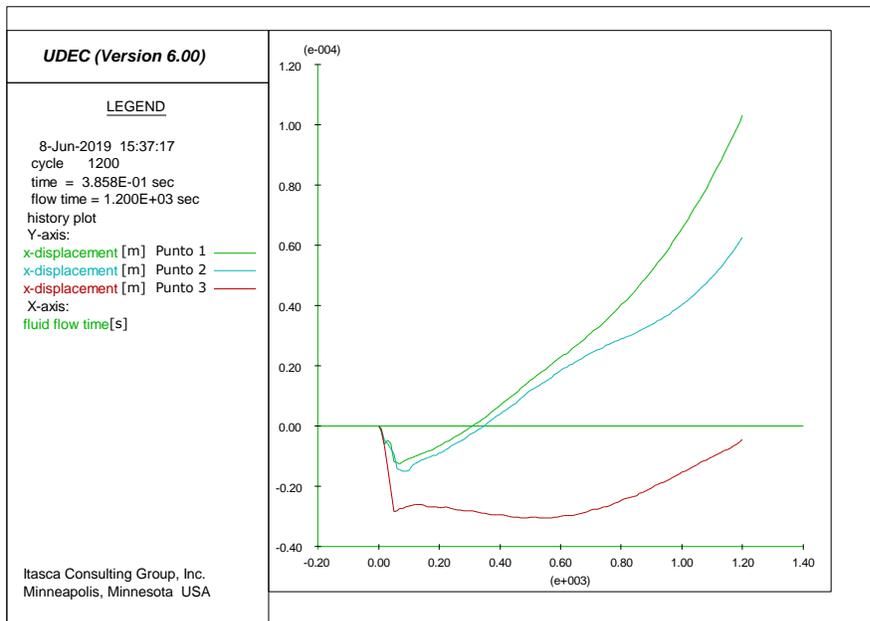


Figura 154: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo 1 de flujo transitorio.

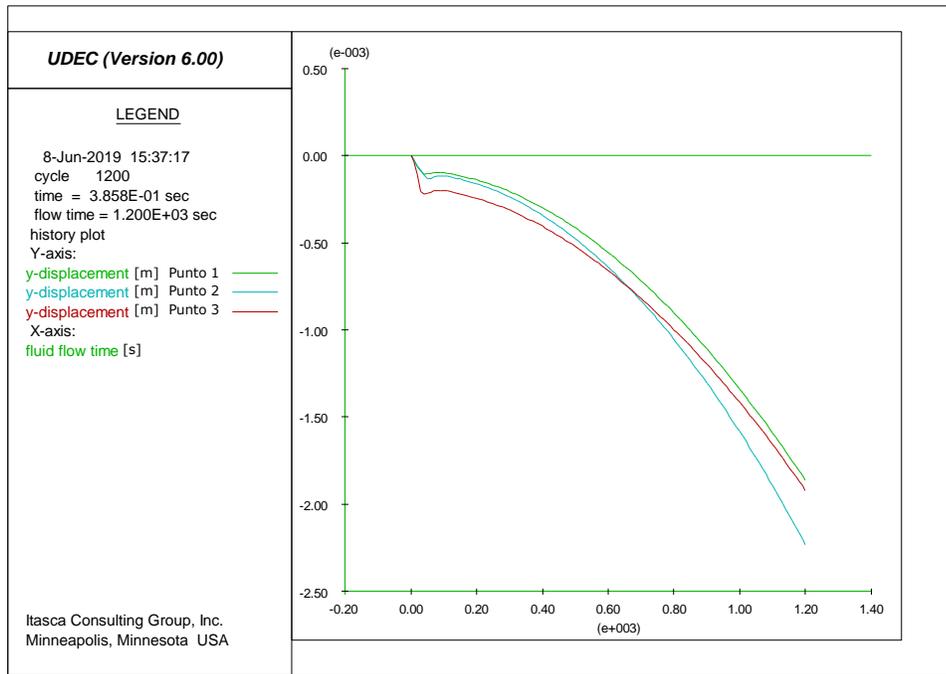


Figura 155: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo 1 de flujo transitorio.

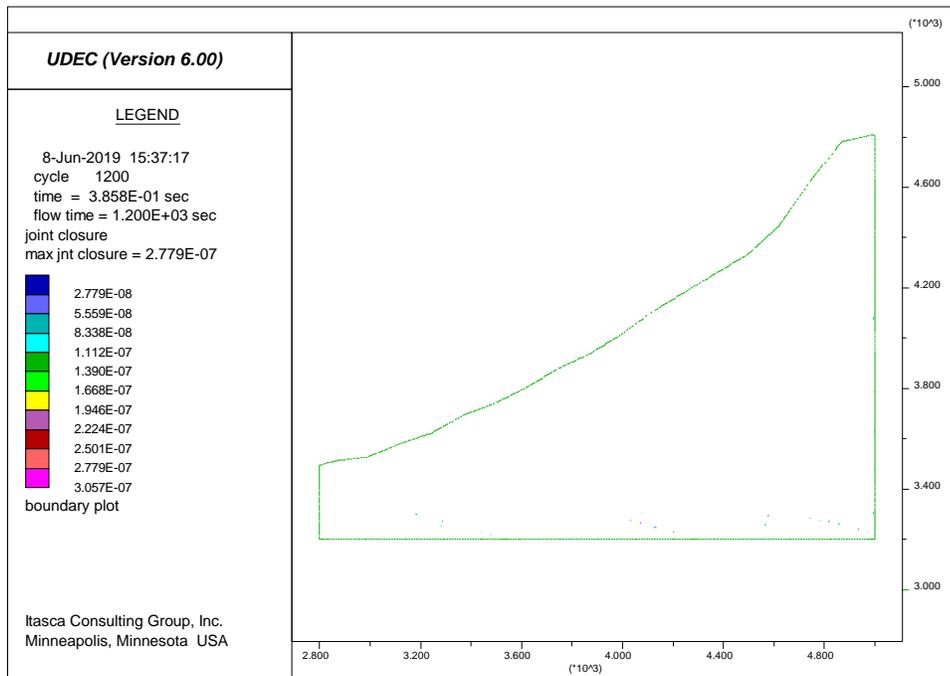


Figura 156: Cierre de estructuras en metros para el modelo 1 de flujo transitorio.

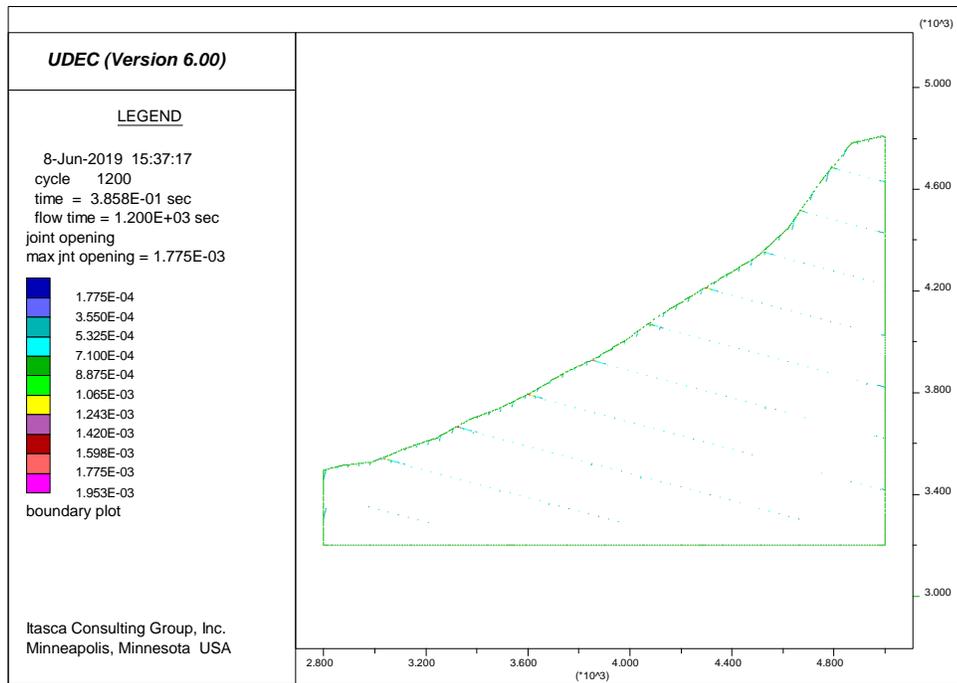


Figura 157: Abertura de estructuras en metros para el modelo 1 de flujo transitorio.

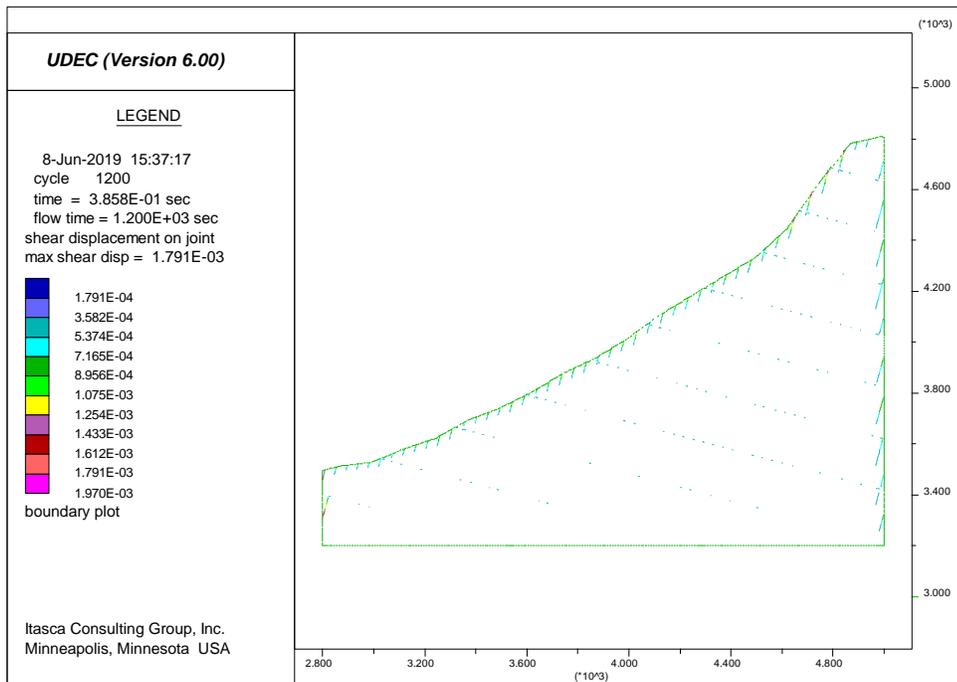


Figura 158: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo 1 de flujo transitorio.

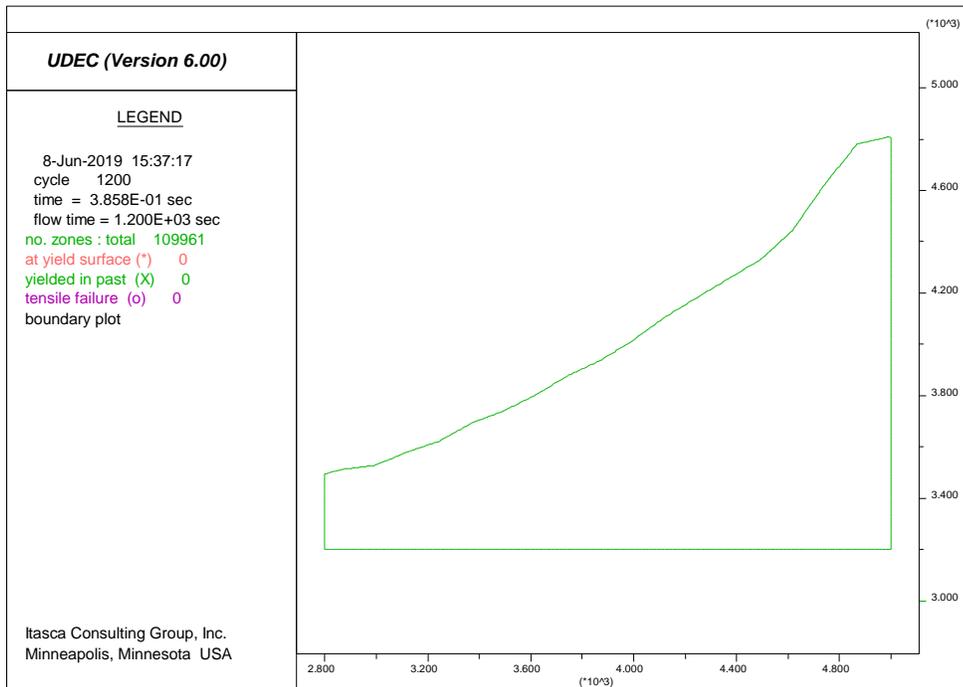


Figura 159: Comportamiento plástico para el modelo 1 de flujo transitorio.

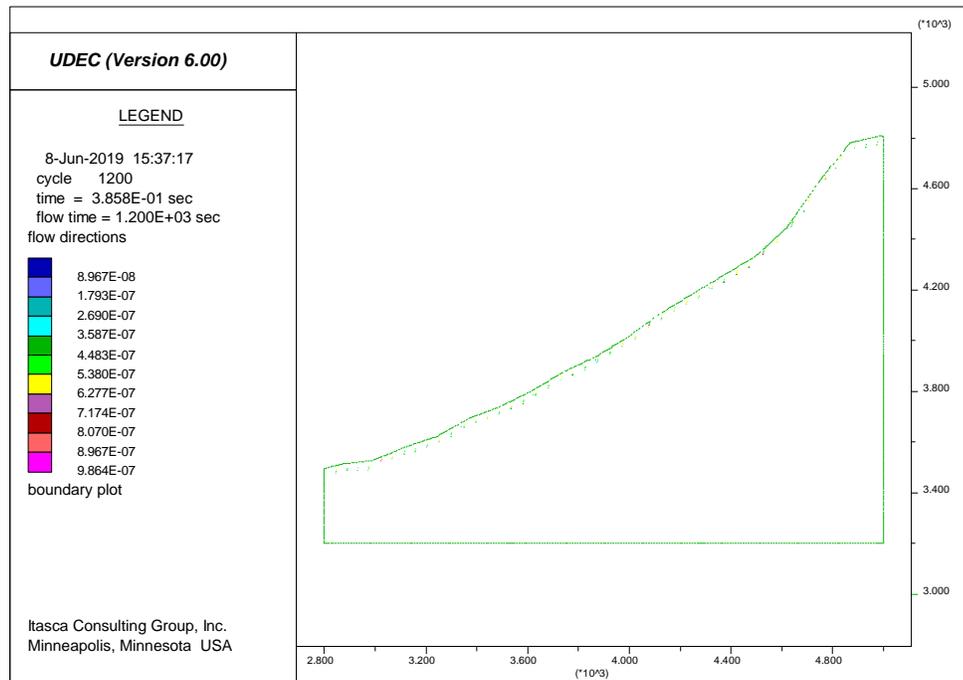


Figura 160: Vectores y magnitud de flujo en m³/s para el modelo 1 de flujo transitorio.

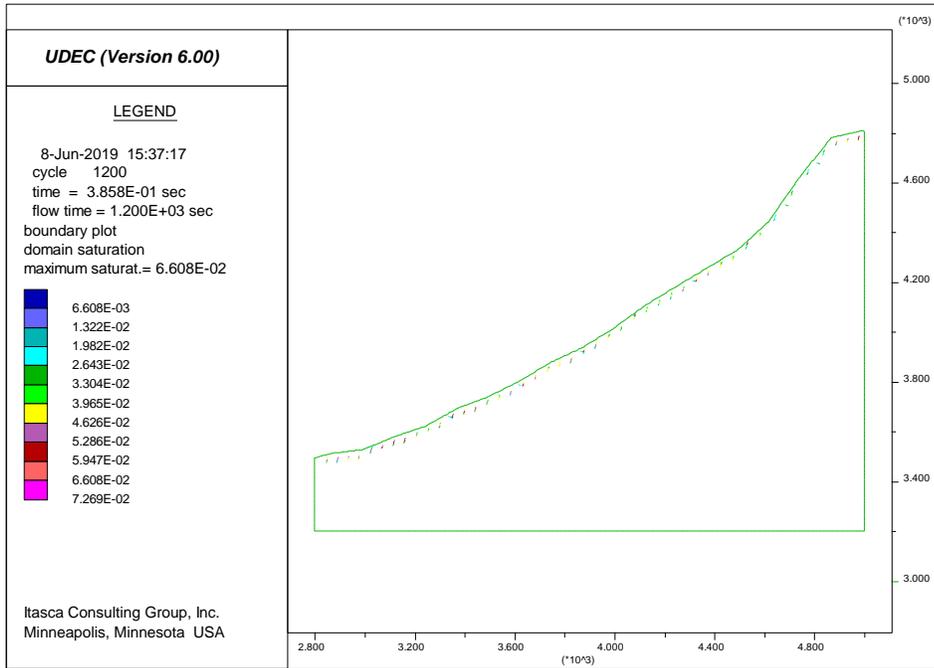


Figura 161: Saturación de agua en dominios para el modelo 1 de flujo transitorio.

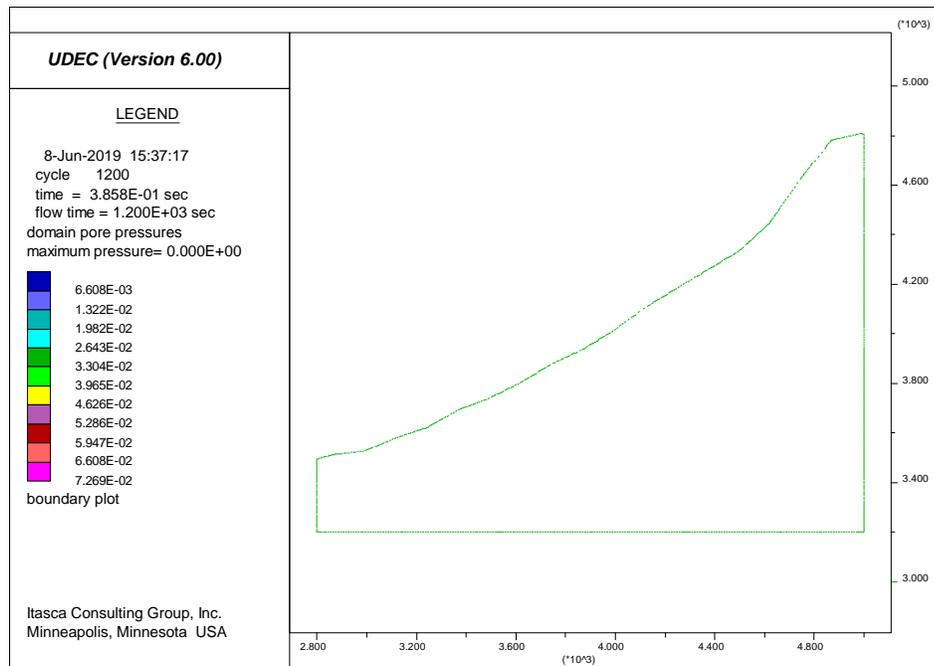


Figura 162: Presión de poros en dominios en Pascales para el modelo 1 de flujo transitorio.

Modelo 2

Dtflow= 1 [s]
Step= 4500

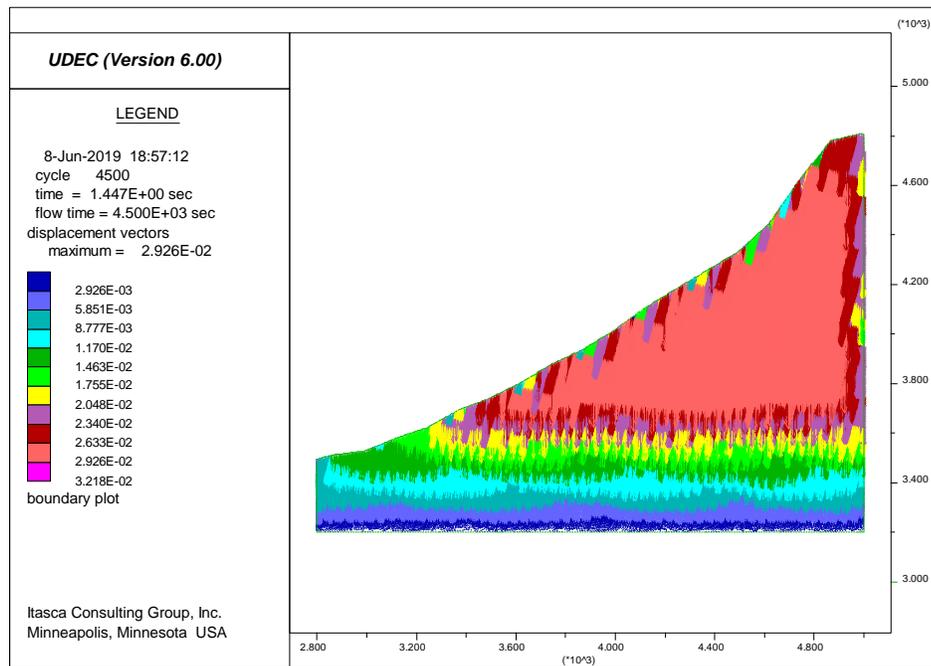


Figura 163: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo 2 de flujo transitorio.

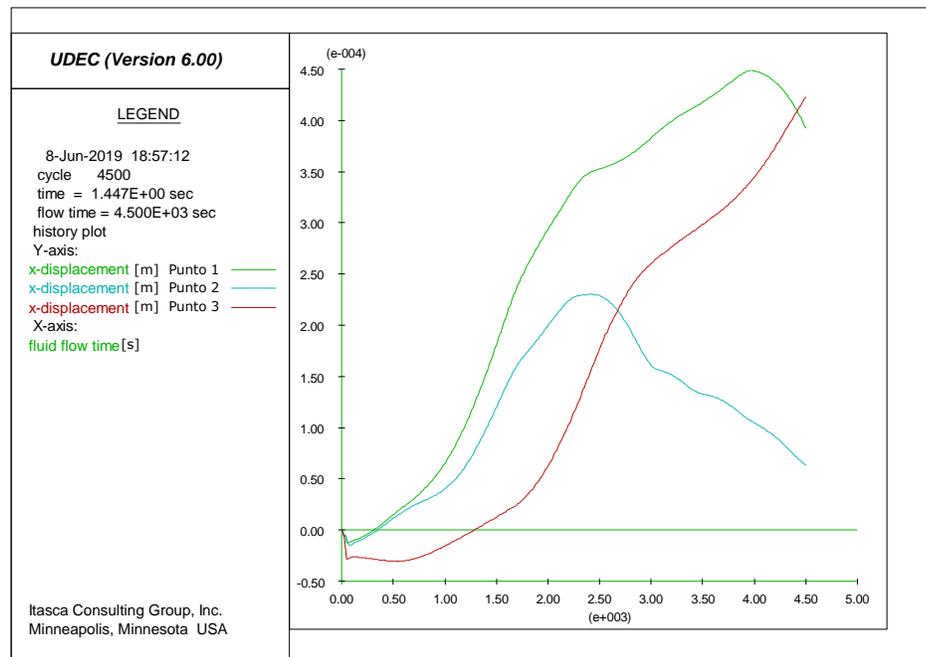


Figura 164: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo 2 de flujo transitorio.

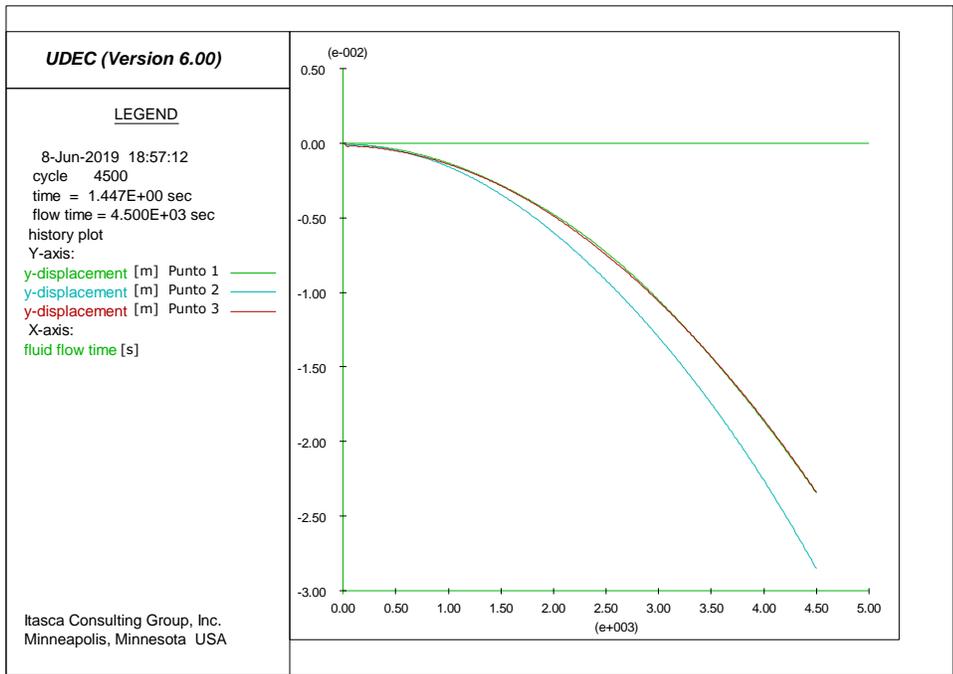


Figura 165: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo 2 de flujo transitorio.

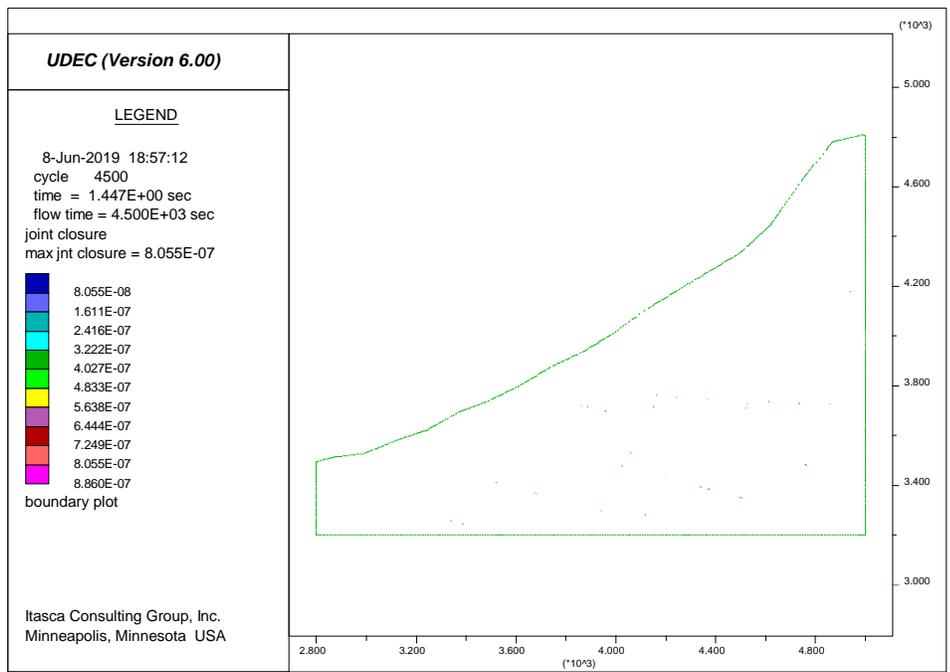


Figura 166: Cierre de estructuras en metros para el modelo 2 de flujo transitorio.

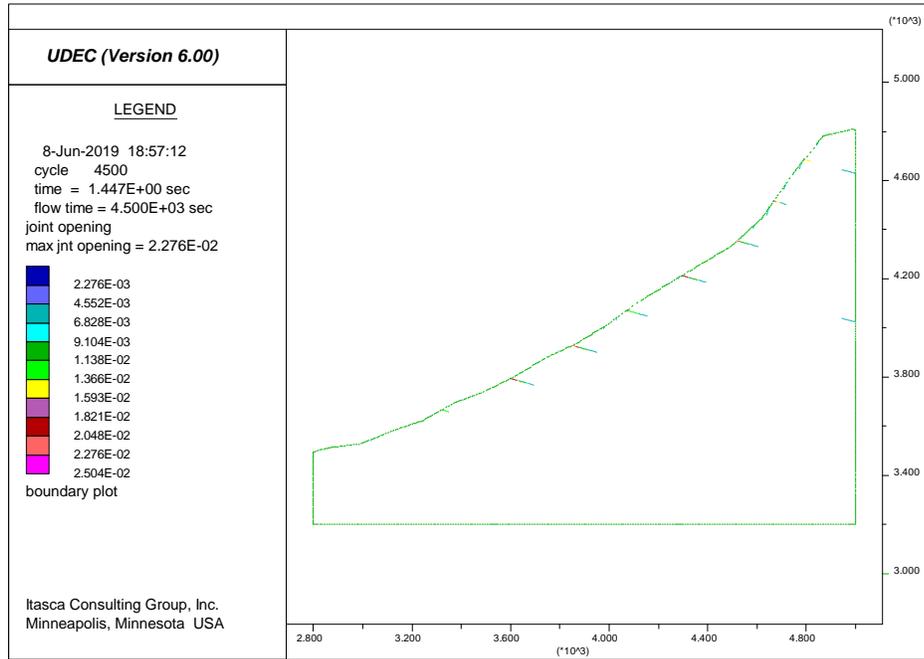


Figura 167: Abertura de estructuras en metros para el modelo 2 de flujo transitorio.

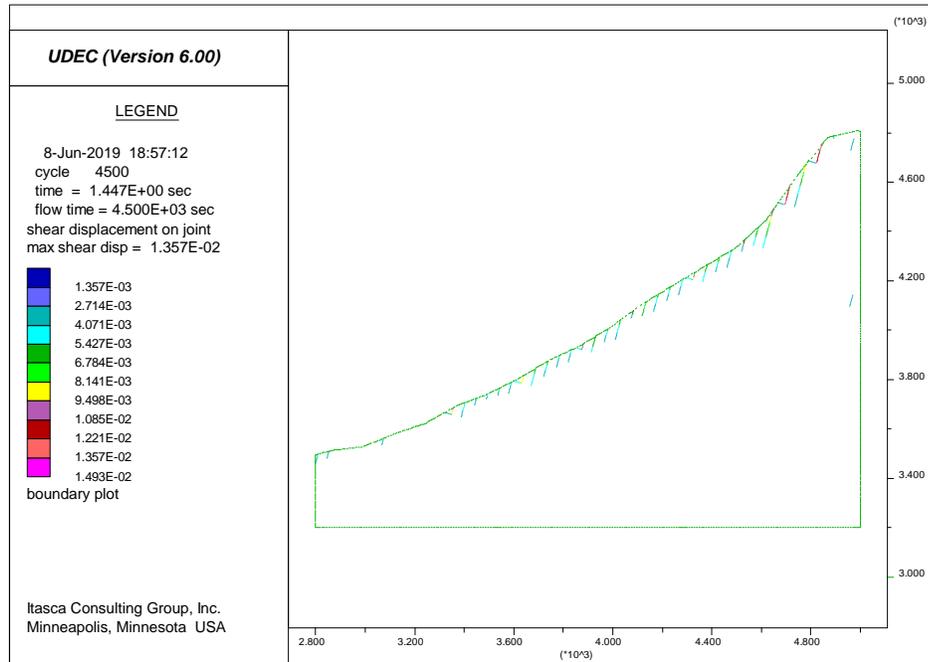


Figura 168: Desplazamiento de cizalle de estructuras en metros para el modelo 2 de flujo transitorio.

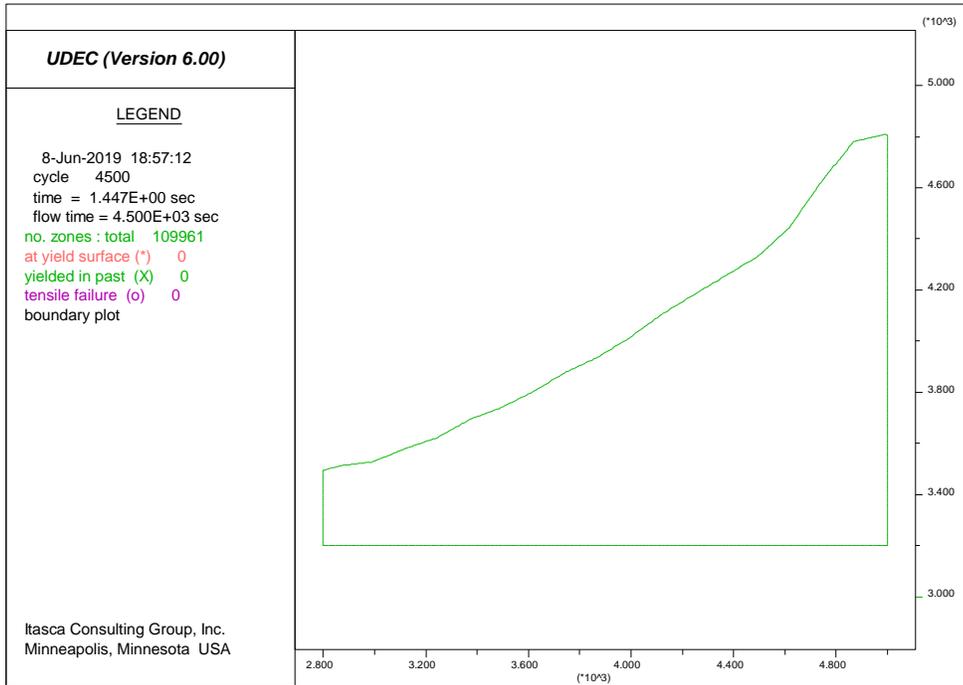


Figura 169: Comportamiento plástico para el modelo 2 de flujo transitorio.

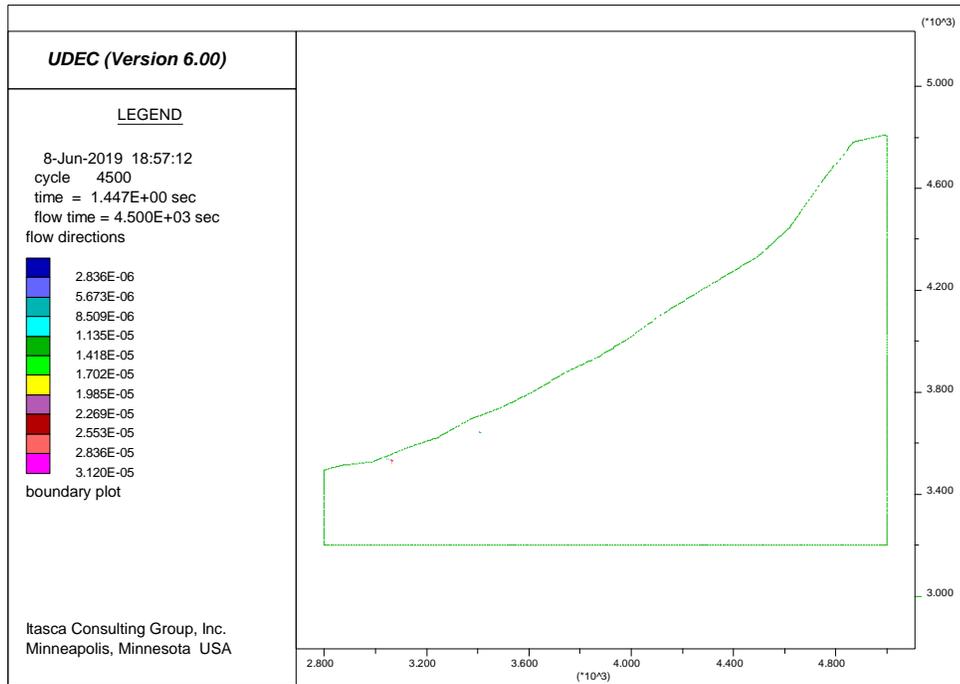


Figura 170: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo 2 de flujo transitorio.

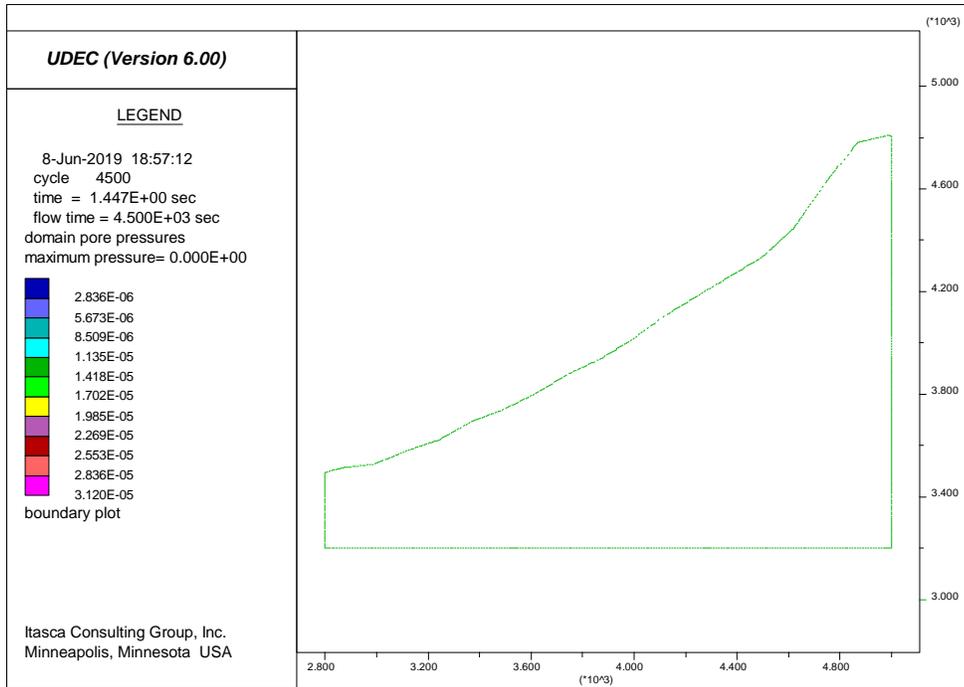


Figura 171: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo 2 de flujo transitorio.

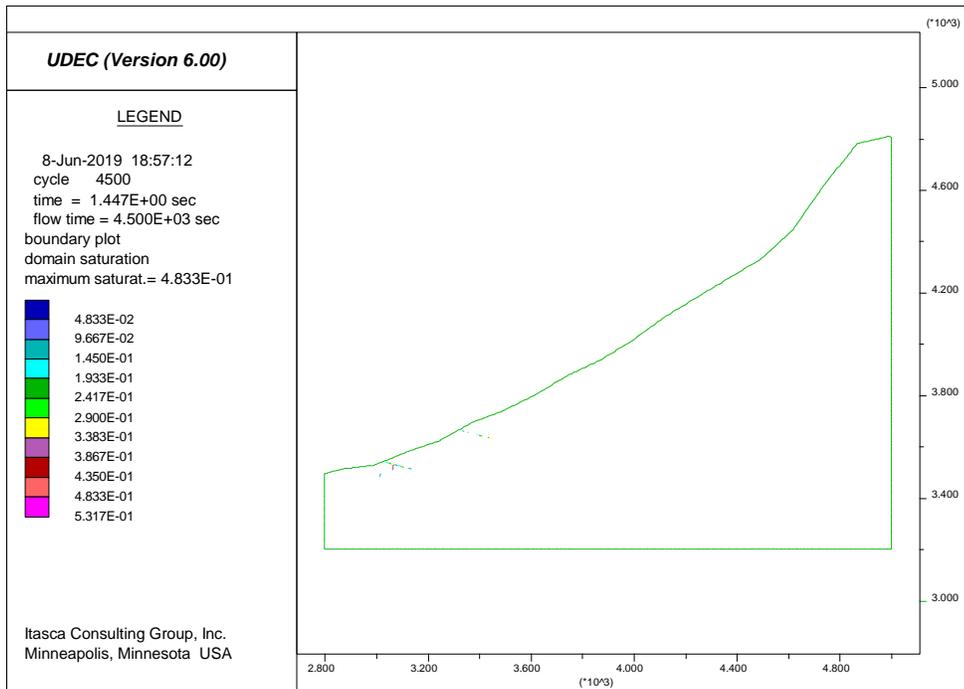


Figura 172: Saturación de agua en dominios para el modelo 2 de flujo transitorio.

Modelo 3

Dtflow= 20 [s]
Step= 600

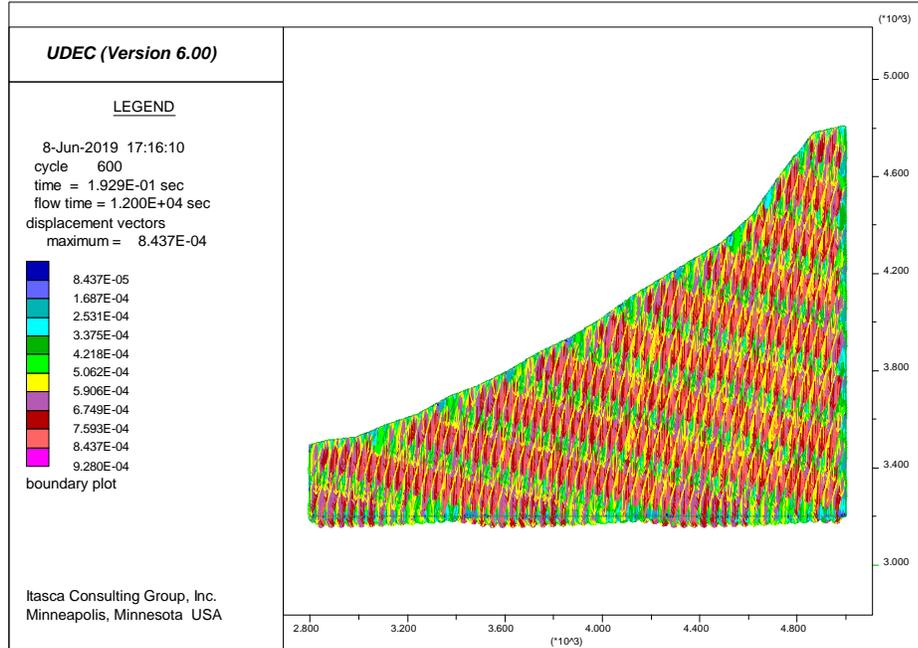


Figura 173: Magnitud de vectores de desplazamiento en metros para el modelo 3 de flujo transitorio.

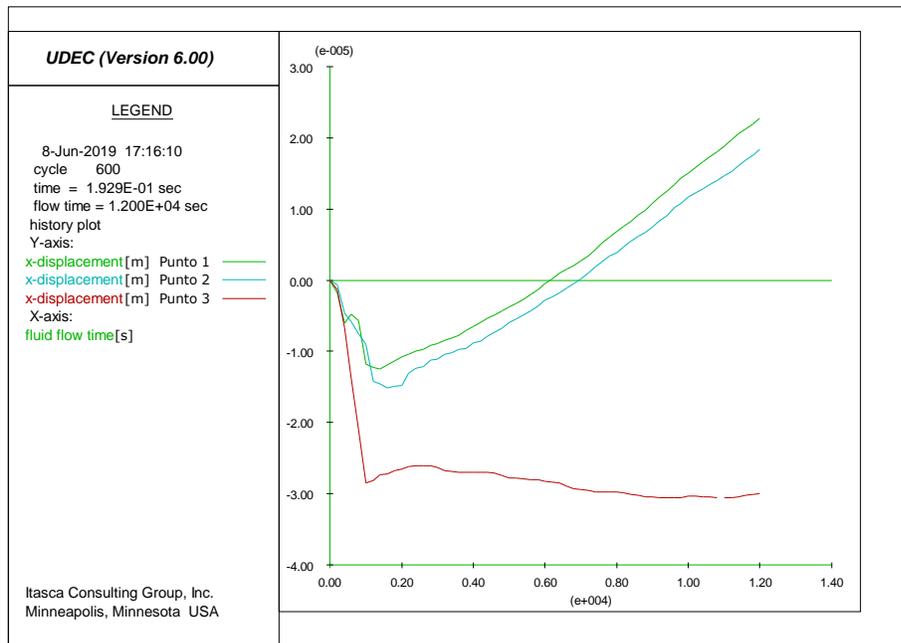


Figura 174: Desplazamientos horizontales de los puntos de control para el modelo 3 de flujo transitorio.

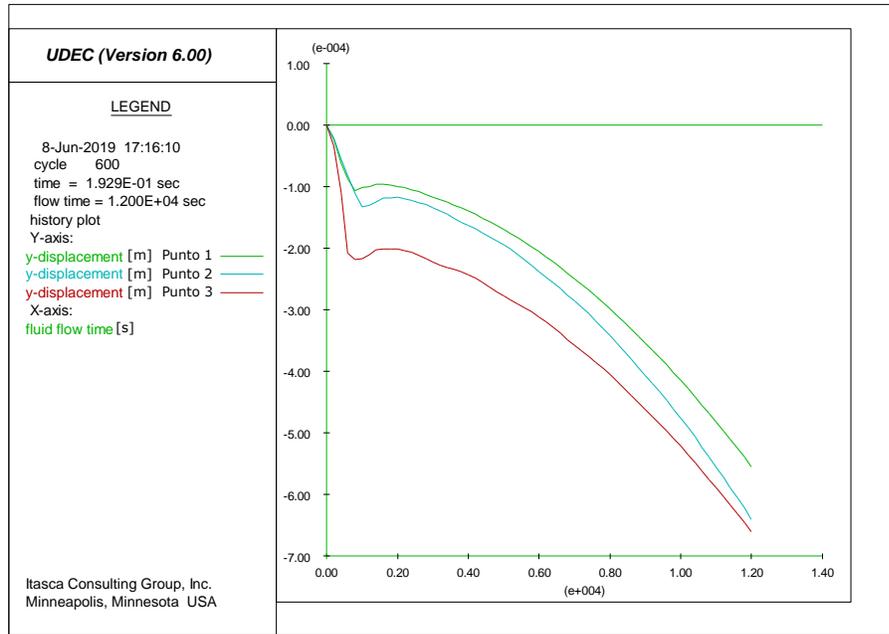


Figura 175: Desplazamientos verticales de los puntos de control para el modelo 3 de flujo transitorio.

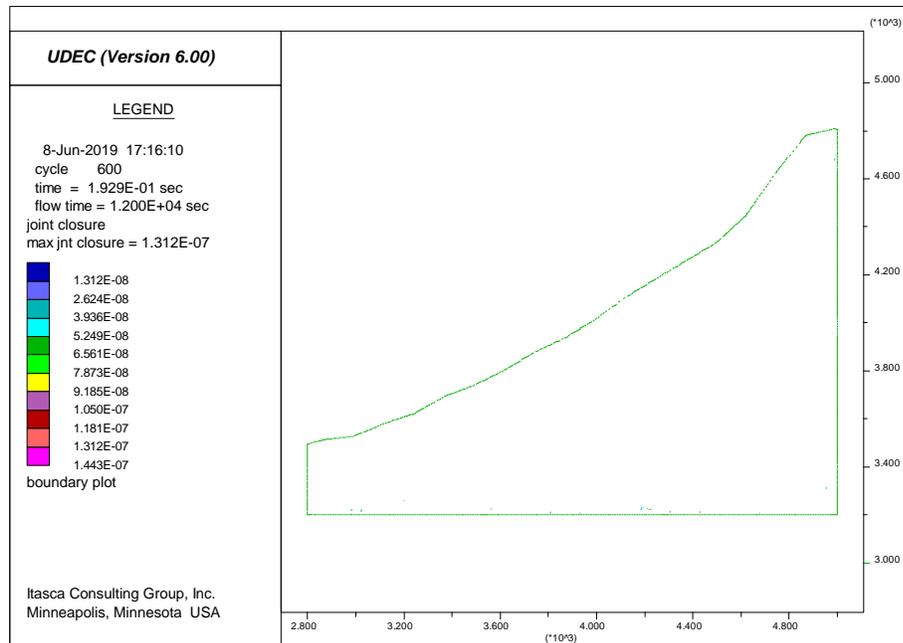


Figura 176: Cierre de estructuras en metros para el modelo 3 de flujo transitorio.

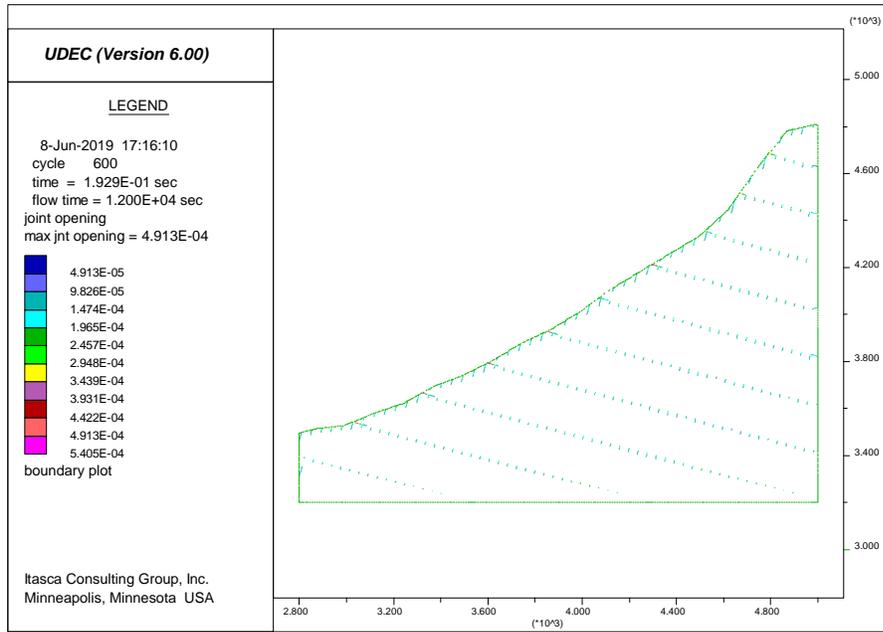


Figura 177: Abertura de estructuras en metros para el modelo 3 de flujo transitorio.

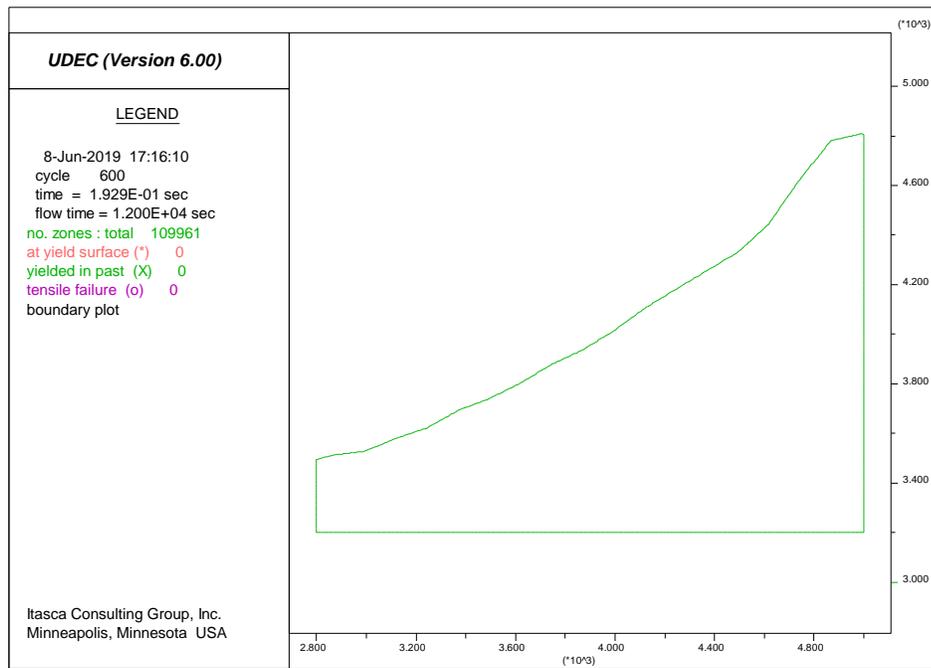


Figura 178: Comportamiento plástico para el modelo 3 de flujo transitorio.

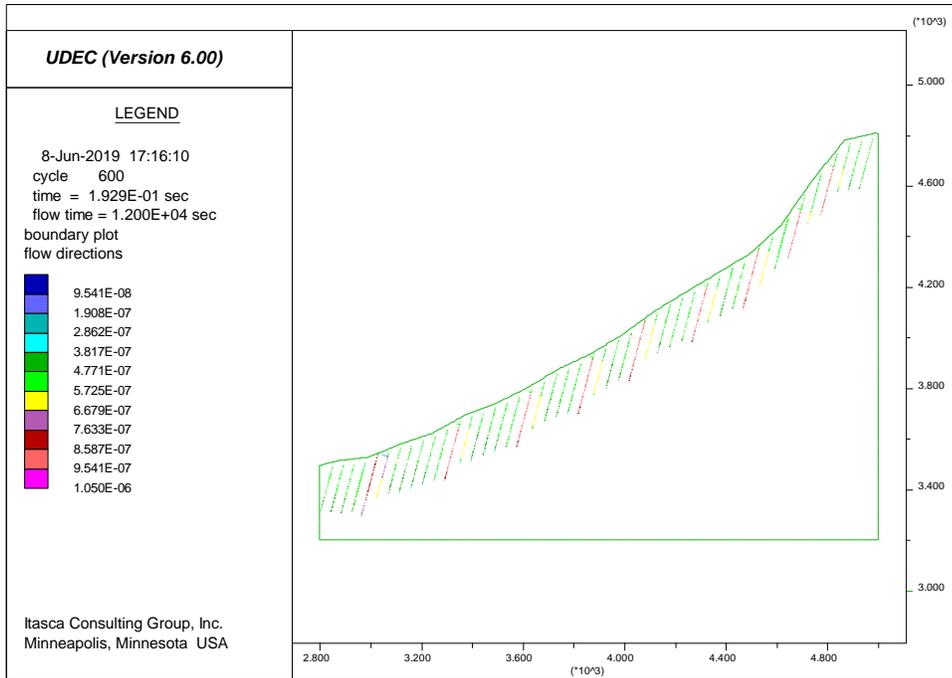


Figura 179: Vectores y magnitud de flujo en m^3/s para el modelo 3 de flujo transitorio.

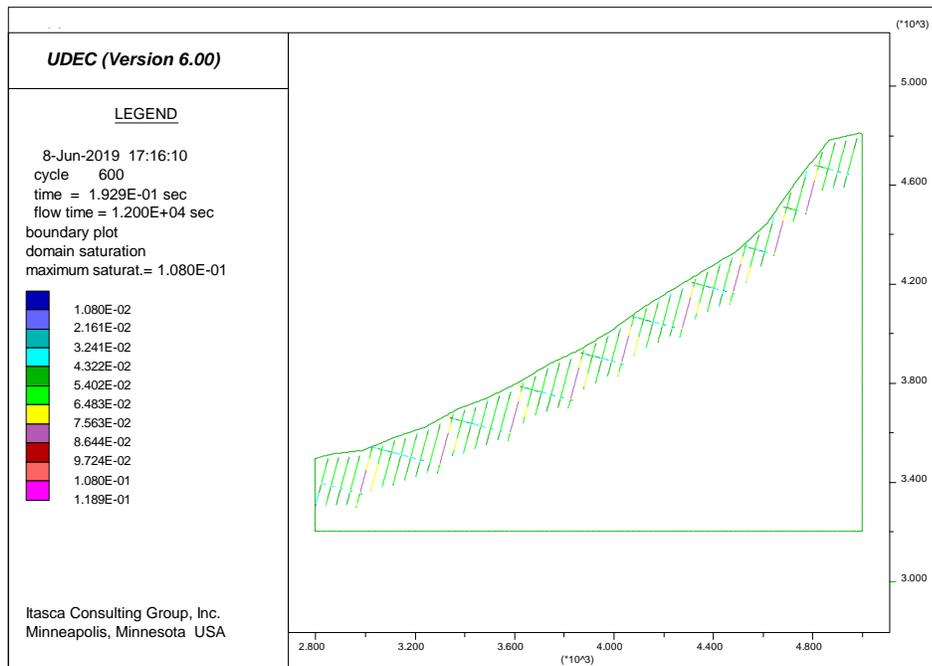


Figura 180: Saturación de agua en dominios para el modelo 3 de flujo transitorio.

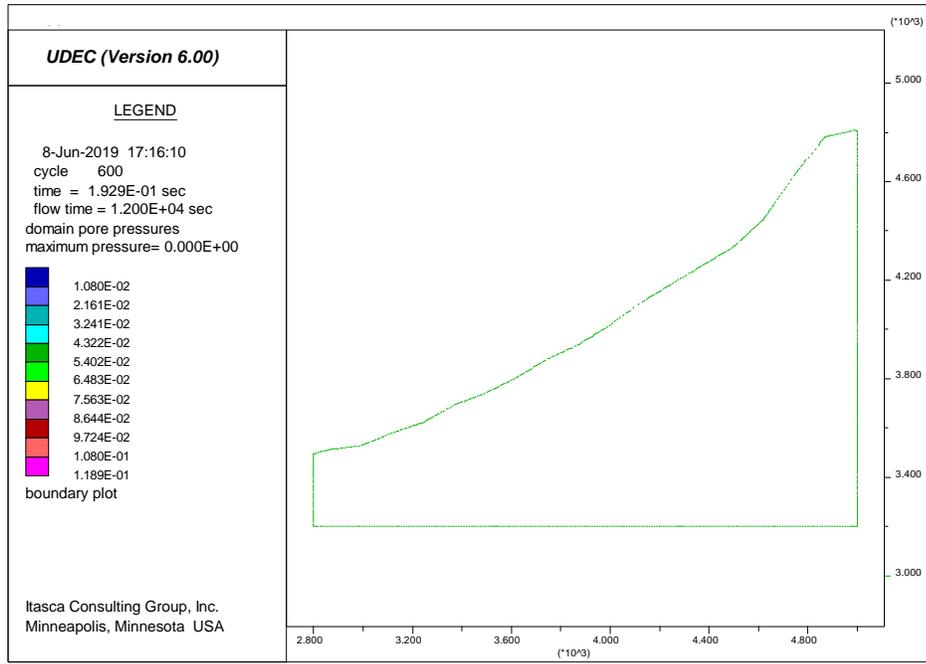


Figura 181: Presión de poro en dominios en Pascales para el modelo 3 de flujo transitorio.